



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dip. AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI RISORSE NATURALI
E AMBIENTE

Corso di laurea in SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

Allevamenti bovini e gas climalteranti:
situazione e strategie di mitigazione

Relatore
Prof. Luigi Gallo

Laureando
Davide Stefanello
Matricola n. 2007402

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

RIASSUNTO

Questa tesi vuole concentrarsi sulle emissioni di GHG provenienti dal mondo bovino. Data la sempre maggior attenzione che viene prestata ad aspetti quali il cambiamento climatico e il riscaldamento globale, è doveroso concentrarsi su aspetti e tecniche che possono ridurre le emissioni di GHG in un comparto, quello bovino, che è da tempo sotto i riflettori per le emissioni che provoca. Si possono notare due filoni principali nello studio di tecniche per la diminuzione di produzione dei GHG da parte dei ruminanti: uno riguarda la gestione dell'alimentazione e della nutrizione, la selezione genetica e le tecniche gestionali, in cui il focus principale è sull'attenuazione della produzione di metano (senza però inficiare sulla produttività, si punta a far ridurre il tasso CH_4/ECM), mentre l'altro riguarda la gestione degli effluenti (che dipende anche dal primo filone) e quindi si focalizza soprattutto sulla parte che riguarda l'azoto (N_2O e NH_3). Varie vie e sperimentazioni si sono susseguite nel corso degli anni e si susseguiranno in futuro, con l'obiettivo comune di trovare soluzioni a quello che, con il passare del tempo, è destinato a diventare un problema sempre maggiore, dato l'aumento della richiesta di prodotti bovini (carne e latte) attesa in futuro.

ABSTRACT

This thesis wants to concentrate on GHGs emissions coming from ruminants. Because of the major attention that public opinion pays every day to climate change and global warming, it is mandatory to focus on the aspects and technics that can reduce GHG emissions in the bovine industry, which is under attack (by the public opinion) because of the pollution it creates. We can notice two major sections where researchers have focused to break down GHG emissions by ruminants: the first, who concerns feed and nutrition management, genetic selection and management techniques, focus mainly on the control of methane emissions (without influencing productivity, the target is to reduce the CH₄/ECM rate), while the second deals with the management of manure (whose characteristics can be influenced by the first section actions) and focus mainly on nitrogen emissions (N₂O and NH₃). Lots of ideas have emerged and many experiments have been done in the past and will be made in the future, with the common goal to find solutions to reduce GHG emissions in an industry, the bovine one, where this problem is going to increase in the next years because of the increase of beef and dairy products demand.

| | |
|---|-----------|
| RIASSUNTO | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| 1 INTRODUZIONE | 7 |
| 1.1 GHG: cosa sono e quali sono | 7 |
| 1.1.1 H ₂ O | 8 |
| 1.1.2 CH ₄ | 9 |
| 1.1.3 N ₂ O | 12 |
| 1.1.4 CO ₂ | 12 |
| 2 STORICO EMISSIONI | 13 |
| 2.1 Emissioni di GHG in Francia | 13 |
| 2.2 Il parallelo con l'Italia | 19 |
| 3 RUMINANTI E GAS SERRA | 19 |
| 3.1 Fermentazione enterica | 19 |
| 4 STRATEGIE DI MITIGAZIONE DEL METANO ENTERICO | 22 |
| 4.1 Classificazione | 22 |
| 4.2 Alimenti, gestione degli alimenti e nutrizione | 22 |
| 4.2.1 Livello di ingestione, digeribilità e velocità di transito | 24 |
| 4.2.2 Tipo di carboidrato | 25 |
| 4.2.3 Qualità dei foraggi, raccolta e stoccaggio | 27 |
| 4.2.4 Lavorazione degli alimenti | 27 |
| 4.2.5 Aggiunta di lipidi e acidi grassi | 28 |
| 4.2.6 Riassunto e considerazioni | 29 |
| 4.3 Esperimento sull'alimentazione con diverse combinazioni di legumi | 31 |
| 4.4 Modificatori ruminali: additivi alimentari e controllo biologico | 32 |
| 4.5 Esperimento sulla somministrazione di additivi | 34 |
| 4.6 Tecniche genetiche per aumentare la produttività e ridurre il CH ₄ /ECM | 36 |
| 4.6.1 Selezione genetica per una migliore resa ed efficienza energetica | 37 |
| 4.6.2 Durata del periodo produttivo | 39 |
| 4.6.3 Considerazioni | 40 |
| 4.7 Tecniche gestionali per aumentare la produttività e ridurre il CH ₄ /ECM | 40 |
| 4.7.1 Mitigazione dello stress da caldo | 41 |
| 4.7.2 Gestione della fase di transizione | 42 |
| 4.7.3 Fattori che aumentano la produzione | 42 |
| 4.7.4 Fertilità | 43 |
| 4.7.5 Ridurre il numero delle vacche in asciutta e la quota di rimonta | 44 |
| 4.7.6 Riassunto delle tecniche gestionali | 45 |
| 4.7.7 Considerazioni | 46 |
| 4.8 Potenziale di riduzione delle emissioni globali di CH ₄ | 46 |
| 4.9 Conclusioni e considerazioni | 47 |
| 5 GESTIONE DEGLI EFFLUENTI | 50 |
| 5.1 Introduzione | 50 |

| | |
|--|-----------|
| 5.2 Strategie di alimentazione | 52 |
| 5.2.1 Riduzione della proteina grezza | 52 |
| 5.2.2 Additivi alimentari | 53 |
| 5.3 Stabulazione | 53 |
| 5.3.1 Air scrubbers | 54 |
| 5.3.2 Pulizia frequente della lettiera | 54 |
| 5.4 Trattamento degli effluenti | 55 |
| 5.4.1 Digestione anaerobica..... | 55 |
| 5.4.2 Acidificazione degli effluenti | 56 |
| 5.5 Stoccaggio degli effluenti | 57 |
| 5.6 Spargimento degli effluenti | 58 |
| 5.7 Criteri di scelta delle opzioni di abbattimento | 59 |
| 5.8 Esperimento sull'acidificazione | 60 |
| 5.8.1 Introduzione | 60 |
| 5.8.2 Risultati e discussioni | 61 |
| 5.8.3 Emissioni | 61 |
| 5.8.4 Analisi dei costi | 65 |
| 5.8.5 Conclusioni..... | 66 |
| 5.9 Conclusioni e considerazioni | 66 |
| 6 CONCLUSIONI GENERALI | 67 |
| BIBLIOGRAFIA | 68 |

1 INTRODUZIONE

Le emissioni di gas ad effetto serra, i cosiddetti greenhouse gases (GHG), sono ormai da qualche decennio un problema discusso e trattato a livello mondiale, a causa del notevole impatto che hanno sul clima del nostro pianeta. Tra i gas climalteranti spiccano in particolar modo anidride carbonica, metano e protossido di azoto, tre componenti che influiscono pesantemente sul bilancio negativo che questa categoria di gas ha sul nostro pianeta. Globalmente, le emissioni di gas serra ammontano a 59gt CO₂eq (IPCC 2022) e sono dovute in gran parte alla combustione di energia di origine fossile. Anche i processi industriali e l'agricoltura svolgono un ruolo di particolare rilievo, con quest'ultima che partecipa all'11% dei GHG emessi globalmente (OECD e Food and Agriculture Organization of the United Nations 2022). Il cambio di uso del suolo (per esempio la conversione di foreste o pascoli permanenti in colture annuali) ha anch'esso un contributo significativo che, combinato con quello dell'agricoltura, vale dal 14 al 22% delle emissioni globali di gas serra (Knapp 2014). All'interno della voce agricoltura vi sono vari fattori che contribuiscono, chi più chi meno, a questo 11% e tra questi il comparto zootecnico fa da padrone, complice l'elevata importanza che al suo interno ricoprono i ruminanti con le loro fermentazioni enteriche (che generano, come vedremo, grandi emissioni di metano) e deiezioni. Proprio su questo aspetto vuole focalizzarsi questa tesi, ossia sul grande impatto ambientale dei ruminanti e soprattutto sulle tecniche, collaudate o in via di sperimentazione, che potrebbero permettere di mitigare, almeno in parte, questo fenomeno.

1.1 GHG: cosa sono e quali sono

I gas ad effetto serra sono delle sostanze gassose presenti nell'atmosfera che hanno la particolare proprietà di permettere l'ingresso delle radiazioni solari nell'atmosfera stessa, impedendo però l'uscita delle radiazioni infrarosse da questa, dando luogo quindi a un aumento della temperatura a livello globale e ad escursioni termiche meno intense, dato che il calore assorbito viene ceduto più lentamente verso l'esterno. Le attività umane e in particolar modo l'estrazione e la combustione di energie fossili, la

deforestazione tropicale, l'agricoltura industrializzata e l'estensione della pratica dell'allevamento di bestiame, hanno contribuito ad alterare l'equilibrio generatosi tra i gas presenti a livello atmosferico, andando a liberare composti quali l'anidride carbonica fossile e l'azoto prodotto nelle lavorazioni industriali (ad esempio nella produzione di fertilizzanti) che hanno generato un marcato aumento dell'effetto serra, contribuendo in modo determinante al fenomeno del riscaldamento globale che si è verificato negli ultimi decenni.

1.1.1 H₂O

Il principale gas ad effetto climalterante è il vapore acqueo atmosferico, facente parte del ciclo idrogeologico, che contribuisce all'effetto serra naturalmente presente nel nostro pianeta. Il vapore acqueo ha scambi rapidi con i suoi immensi serbatoi distribuiti sulla superficie terrestre (oceani, ghiacciai e vegetazione) e la sua concentrazione non può essere alterata in modo significativo dai processi antropici. Infatti, la sua concentrazione in atmosfera è controllata dalla dinamica atmosferica e può essere alterata da variazioni climatiche, che generano un cambiamento del suo effetto serra e un'ulteriore perturbazione del clima. Se la retroazione è negativa (cioè se un aumento della forzante della CO₂ porta, attraverso i cambiamenti climatici, ad una diminuzione dell'effetto serra dovuto al vapore acqueo) abbiamo una riduzione degli effetti, se la retroazione è positiva (cioè un aumento della forzante della CO₂ porta ad un aumento dell'effetto serra dovuto al vapore acqueo) la perturbazione introdotta dalla forzante è destinata ad avere effetti crescenti nel tempo con una variazione irreversibile del clima. Un aumento della temperatura dell'atmosfera implica che può essere contenuta nell'aria una maggior quantità di vapore acqueo, e questo suggerirebbe l'esistenza di una retroazione positiva. Tuttavia, maggiori concentrazioni di vapore comportano anche una maggiore formazione di nubi, che causano un aumento della parte riflessa dell'energia solare in ingresso (albedo terrestre) ed un raffreddamento. La determinazione del segno della retroazione dell'acqua è estremamente complessa ed è ancora oggetto di dibattito scientifico (CNR 2007).

1.1.2 CH₄

Il metano è un gas che ha origine da svariate fonti naturali (termiti, zone umide, torbiere, sedimenti oceanici e animali selvatici) e antropiche (produzione di gas naturale, estrazione del carbone, trattamento delle acque reflue, discariche e agricoltura), con queste ultime che pesano per il 58% delle emissioni globali (Knapp 2014). L'agricoltura è la fonte più impattante, responsabile di circa il 25% delle emissioni di derivazione umana (include bestiame, effluenti zootecnici, sprechi alimentari e risaie). Questo gas ha la caratteristica di avere una vita atmosferica molto ridotta se comparata a quella della CO₂ (circa 12 anni) ma al contempo presenta un potere riscaldante molto maggiore, tanto che gli è stato assegnato dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) un Global Warming Potential (GWP) pari a 28-36 CO₂eq (una tonnellata di CH₄ è considerata equivalente a 28-36 tonnellate di CO₂ se si considera il suo impatto nell'arco di 100 anni). A causa del continuo aumento demografico, la domanda di prodotti di origine animale continuerà a crescere negli anni a venire, con un conseguente aumento previsto delle emissioni di metano, che vede nelle fermentazioni enteriche, in particolare dei bovini, una delle sue maggiori fonti. Nel novembre 2021 più di 100 paesi, rappresentanti il 70% dell'economia mondiale, hanno firmato il Global Methane Pledge, assumendo l'obiettivo comune di ridurre le emissioni globali di metano di almeno il 30% entro il 2030 (rispetto ai livelli del 2020). Svariati allevatori in diverse nazioni hanno già intrapreso azioni quali il miglioramento della salute del bestiame e della gestione degli effluenti, l'adozione di nuove tecnologie come la lavorazione dei mangimi per aumentarne la digeribilità e l'uso di integratori alimentari e alghe marine che si pensa possano permettere di raggiungere il target prefissato (OECD e Food and Agriculture Organization of the United Nations 2022).

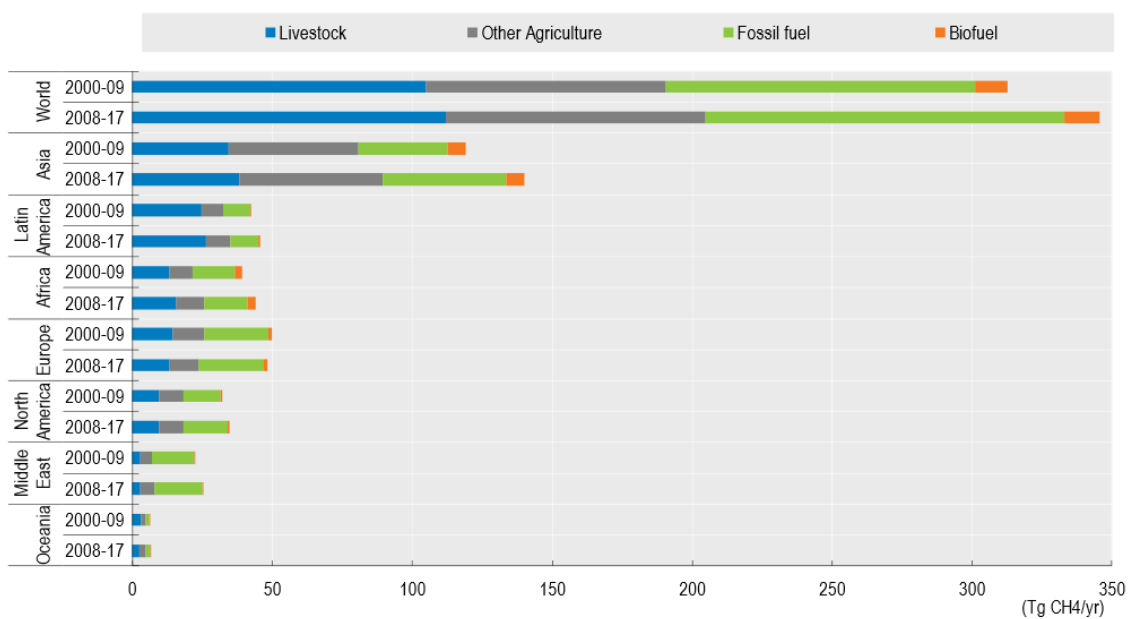


Figura 1. Maggiori fonti di metano nei periodi 2008-2017 e 2000-2009 (OECD e Food and Agriculture Organization of the United Nations 2022).

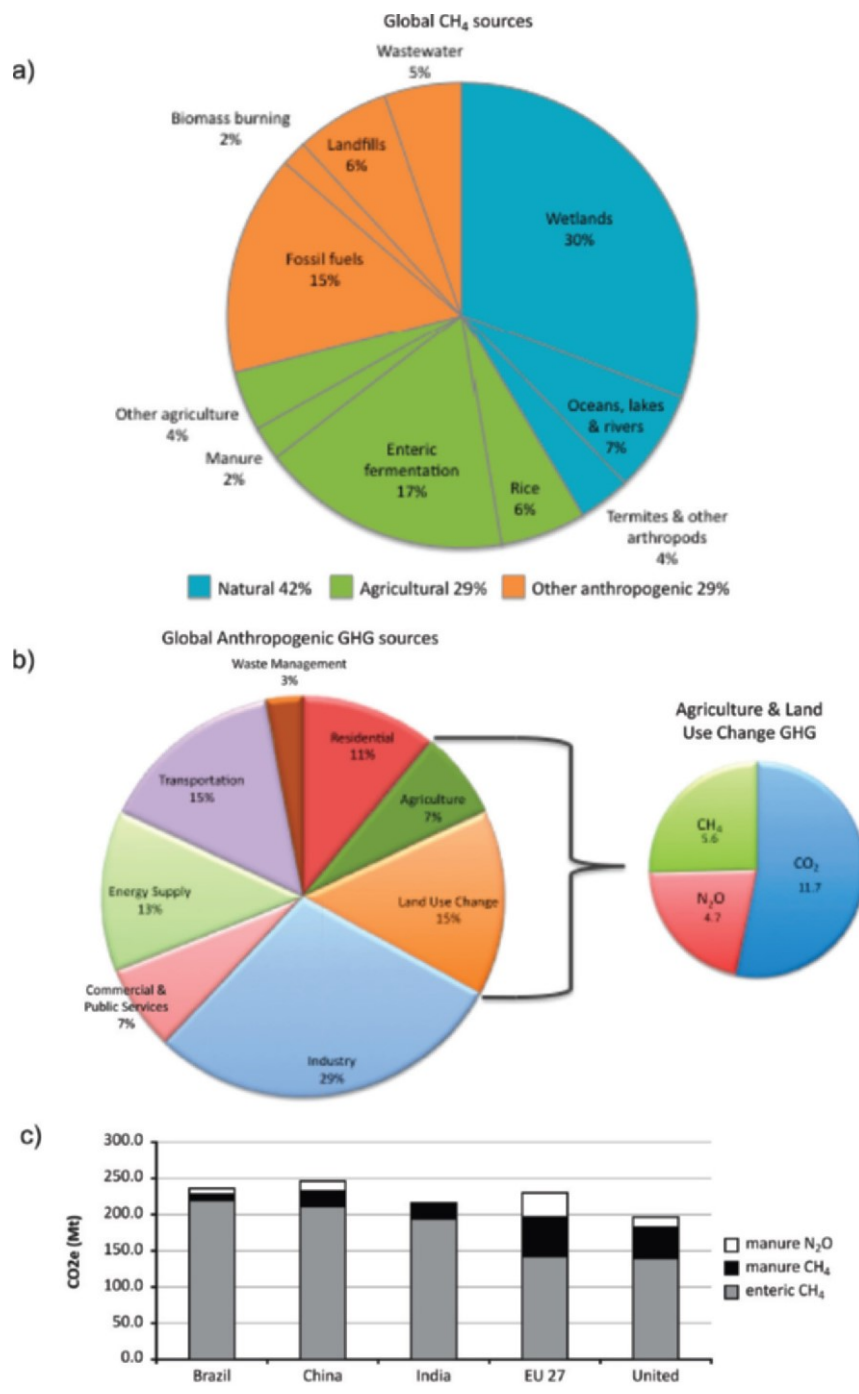


Figura 2. (a) Stima delle proporzioni di emissioni globali di CH₄ da fonti naturali e antropiche. Fonti <1% non sono presenti e includono animali selvatici, incendi boschivi, permafrost e fonti antropiche stazionarie e mobili. Esiste più incertezza nella misura delle emissioni naturali che in quella delle emissioni antropiche. (b) Emissioni globali di GHG per settore, con CH₄ e N₂O in base CO₂eq. L'agricoltura combinata con il cambio di uso del territorio contribuisce al 22% delle emissioni globali di GHG. La deforestazione rilascia il 10,3% della CO₂ totale, mentre l'utilizzo dei combustibili fossili l'1,4%; la CO₂ biogenica non è inclusa. (c) I 5 paesi/regioni con le maggiori emissioni di CH₄ enterico di derivazione animale su base Mt CO₂eq. Negli Stati Uniti, il 95% del metano enterico proviene dai ruminanti; questa proporzione può essere valida anche per altri Paesi, sebbene il contributo dei settori carne e latte possa variare. Il CH₄ proveniente dagli effluenti è emesso da sistemi di stoccaggio dove si verificano fermentazioni anaerobiche. Il CH₄ e l'N₂O generati dagli effluenti possono provenire sia dai ruminanti che dai monogastrici (Knapp 2014).

1.1.3 N₂O

Il protossido di azoto costituisce una piccolissima parte dell'atmosfera, ed è mille volte meno presente della CO₂, ma quasi trecento volte più potente nel trattenere il calore. La maggior parte del protossido di azoto in atmosfera deriva da processi microbiologici. Nei terreni e nelle acque, le maggiori fonti di emissione di N₂O sono i processi di nitrificazione e denitrificazione con quest'ultimo che, inoltre, è il principale responsabile delle emissioni di N₂O in ambienti sotterranei.

1.1.4 CO₂

L'anidride carbonica è responsabile per il 5-20% dell'effetto serra naturale ed interagisce con l'atmosfera per cause naturali e antropiche. I serbatoi naturali della CO₂ sono gli oceani, i sedimenti fossili, la biosfera terrestre, l'atmosfera. Il carbonio, grazie alla fotosintesi delle piante, che combina l'anidride carbonica e l'acqua in presenza dell'energia solare, entra nei composti organici e quindi nella catena alimentare, ritornando infine all'atmosfera attraverso la respirazione. Gli oceani sono sia pozzi che sorgenti della CO₂: questo è possibile per la presenza della Sostanza Organica Disciolta (DOM), che è un miscuglio di Carbonio, Azoto e Fosforo e rappresenta la più grande riserva di carbonio organico reattivo disponibile sul pianeta. L'oceano agisce come pozzo attraverso due diversi processi: il primo (pompa fisica) consiste nel trasporto di grandi quantità di CO₂ verso il fondo nella formazione delle acque profonde, il secondo (pompa biologica) consiste nella diffusione e nel rilascio nelle acque profonde della DOM e del CaCO₃, in modo tale che grandi quantità di CO₂ vengono immagazzinate negli oceani. Di conseguenza, mentre negli strati superficiali la concentrazione della CO₂ è in equilibrio con quella atmosferica, in profondità si registrano livelli che sono 50 volte più alti di quelli atmosferici. Processi di risalita delle acque di fondo, così come una ridotta attività della pompa biologica, possono incrementare la concentrazione di CO₂ in aria (CNR 2007). L'incremento di temperatura dell'acqua diminuisce la solubilità del biossido di carbonio; pertanto, l'aumento della temperatura degli oceani sposta CO₂ dal mare all'atmosfera, mentre una diminuzione fa avvenire il contrario. Gli oceani, assorbendo la CO₂ atmosferica, mantengono bassa la sua concentrazione; se la concentrazione

atmosferica tendesse ad abbassarsi, gli oceani potrebbero liberare anidride carbonica svolgendo un ruolo di equilibratori. Questo bilancio naturale, in assenza di attività antropica, in prima approssimazione, è sempre in pareggio. Esso coinvolge valori di emissioni e assorbimenti maggiori alle emissioni antropiche. Tuttavia, per quanto piccole rispetto al totale, le emissioni antropiche sono sufficienti a squilibrare l'intero sistema. L'anidride carbonica si va così accumulando nell'atmosfera, in quanto i processi di assorbimento da parte dello strato rimescolato dell'oceano non riescono a compensare del tutto il flusso entrante di carbonio. Le emissioni legate all'attività umana sono dovute all'uso di energia fossile, ossia petrolio, carbone e gas naturale, e la restante parte è dovuta a fenomeni di deforestazione e cambiamenti d'uso delle superfici agricole. Per quanto concerne la persistenza media in anni della CO₂ in atmosfera, l'IPCC considera un intervallo compreso tra i 50 e i 200 anni che dipende sostanzialmente dal mezzo di assorbimento.

2 STORICO EMISSIONI

2.1 Emissioni di GHG in Francia

Un gruppo di scienziati francesi, guidati da Josette Garnier, ha ricostruito le emissioni di CO₂, CH₄ e N₂O dell'agricoltura francese tra gli anni 1852 e 2014, delineando poi due vie alternative che influenzerebbero in modo differente il trend di queste emissioni nel prossimo futuro. Gli autori hanno individuato tre macroregioni, con area e clima simile e pratiche agricole omogenee al loro interno:

- 1 - il bacino della Senna, caratterizzato da clima temperato e coltivazione intensiva di cereali.
- 2 - il grande ovest oceanico-temperato, che include la regione della Bretagna e il sottostante bacino della Loira, contraddistinto per i suoi numerosi allevamenti intensivi.
- 3 - il grande sud-ovest che copre il bacino della Garonna, con un clima caldo-temperato, particolarmente favorevole alla coltivazione di mais destinato all'alimentazione animale.

Queste macro-zone hanno presentato valori di emissioni dei vari gas serra spesso molto diversi tra loro, evidenziando come la diversa destinazione agricola di un territorio influenzi pesantemente l'inquinamento del territorio stesso. Nel periodo 2010-2014 infatti, le emissioni del grande ovest sono state doppie rispetto alle altre due macroregioni, con il CH₄ a fare da padrone (59%). L'N₂O ha invece dominato nel bacino della Senna (37%) e il CH₄ nel grande sud-ovest. In base ai dati raccolti, due scenari futuri sono stati ipotizzati:

1 - il primo riflette una visione popolare guidata principalmente dal desiderio di crescita economica, possibile grazie ad un rafforzamento della specializzazione del territorio e al miglioramento dell'agricoltura intensiva, con una progressiva concentrazione della popolazione in grandi città.

2 - il secondo assume invece una radicale sovversione degli schemi attuali, con un forte impulso verso l'agroecologia e l'agricoltura biologica, con l'obiettivo del raggiungimento dell'autonomia da parte degli agricoltori per quanto riguarda input agricoli quali i fertilizzanti azotati e i mangimi e la riduzione della quota di proteina animale nella dieta umana.

Per gran parte delle regioni le emissioni di N₂O hanno mostrato un grande aumento negli anni '70, raggiungendo o superando recentemente i 250 kg N-N₂O km⁻² yr⁻¹, raddoppiando nell'arco del XX secolo. Le emissioni di C-CH₄ sono passate da essere minori di 2000 kg C-CH₄ km⁻² yr⁻¹ nel 1906 a superare i 6000 kg C-CH₄ km⁻² yr⁻¹ nelle regioni specializzate nell'allevamento intensivo.

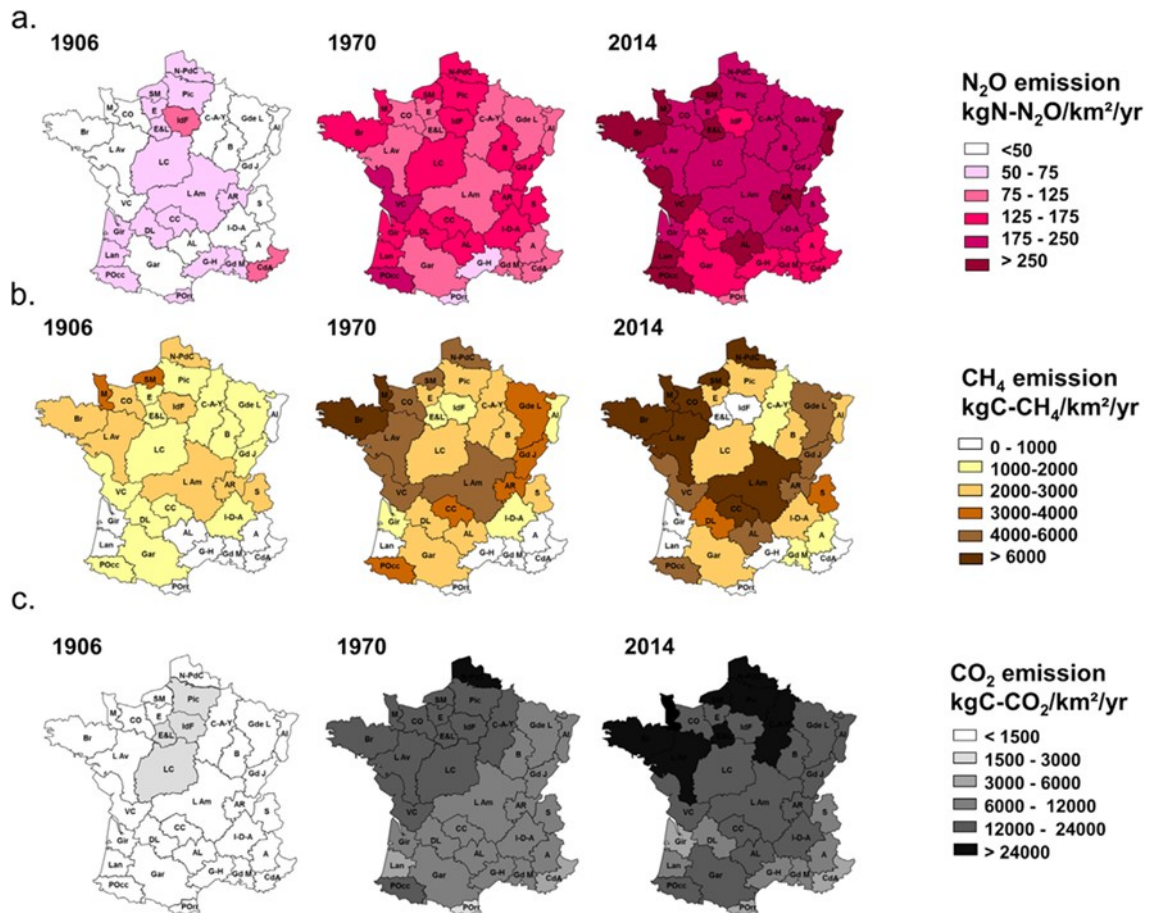


Figura 3. Mappe delle distribuzioni regionali in Francia per tre diverse date (1906, 1970, 2014) rappresentative delle diverse fasi di emissione di GHG per km² di area rurale (terreni coltivati + pascoli + foreste) e per anno: a. N₂O; b. CH₄; c. CO₂ (Garnier et al. 2019).

Nel caso in cui si intraprendesse la strada dello scenario 1, le emissioni di tutti i gas serra incrementerebbero considerevolmente, mentre se si applicassero le linee guida dello scenario 2 si potrebbe tornare ai livelli di emissioni precedenti la pesante industrializzazione avvenuta negli anni '70. Mentre nel primo caso le emissioni totali a livello nazionale aumenterebbero di 1,5 volte, la crescita sarebbe di 1,2 punti per il bacino della Senna e il grande ovest e di 2,5 volte per il grande sud-ovest. Senza fertilizzazione minerale e allevamento estensivo, lo scenario 2 vedrebbe le emissioni ridotte del 50%, riduzioni diversamente ripartite tra le varie macroregioni: -36% per il bacino della Senna, -76% per il grande ovest e -11% per il grande sud ovest.

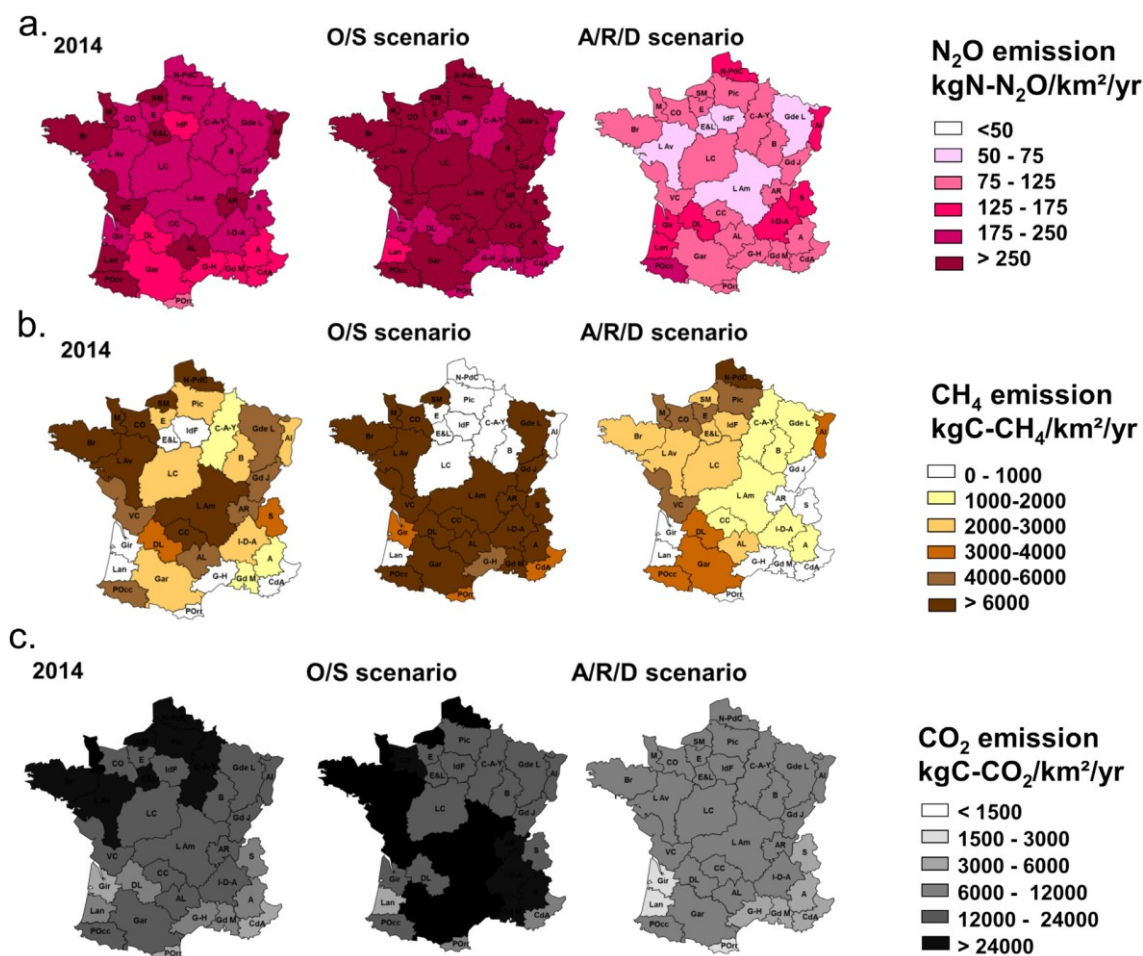


Figura 4. Mappe delle distribuzioni regionali in Francia nel 2014 e per i due scenari prospettati (O/S: specializzazione e A/R/D: autonomia, dieta demitariana) delle emissioni di GHG per km² e per anno: a. N₂O; b. CH₄; c. CO₂ (Garnier et al. 2019).

L'agricoltura in Francia tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo era un'agricoltura su scala familiare, basata sulla forza lavoro dell'uomo. Il numero di fattorie è sceso da 5,5 milioni durante la seconda metà del XIX secolo a 2,3 milioni nel 1955, con un incremento delle dimensioni della singola fattoria. Durante questo periodo, le emissioni di N₂O e CO₂ sono rimaste abbastanza stabili, mentre quelle di CH₄ sono cresciute lentamente, a causa del progressivo aumento della densità del bestiame all'interno di un sistema integrato crops-bestiami. Dopo la Seconda guerra mondiale subentrarono degli input indiretti di energia, complice soprattutto il riorientamento delle fabbriche di materiali bellici e di sostanze chimiche verso la produzione di beni per l'agricoltura (ad esempio la produzione di fertilizzanti mediante il processo Haber-Bosch e l'intensificazione della produzione di trattori e altri macchinari agricoli). Questo diede il via a tre decenni di continua crescita caratterizzate da energia fossile accessibile a basso prezzo e da un

mercato alimentare globale in espansione. Le fattorie francesi diminuirono di un fattore pari a 5 entro il 1980 (ne rimasero circa 1 milione) e intensificarono la loro produzione, diventando dipendenti dalla meccanizzazione, dai fertilizzanti, dai pesticidi e dal mangime importato. Le emissioni di gas serra raggiunsero il loro massimo nei primi anni '90, quando prima la direttiva nitrati (1991), poi la conferenza di Rio (1992) e il protocollo di Kyoto (1997) diedero un freno a questa escalation senza limiti. Dalla metà degli anni '90 ad oggi, infatti, nonostante la continua intensificazione e specializzazione dell'agricoltura, le emissioni di GHG hanno mostrato una stabilizzazione e in alcuni casi una tendenza a diminuire (in particolar modo l' N_2O complice la riduzione dell'uso di fertilizzanti minerali). Il numero di stalle è continuato a diminuire, passando da 664.000 nel 2000 a 452.000 nel 2013, così come sono diminuiti i terreni dedicati all'agricoltura (dal 1993 al 2014 sono stati persi 1,2 milioni di ha). Se si decidesse di perseguire lo scenario 1, le emissioni di ogni singolo gas e di conseguenza le emissioni totali riprenderebbero ad aumentare, mentre optando per lo scenario 2 la quantità totale di prodotti vegetali e animali verrebbe ridotta, ma questa riduzione sarebbe compensata da una riduzione della richiesta dei consumatori legata ai cambiamenti della dieta. Quest'ultimo scenario, tuttavia, pur richiedendo un profondo cambiamento dell'intero sistema dell'agri-food, permetterebbe una riduzione delle emissioni di GHG pari al 50% se comparate al periodo 2010-2014, migliorando oltretutto la qualità delle acque e prevenendo il rischio di eutrofizzazione costiera (Garnier et al. 2019).

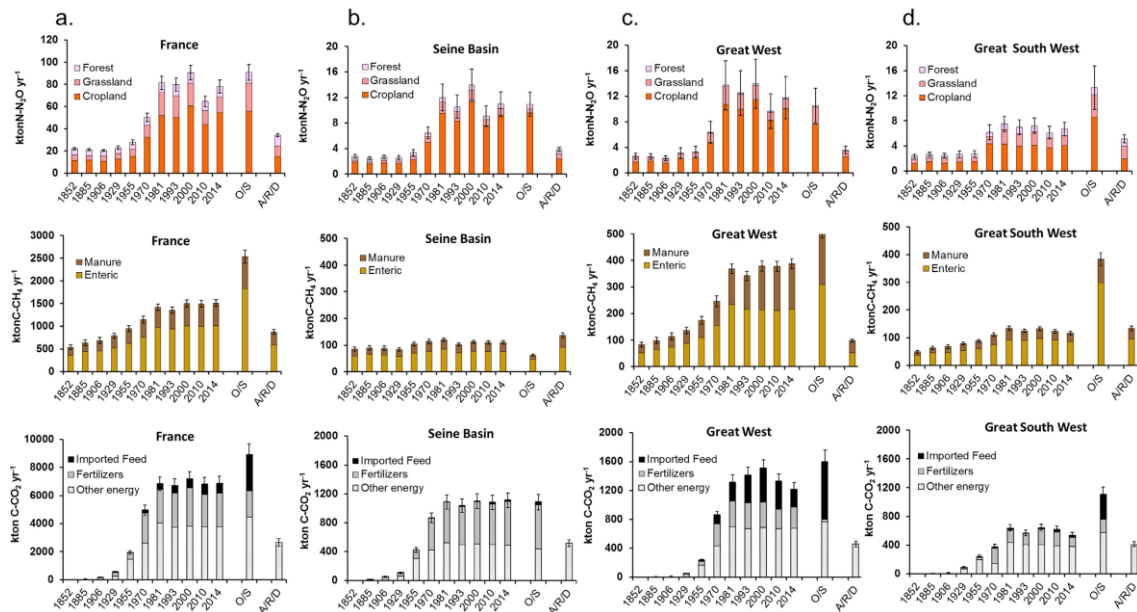


Figura 5. Evoluzione nel lungo termine (1852-2014) delle emissioni medie annuali di N_2O , CH_4 e CO_2 in Francia (a.) e nelle tre macroregioni selezionate (b., c., d.). L' N_2O è espresso secondo le diverse destinazioni d'uso del suolo (foresta, pascolo o terreno coltivato), il CH_4 secondo le emissioni enteriche e quelle provenienti dagli effluenti e la CO_2 come l'energia consumata per il cibo importato, per la produzione di fertilizzanti, per i lavori in campo e l'allevamento del bestiame. Le barre d'errore indicano le incertezze nelle misurazioni ottenute con il metodo Monte Carlo (Garnier et al. 2019).

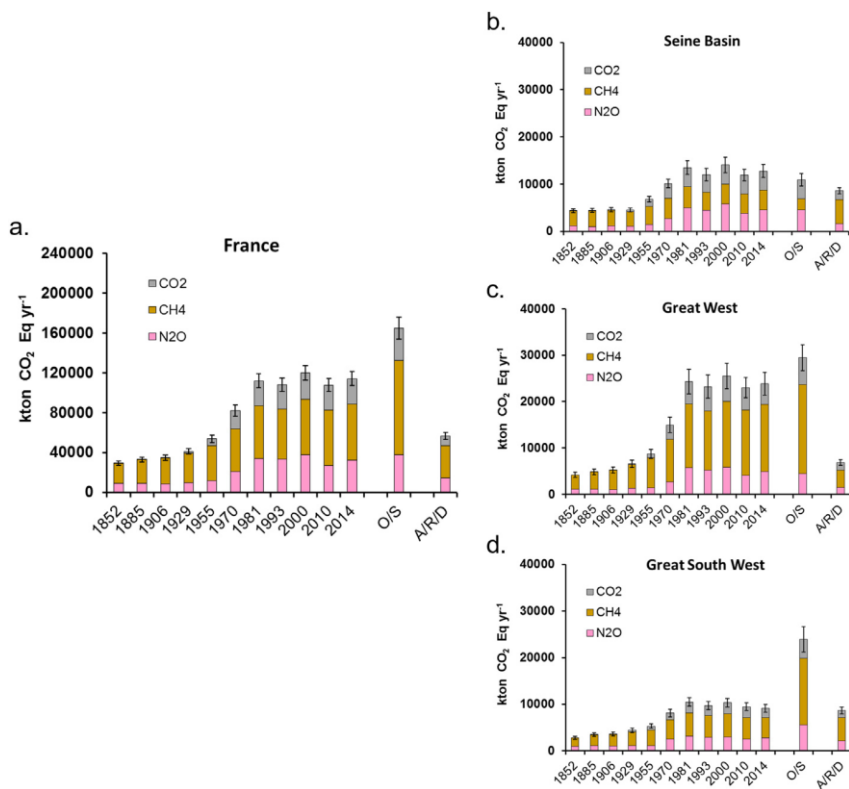


Figura 6. Evoluzione nel lungo termine (1852-2014) delle emissioni medie annuali di N_2O , CH_4 e CO_2 in Francia (a.) e nelle tre macroregioni selezionate (b., c., d.) espresse in CO_2eq . Le barre d'errore indicano le incertezze ottenute nelle misurazioni con il metodo Monte Carlo (Garnier et al. 2019).

2.2 Il parallelo con l'Italia

Sebbene questo studio riguardi la storia ed il territorio francese, vi sono molti parallelismi con quella che è la situazione del nostro paese. Come la Francia infatti, l'Italia può essere scomposta in macroregioni caratterizzate da contesti agricoli differenti: al nord si trova la pianura padana, centro pulsante dell'allevamento intensivo specializzato, da cui hanno origine gran parte dei prodotti di origine animale italiana e fonte della maggior parte dei gas serra provenienti dal settore agricolo (complice anche l'ampio uso di fertilizzanti nelle produzioni cerealicole); al centro-sud invece il comparto zootecnico è molto meno presente (si trovano soprattutto ovini e caprini al pascolo), con le produzioni erbacee a fare da padrone.

Anche il bel paese ha vissuto un'evoluzione del settore agricolo paragonabile a quella del cugino transalpino: le aziende agricole sono passate da oltre 4,2 milioni nel 1961 a circa 2,4 milioni nel 2000 fino ad arrivare a 1,133 milioni nel 2020 (ISTAT 2022). Partendo da un'agricoltura su scala familiare e prettamente basata sulla forza lavoro umana e animale ad inizio Novecento, passando poi per l'introduzione di fertilizzanti, pesticidi e della meccanizzazione nel dopoguerra, fino all'agricoltura biologica e 4.0 degli ultimi anni, la trasformazione del nostro settore primario può considerarsi abbastanza in linea con quella francese. Ad oggi le aziende a conduzione familiare rappresentano ancora la grande maggioranza del totale, ma hanno un impatto sempre minore sulla produzione totale, sostenuta da un piccolo numero di aziende di dimensioni sempre maggiori e sempre più specializzate.

3 RUMINANTI E GAS SERRA

3.1 Fermentazione enterica

I ruminanti sono individuati come la causa principale delle emissioni di gas serra (soprattutto di metano) all'interno del comparto zootecnico ed agricolo e ciò è dovuto principalmente alla presenza del rumine. Insieme agli altri prestomaci, il rumine

permette a questi animali di ingerire sostanze non digeribili dai monogastrici e le trasforma in prodotti edibili per l'uomo. Proprio questo processo genera però una grande quantità di metano, a causa dei microbi che processano il cibo all'interno dei prestomaci. All'interno del rumine si trovano infatti batteri, protozoi, funghi ed Archea, che in questo ambiente anaerobico si sono sviluppati e specializzati, tanto che alcune specie microbiche si sono co-evolute insieme ai loro ospiti e non si trovano in nessun altro ambiente (i metanogeni del rumine sono differenti dai metanogeni presenti in altri ambienti). Ad oggi sono stati individuati tre generi maggiori e tre generi minori di metanogeni appartenenti al dominio degli Archaea, anche se è probabile ne esistano altri. I metanogeni si trovano sia nel rumine che nell'intestino, nonostante la struttura della popolazione, l'ecologia e il metabolismo microbico diverso tra i due scompartimenti.

Nel rumine e nell'intestino caudale, carboidrati semplici e complessi vengono idrolizzati a zuccheri 5C o 6C dall'attività degli enzimi microbici. Gli zuccheri sono poi fermentati in acidi grassi volatili attraverso vie biochimiche a più fasi che producono equivalenti riducenti, tra cui idrogeno metabolico:

glucosio \rightarrow 2 *piruvato* + 4H (metabolismo dei carboidrati);

piruvato + H₂O \rightarrow *acetato* + CO₂ + 2H;

piruvato + 4H \rightarrow *propionato* + H₂O;

2 *acetato* + 4H \rightarrow *butirrato* + 2H₂O.

Le specie batteriche che producono idrogenasi convertono l'idrogeno metabolico in H₂, a sua volta convertito in CH₄ dagli Archea tramite questa reazione combinata:

CO₂ + 8H \rightarrow CH₄ + 2H₂O (metanogenesi).

L'H₂ liberatosi, se non rimosso dai metanogeni, inibisce le vie biochimiche della fermentazione ruminale tramite meccanismi a feedback negativo, riducendo la quantità di carboidrati degradati, il tasso di crescita microbica e la sintesi di proteine microbiche. La bioidrogenazione degli acidi grassi fornisce una fonte alternativa di idrogeno per la

metanogenesi, mentre la degradazione delle proteine assunte con la dieta e la loro assimilazione in proteine microbiche può risultare in un consumo o in una produzione netta di idrogeno. A causa del complesso metabolismo dell' H_2 e dei gruppi metile nel rumine, variazioni nelle pathways che portano alla produzione di acidi grassi volatili (AGV), nella bioidrogenazione, nel metabolismo microbico dell'azoto e nella crescita microbica alterano la produzione totale di metano. Queste variazioni sono funzione della popolazione microbica presente (specie, abbondanza e attività dei microbi) e delle pathways utilizzate, il che complica ulteriormente la predizione delle emissioni di CH_4 e lo sviluppo di strategie di mitigazione (Knapp 2014).

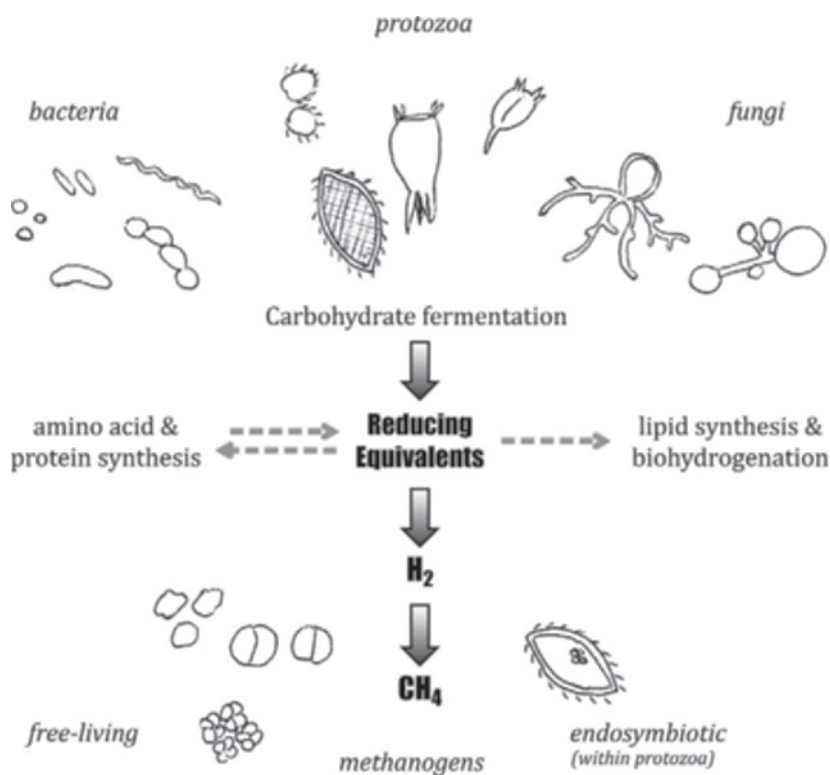


Figura 7. I microrganismi del rumine, che includono batteri, protozoi e funghi, fermentano i carboidrati per ottenere energia e generare quantità significative di riducenti equivalenti ($FADH_2$, $NADH$ e altri) durante il processo, con VFA e H_2 come prodotti finali. I metanogeni, sia quelli liberi nel rumine che gli endosimbionti dei protozoi, convertono l' H_2 in CH_4 . Una piccola quantità di riducenti equivalenti viene utilizzata nella sintesi dei lipidi e nella bioidrogenazione degli acidi grassi. La sintesi degli amminoacidi può sia produrre che consumare riducenti equivalenti, ma il saldo netto è piccolo. La sintesi di proteine consuma riducenti equivalenti. Elevate concentrazioni di H_2 inibiscono la fermentazione dei carboidrati, generando un meccanismo di feedback negativo. Gli organismi non sono disegnati in scala (Knapp 2014).

4 STRATEGIE DI MITIGAZIONE DEL METANO ENTERICO

4.1 Classificazione

Nel corso degli anni sono state studiate diverse strategie nate con l'obbiettivo di ridurre le emissioni di metano, classificabili in tre grandi categorie:

1 - alimenti, gestione degli alimenti e nutrizione: fornire agli animali cibi di buona qualità può accrescere la loro produttività e l'efficienza alimentare. Alcuni alimenti possono aumentare la produzione di propionato o ridurre quella di acetato, diminuendo la quantità di H_2 che verrebbe convertito in CH_4 .

2 - modificatori ruminali: nutrire gli animali con delle specifiche sostanze che, direttamente o indirettamente, inibiscano la metanogenesi o usare il controllo biologico (defaunazione, batteriocine, batteriofagi e immunizzazione) per ridurre i metanogeni.

3 - aumentare la produzione animale attraverso il miglioramento genetico e altre tecniche gestionali: migliorare l'utilizzo di nutrienti a scopi produttivi in modo tale da aumentare l'efficienza alimentare e far decrescere il rapporto CH_4 /unità di prodotto (sia esso carne o latte) (Knapp 2014).

4.2 Alimenti, gestione degli alimenti e nutrizione

La mitigazione della produzione di CH_4 a livello nutrizionale si basa su tre approcci: 1 - la selezione di ingredienti che alterano le vie di produzione degli acidi grassi volatili; 2 - una maggior velocità di transito nel rumine, che va a modificarne la popolazione microbica e la produzione di VFA, spostando parte della digestione nell'intestino; 3 - offrire diete di qualità maggiore per aumentare la produzione di latte per ogni capo, spalmando così i costi del CH_4 associato al fabbisogno energetico di mantenimento.

I diversi alimenti della dieta forniscono il substrato per la fermentazione microbica e le differenze nella loro digeribilità e composizione chimica alterano la quantità di energia

estratta dai microbi stessi e le vie metaboliche che portano alla produzione dei VFA e del metano. Le proporzioni dei diversi VFA influenzano la quantità di metano prodotta, poiché la formazione di propionato consuma equivalenti riducenti mentre la produzione di acetato e butirato genera H_2 per la metanogenesi. La degradazione delle proteine nel rumine e la loro assimilazione in proteine microbiche possono risultare sia in una produzione che in un consumo netto di H_2 . La bioidrogenazione degli acidi grassi comporta invece una produzione netta di H_2 . Di conseguenza, la variazione del metabolismo dell'azoto ruminale e la bioidrogenazione causano alterazioni nella produzione di CH_4 e, dato che i substrati ricchi di carboidrati e di proteine servono anche per il mantenimento e la crescita microbica, spesso le predizioni sui pattern dei VFA e della formazione di CH_4 non coincidono con le osservazioni fatte in vitro o in vivo.

Anche la velocità di transito influenza la durata della digestione e la formazione dei diversi VFA oltre che i tassi di crescita microbica. Un attraversamento più veloce del rumine da parte del cibo comporta una minor fermentazione ruminale e una produzione minore di CH_4 per unità di alimento ingerita, a seconda che i nutrienti vengano digeriti nell'intestino tenue (zuccheri e amido) o fermentati nell'intestino crasso (pectine, glucani e NDF). La maggior velocità di transito comporta anche una maggior richiesta di energia microbica per accelerare la divisione e mantenere costante la popolazione ruminale. Diete di maggior qualità (a più alto contenuto calorico o più digeribili) apportano una proporzione più alta di energia destinata alla produzione rispetto all'energia lorda ingerita (GEI) e spalmano i costi di mantenimento in modo migliore delle diete meno efficienti. Diete più energetiche di solito hanno un contenuto di amido più alto rispetto all'NDF e di conseguenza le emissioni di CH_4 sono minori, dato che la digestione di un'unità di amido produce minori quantità di metano rispetto ad un'unità di NDF (Moe e Tyrrell 1979). Queste diete possono anche aumentare l'ingestione di energia netta e, se questo surplus viene destinato nel latte, diminuire la produzione di CH_4 /ECM (energy corrected milk). Queste alterazioni nella digeribilità, nelle proporzioni di VFA prodotti e nella crescita microbica influenzano la disponibilità di energia e proteina per la vacca e dunque l'efficienza con la quale i nutrienti sono usati per la crescita e la sintesi di latte. Sulla base di questi tre principi, le emissioni di CH_4 variano a

seconda del livello di ingestione, del tipo di carboidrato ingerito, della qualità, della specie di foraggio e della sua conservazione, del tipo di processo fisico innescato e della frequenza di alimentazione (Knapp 2014).

È importante comunque tenere sempre a mente che il rumine dei bovini per funzionare correttamente ha bisogno di essere adeguatamente sollecitato; la somministrazione di diete troppo ricche di concentrati genera squilibri nel rumine, che devia dalle sue condizioni ottimali. L'assunzione di fibra lunga aiuta infatti la masticazione e la produzione di acido acetico e di saliva, che funge da sostanza tampone, mantenendo il pH intorno a 6,5, mentre l'aumento della produzione di acido propionico derivante dalla fermentazione dei concentrati può portare il pH a valori inferiori a 5,5 (acidosi) e quindi al blocco delle fermentazioni ruminali. L'acidosi, oltre a rovinare il rumine e il processo digestivo, può causare gonfiore, infiammazioni e problemi podali, che possono spesso portare all'abbattimento dell'animale.

4.2.1 Livello di ingestione, digeribilità e velocità di transito

La produzione totale di CH₄ (g o Mcal/d) aumenta all'aumentare del DMI, poiché c'è più cibo da fermentare; tuttavia, il rapporto CH₄/GEI (g CH₄/kg GEI) tendenzialmente decresce a causa della minor degradazione ruminale e del transito più veloce degli alimenti (Moe e Tyrrell 1979). Anche l'aumento del rapporto NFC (carboidrati non fibrosi)/NDF genera un flusso maggiore di alimento che bypassa il rumine, contribuendo alla diminuzione generale delle fermentazioni ruminali (Huhtanen, Rinne, e Nousiainen 2009). Nell'alimentazione delle vacche da latte, la gran parte della diminuzione della digeribilità osservata all'aumentare del livello di ingestione è dovuta a una diminuzione della digestione dell'NDF e non dell'amido, con quest'ultima che si sposta dal rumine (dove verrebbe fermentata) all'intestino tenue. La digestione intestinale dell'amido dovrebbe essere più favorevole energeticamente per l'animale rispetto alla fermentazione ruminale con produzione di VFA. Con una digeribilità ruminale minore dell'NDF, questo oltrepassa il rumine, dove può essere in parte fermentato nell'intestino crasso, producendo CH₄. Nonostante la diminuzione della digeribilità totale dell'NDF all'aumentare dell'ingestione sia minore rispetto a quella dell'amido, se si considera la

produzione di CH₄ l'impatto dell'NDF è previsto essere superiore poiché la fermentazione delle emicellulose e della cellulosa produce dalle 2 alle 5 volte più metano rispetto alla fermentazione dei carboidrati non fibrosi (Moe e Tyrrell 1979). All'aumentare dell'ingestione, dunque, l'entità della diminuzione della produzione di metano dipenderà dalle proporzioni di amido e NDF nella dieta e dalle proporzioni di cellulosa ed emicellulosa nei foraggi.

Le relazioni tra digeribilità, velocità di passaggio e DMI sono complesse e hanno un grande impatto sulla produzione ruminale di CH₄. Sia il tasso che la durata della digestione dei carboidrati determinano la quantità di CH₄ prodotto e l'energia disponibile per la produzione del latte (Knapp 2014).

4.2.2 Tipo di carboidrato

Maggiori DMI con maggior produzione di latte e minori emissioni di metano sono spesso raggiunte nutrendo le vacche con carboidrati più digeribili. La proporzione dei prodotti finali della fermentazione ruminale, specialmente dei VFA, è influenzata dal rapporto tra NDF e NFC nella razione: diete a base di foraggi alte in cellulosa, emicellulosa e lignina favoriscono la produzione di acetato e butirato (quest'ultimo stimolato in particolare dagli zuccheri solubili), mentre diete in prevalenza amidacee favoriscono la produzione di propionato (Moe e Tyrrell 1979). La fibra al detergente neutro ha composizione chimica e digeribilità eterogenee, con un ampio range di produzione di CH₄. La fermentazione di sottoprodotti provenienti dai birrifici e dai distillatori, contenenti fibra di facile degradazione, ha generato una produzione incredibilmente bassa di metano, circa 1/3 - 1/2 di quella generata da alimenti usati solitamente e di comparabile digeribilità (Johnson e Johnson 1995). Questi sottoprodotti, infatti, hanno un rapporto emicellulosa:cellulosa molto più alto rispetto a erbe e legumi (rispettivamente 1,5-1,6:1 contro 0,67:1 e 0,35:1) e confermano l'equazione di Moe e Tyrrell ($CH_4 \text{ (g/d)} = 33,0 + 104,6 \times \text{cellulosa digerita (kg/d)} + 38,5 \times \text{emicellulosa digerita (kg/d)} + 20,5 \times \text{residui solubili al detergente neutro digeriti (kg/d)}$, 1979), secondo la quale l'emicellulosa digerita produce solo il 37% del metano emesso dalla cellulosa digerita.

Diete con alti contenuti di amido basate su granelle di cereali stimolano la crescita e l'attività metabolica dei microbi che producono propionato. Poiché la formazione di propionato consuma equivalenti riducenti, favorirne la produzione significa ridurre la quantità di H_2 disponibile per la metanogenesi nel rumine. Quando la concentrazione dei NFC aumenta, il pH ruminale si abbassa, inibendo la crescita dei metanogeni e dei protozoi ciliati ma allo stesso tempo riducendo la digeribilità dell'NDF. Generalmente, ridurre il rapporto NDF:NFC significa ridurre la percentuale di GEI persa come CH_4 (Beauchemin et al. 2008). Se maggiori quantità di concentrati aumentano il GEI e l'ADG, anche se il rapporto CH_4 /GEI resta inalterato, serviranno meno giorni per raggiungere il peso target e dunque meno CH_4 verrà emesso durante il ciclo vitale degli animali da carne. Nel caso delle vacche da latte, invece, questo discorso perde la sua importanza dato che le razze da latte sono più precoci di quelle da carne e che più che al raggiungimento di un peso forma si punta al picco e alla costanza di produzione. Il rumine delle vacche da latte, inoltre, è più sensibile alle variazioni del pH e un aumento eccessivo del rapporto concentrati:foraggi può avere ripercussioni negative maggiori. Un maggior quantitativo di propionato, inoltre, diminuisce la quantità di grasso presente nel latte e ne modifica il profilo.

La differenza nella quantità di CH_4 prodotto per unità di amido, di cellulosa e di emicellulosa non dipende dalla loro composizione chimica (amido e cellulosa sono entrambi polimeri del glucosio che vengono idrolizzati in glucosio prima di essere fermentati, a differenza dell'emicellulosa che, essendo formata da zuccheri 5C e 6C, segue dei pattern di formazione dei VFA diversi) ma sembra basarsi sulle diverse specie microbiche che degradano e fermentano la maggior parte di ogni substrato. Dato che le specie microbiche si adattano ai cambiamenti della dieta e delle condizioni ruminali, le vie metaboliche di produzione dei VFA e del CH_4 cambieranno in base a questi due fattori. Migliorare le nostre conoscenze sulle interrelazioni tra la disponibilità dei substrati e il mantenimento e la crescita della popolazione microbica che dirige le fermentazioni ruminali porterà a migliori predizioni sulla generazione di CH_4 e darà l'opportunità di manipolare le fermentazioni stesse, riducendo la produzione totale di metano. Il fatto che la produzione di CH_4 sia influenzata da fattori associativi tra i diversi

ingredienti che compongono la dieta implica che il quantitativo di CH₄ emesso può essere predetto solamente per l'intera razione e non per i singoli alimenti (Knapp 2014).

4.2.3 Qualità dei foraggi, raccolta e stoccaggio

Aumentare la qualità degli alimenti è uno dei punti cardine per aumentare l'efficienza alimentare e la produttività degli animali, diminuendo allo stesso tempo la produzione di metano per unità di prodotto. La qualità dei foraggi può essere migliorata raccogliendo o pascolando foraggi meno maturi, selezionando ceppi genetici o specie con una maggior digeribilità e attuando una corretta conservazione per mantenere nel tempo i nutrienti digeribili, migliorarne l'utilizzazione nella dieta e aumentare l'efficienza alimentare (l'insilamento è una tecnica di conservazione particolarmente adatta a questi fini). In genere, foraggi di qualità maggiore contengono quantità maggiori di carboidrati non strutturali (NSC) rispetto all'NDF oppure contengono NDF meno lignificato (Knapp 2014). Ci sono tre motivi per cui la somministrazione di insilati di cereali rispetto a insilati di erba o a foraggi essiccati può ridurre le emissioni di CH₄. In primo luogo, l'amido che contengono favorisce la produzione di propionato rispetto a quella di acetato nel rumine. Secondo, se aumenta il tasso di ingestione, questi cereali trascorrono ancor meno tempo nel rumine, promuovendo dunque la digestione post-ruminale. Terzo, quando gli insilati di mais rimpiazzano quelli di erba, l'aumento dell'ingestione volontaria combinato con l'aumento della digestione post-ruminale (più efficiente rispetto a quella ruminale) migliora le performance dell'animale, abbassando allo stesso tempo le emissioni di CH₄ per unità di prodotto (Beauchemin et al. 2008). Si è provato ad aggiungere diversi additivi e inoculanti agli insilati, con scarsi risultati nella limitazione della produzione di metano (Knapp 2014).

4.2.4 Lavorazione degli alimenti

La lavorazione degli alimenti riduce le dimensioni (in particolare la lunghezza) degli alimenti stessi e ne altera i tassi di fermentazione e di transito. Le particelle troppo piccole, infatti, possono by-passare il rumine senza essere fermentate. La macinazione, la tritatura o il pellettamento dei foraggi riducono la digeribilità ruminale dell'NDF riducendo le emissioni di CH₄ (a causa della maggiore velocità di transito) anche del 20-

40% per unità di sostanza secca, ma solo in caso di alti livelli di ingestione (per bassi livelli di ingestione la riduzione delle emissioni è molto più marginale) (Johnson e Johnson 1995). Il problema maggiore di questi processi è legato al loro costo che, specialmente nel caso della produzione del pellet, potrebbe non giustificare la riduzione nell'emissione di CH₄, senza contare le emissioni di GHG legate al processo di produzione stesso. La tritatura troppo fine dei foraggi si è dimostrata sconsigliata economicamente a causa della grande incidenza dell'acidosi (associata alla carenza di NDF efficiente) e della minor concentrazione di grasso nel latte. La macinazione, la fiocatura e la rullatura della granella potrebbero aumentare la fermentazione ruminale e diminuirne la quantità che by-passa il ruminante. Trattamenti termici quali la pellettatura, la fiocatura, l'estrusione e la tostatura possono cambiare i tassi di degradazione delle proteine e dei carboidrati, abbassando il rapporto acetato:propionato, ma la relazione con le emissioni di metano dipende sia dall'alimento sia dalla composizione generale della dieta e dall'ingestione.

Lavorazioni che aumentano la digeribilità della DM riducono il CH₄/ECM aumentando l'energia disponibile per scopi produttivi e spalmando maggiormente il CH₄ emesso per il mantenimento dell'animale. Al contrario, lavorazioni che diminuiscono la digeribilità non sono desiderabili, poiché servirebbe una maggior ingestione di sostanza secca per ottenere gli stessi quantitativi di latte (Knapp 2014).

4.2.5 Aggiunta di lipidi e acidi grassi

Partendo dal presupposto che si raccomanda di non superare il 6-7% di lipidi nella dieta (oltre questi livelli si rischia una diminuzione dell'ingestione), si stima si possano raggiungere riduzioni delle emissioni di CH₄ del 10-25%. L'aggiunta di lipidi alla dieta riduce le emissioni di CH₄ a causa della diminuzione della fermentazione della sostanza organica, dell'attività dei metanogeni e dei protozoi e, nel caso di lipidi ricchi di acidi grassi insaturi, tramite l'idrogenazione degli acidi grassi. (Johnson and Johnson 1995). L'efficacia dell'aggiunta dei lipidi alla dieta nella riduzione delle emissioni di metano dipende da vari fattori: la quantità di ingestione, la fonte dei lipidi, il profilo degli acidi grassi, la forma in cui gli acidi grassi sono somministrati e il tipo di dieta. Tramite una

metanalisi condotta usando 33 diversi trattamenti si è potuto dimostrare come ogni addizione di un 1% di grasso nella dieta possa comportare una diminuzione delle emissioni di CH₄ (g/kg DMI) del 5,6% (Beauchemin et al. 2008).

Tipicamente, le razioni delle vacche da latte contengono dal 4 al 5% di EE, che crescono fino al 5-7% DM con l'integrazione dei lipidi (le attuali raccomandazioni consigliano di non superare il 6-7% DM di EE). Con una diminuzione del rapporto CH₄ enterico/ECM pari a 0,71-1,21 g/kg per ogni punto percentuale di EE presenti nella razione ed emissioni tipiche di CH₄ che si aggirano sui 5-25 g/kg ECM, un incremento del 2% degli EE nella razione dovrebbe ridurre le emissioni di CH₄ approssimativamente del 10% (National Research Council (U.S.) 2001). Gli effetti dell'integrazione di lipidi sul latte e sui suoi componenti sono variabili e dipendono dalla composizione dei nutrienti della dieta di base, dalla composizione dei FA dei lipidi endogeni e integrati e dallo stadio di lattazione oltre che dalla quantità di lipidi somministrati (Knapp 2014).

Gli effetti dell'integrazione dei lipidi nella produzione di CH₄ e degli altri GHG dovrebbero essere valutati a livello complessivo dell'intera azienda agricola; se infatti i lipidi diminuiscono la digeribilità della fibra, più CH₄ potrebbe essere emesso dagli effluenti durante le fasi di stoccaggio e fermentazione, aspetto che verrà analizzato successivamente.

4.2.6 Riassunto e considerazioni

Molte delle strategie di mitigazione delle emissioni di metano enterico sono orientate verso un aumento del rapporto propionato:acetato proveniente dalla fermentazione. Sebbene l'aumento del valore di questo indice sia favorevole alla riduzione delle emissioni, allo stesso tempo sfavorisce l'attitudine della razione alla produzione di latte, fattore che mal si colloca in un contesto di aumento costante della domanda di prodotti lattiero-caseari. Il potenziale per ridurre il rapporto CH₄/ECM attraverso la nutrizione e la gestione dell'alimentazione è modesto e potrebbe essere espresso soprattutto tramite approcci che migliorino l'efficienza alimentare. La somministrazione di carboidrati non strutturali o amilacei, di foraggi di alta qualità ad alti livelli di ingestione o l'ottimizzazione della lavorazione dei foraggi stessi può ridurre le emissioni di CH₄

enterico/ECM del 5-15%. Alcuni approcci hanno invece comportato una riduzione del DMI con una conseguente riduzione sia delle emissioni di CH₄ che di produzione di ECM, con il loro rapporto (CH₄/ECM) che è rimasto inalterato o è addirittura aumentato (alcune diete troppo abbondanti in concentrati che hanno abbassato il pH del rumine sotto il livello critico di 5,5 o alcuni integratori di lipidi). Altre tecniche potrebbero condurre ad altri effetti indesiderati quali una minor efficienza alimentare o ascessi epatici. A causa della grande abilità dei microbi ruminali di adattarsi alle variazioni delle condizioni del rumine, ci si aspetta che le risposte a differenti approcci nutrizionali saranno tutt'altro che additive. (Knapp 2014).

Le tecniche nutrizionali che si basano sulla concentrazione delle diete possono rivelarsi strategie vincenti specialmente nel caso dei bovini da carne, ma dovrebbero essere sottolineati in maniera più evidente gli aspetti negativi di queste tecniche; tutti gli studi analizzati si sono soffermati principalmente sulla riduzione delle emissioni di CH₄ e sull'incremento di produzione, ma hanno trattato in maniera poco approfondita le ripercussioni che un aumento del rapporto concentrati:foraggi può causare a livello ruminale. Il rumine ha bisogno di un certo quantitativo di fibra lunga per lavorare correttamente e somministrare grandi quantità di fibra corta può provocare acidosi, che a sua volta può portare a vari altri disturbi (probabilmente la gran parte degli esperimenti svolti hanno avuto durate troppo limitate perché si riscontrassero questi problemi in modo chiaro e visibile).

Non secondario, la concentrazione delle diete si cala all'interno di un contesto di allevamento intensivo, in cui la razione è preparata nei minimi dettagli e si raggiungono i picchi più alti di produzione. Questo è un discorso valido per le zone più industrializzate ed evolute, ma nei paesi in via di sviluppo ci troviamo molto spesso in contesti molto diversi: grandi pascoli in cui la razione è poco o per nulla controllata e in cui i livelli produttivi sono molto più bassi. Da questo punto di vista sarebbe interessante studiare e sviluppare dei metodi per incrementare la produttività degli animali di questi territori, tramite la somministrazione di foraggi con valori nutrizionali più alti e che permettano di contenere, per quanto possibile, le emissioni di CH₄.

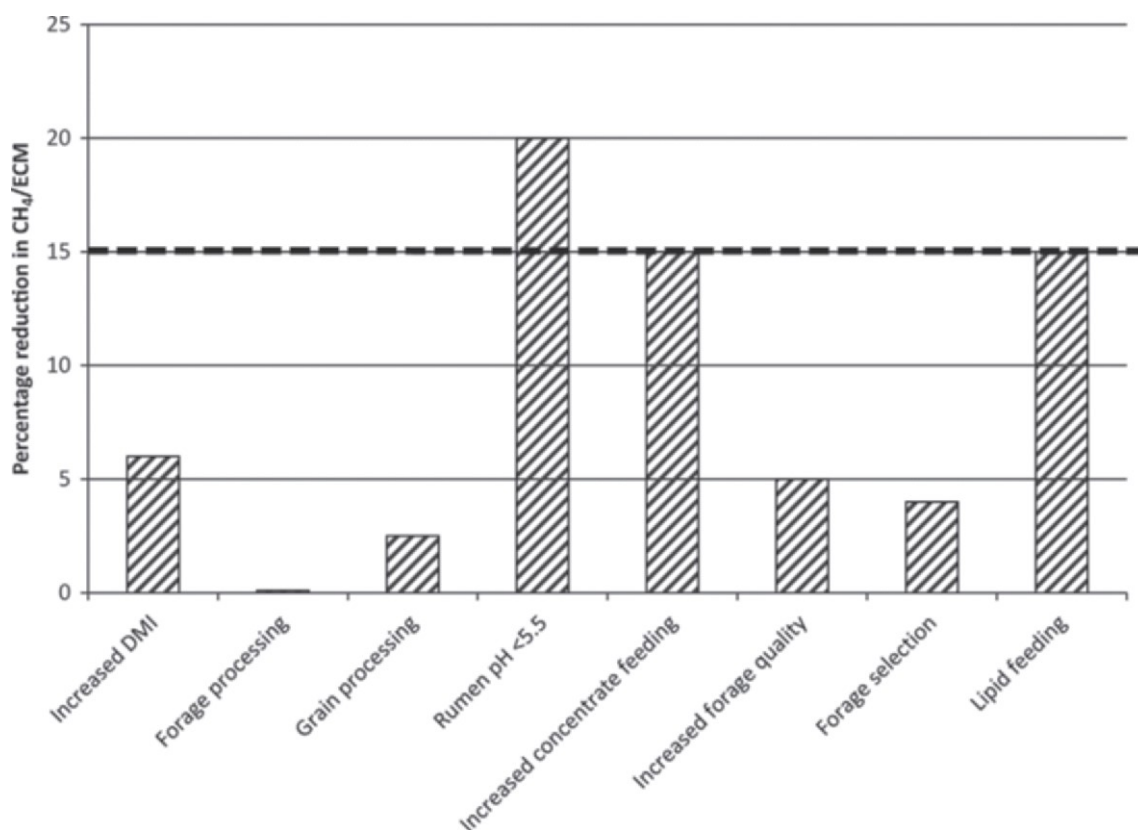


Figura 8. Gli approcci che si basano sull'alimentazione e la nutrizione sono in gran parte non additivi e possono ridurre le emissioni di CH₄ enterico per unità di ECM (CH₄/ECM) al massimo del 15% o approssimativamente di 2,25g CH₄/kg ECM (Knapp 2014).

4.3 Esperimento sull'alimentazione con diverse combinazioni di legumi

Nonostante gli studi e le ricerche sull'alimentazione e la nutrizione dei bovini spesso si concentrino sui sistemi intensivi, in cui vengono somministrate grandi quantità di concentrati ed è quindi possibile attingere ad una fonte molto ampia di alimenti e sostanze nutritive, è importante ricordare che in molti paesi, specie in quelli in via di sviluppo, l'allevamento bovino si basa ancora molto spesso sul pascolo; studi che approfondiscono la possibilità di variare l'alimentazione degli animali in sistemi estensivi possono dunque risultare molto interessanti in un'ottica globale di aumento della produzione e soprattutto di diminuzione delle emissioni, dato che sono proprio i bovini al pascolo gli animali meno controllati e studiati da questo punto di vista e su cui è potenzialmente possibile ottenere un ampio miglioramento. Da questo punto di vista, lo studio condotto da Sebastian Lagrange e altri scienziati della Utah State University

risulta molto interessante (Lagrange et al. 2020). Questo gruppo di ricercatori, nel biennio 2016-2017, ha studiato l'effetto di diverse combinazioni di legumi quali ginestrino (*Lotus Corniculatus*), lupinella (*Onobrychis viciifolia Scop.*) ed erba medica (*Medicago sativa L.*) sulla performance delle manze, sulle emissioni di metano e sul bilancio dell'azoto. Le proantocianidine (CT) prodotte dal ginestrino, l'elevata digeribilità della sua fibra e l'alta concentrazione di carboidrati non fibrosi accresce l'efficienza d'uso delle proteine da parte dei ruminanti rispetto ad altri legumi (anche la lupinella contiene proantocianidine con una concentrazione di 3,5 volte superiore). Inoltre, i tannini condensati possono anche sopprimere i batteri metanogeni presenti nel rumine e inibire la digestione della fibra, riducendo la produzione di metano enterico. Le emissioni di metano riportate in questo studio sono infatti risultate essere molto minori di quelle tipicamente misurate in diete a base di graminacee con la tecnica del tracer gas SF₆ (36-37 g/kg DMI) e comparabili con quelle osservate in sistemi basati sull'alimentazione con concentrati (22-24,6 g/kg DMI). Non sono state osservate tuttavia differenze tra i vari trattamenti nelle emissioni di CH₄ emesso giornalmente (g/d), per unità d'ingestione (g/kg DMIR) o per unità di incremento corporeo. (Lagrange et al. 2020).

4.4 Modificatori ruminali: additivi alimentari e controllo biologico

Esiste un'ampia varietà di integratori che posso essere somministrati per ridurre la produzione enterica di CH₄, come inibitori chimici, acidi organici e prodotti vegetali secondari. Le loro modalità d'azione sono varie e dipendono dallo specifico additivo: si può trattare di un'inibizione diretta dei metanogeni o della metanogenesi, di una soppressione dei protozoi ciliati o di una stimolazione di pathway competitive per lo smaltimento dell'H₂. In vitro, molti additivi e inibitori hanno soppresso la metanogenesi dal 60 fino al 100% ma, in vivo, la riduzione delle emissioni di CH₄ è stata minima o temporanea (< 30 d). A causa dell'incredibile diversità della popolazione ruminale infatti, è molto probabile che i gruppi di microrganismi soppressi da certi trattamenti vengano rimpiazzati da altri gruppi che riempiranno il buco lasciato dai primi. In più, se la metanogenesi viene ridotta o eliminata del tutto, deve esistere un'altra via per l'utilizzo

dell'idrogeno, altrimenti la sua concentrazione nel ruminale potrebbe aumentare a dismisura fino a inibire la fermentazione (Weimer 1998). Idealmente, questo idrogeno dovrebbe portare alla produzione di un composto assorbibile e metabolizzabile dall'animale, in modo che la sua energia non venga dispersa. Ad oggi, nessun additivo alimentare ha dimostrato una sostanziale riduzione delle emissioni di CH₄ senza influenzare negativamente la produzione di latte a parte l'uso di nitrato come accettore alternativo di elettroni, che tuttavia è tossico sopra una certa soglia (tabella 1).

Lieviti quali *Saccharomyces cerevisiae* sono sempre più usati nelle diete dei ruminanti per migliorare il DMI e le performance (crescita del 3-4% delle resa in latte e aumenti di peso). Numerosi prodotti commerciali sono disponibili e, poiché si trovano sul mercato a prezzi facilmente accessibili, la comparsa di prodotti a base di lieviti che riducono le emissioni di metano potrebbe essere accettata benevolmente dagli allevatori; tuttavia, le aziende produttrici sono riluttanti nell'effettuare investimenti in questi prodotti perché il loro driver primario è l'aumento della performance, piuttosto che l'abbattimento delle emissioni di CH₄.

Gli additivi enzimatici usati ad oggi nelle diete dei ruminanti contengono enzimi fibro-digerenti quali cellulasi ed emicellulasi. Studi preliminari suggeriscono che, se correttamente formulati, potrebbe essere possibile sviluppare additivi enzimatici in grado di ridurre le emissioni di CH₄. Gli enzimi che migliorano la degradazione delle fibre tipicamente abbassano il rapporto acetato:propionato all'interno del fluido ruminale, fattore che è considerato come la causa principale della riduzione delle emissioni di CH₄ (Beauchemin et al. 2008).

Allo stato attuale, per la riduzione delle emissioni di CH₄ enterico, esistono opportunità maggiori nel campo della nutrizione, del feeding management, nella selezione genetica e nel miglioramento delle condizioni sanitarie e della produttività della mandria piuttosto che nell'uso di additivi alimentari impiegati come modificatori del ruminale. Tuttavia, la ricerca e lo sviluppo di nuovi rumen modifiers potrà aiutarci a capire meglio

le interazioni microbiche ruminali e ad aumentare le nostre conoscenze sulle funzioni del rumine (Knapp 2014).

| Approach/compound | CH ₄ reduction relative to control | Transient or sustained effect (>30 d) ² | Animal toxicity | References | Comments |
|--|---|--|--|---|--|
| Monensin | 4 to 10% | Sustained in one study; transient in the rest of the studies | None at recommended feeding levels | Callaway et al. (2003); Guan et al. (2006); Odongo et al. (2007a); Beauchemin et al. (2008) | CH ₄ reductions achieved at feeding levels of 24 to 35 mg/kg (above feeding levels currently approved in the United States) |
| Monensin controlled-release capsules | 0% | No effect | None | Moate et al. (1997); Grainger et al. (2008a); Waghorn et al. (2008) | One study was short-term (<14 d); the others were long-term (11 and ~29 wk) |
| Halogenated CH ₄ analogs | 80 to 100% | Sustained in 1 study; transient in the rest of the studies | Yes | McCrabb et al. (1997); Moss et al. (2000); Boadi et al. (2004); McAllister and Newbold (2008) | Reduced feed intake in beef cattle with improved feed efficiency |
| 9,10-Anthraquinone Dicarboxylic acids | 50% 50 to 75% in 1 study; 0% in others | Transient | Tissue residues Possible sodium toxicity if sodium salt is used | Kung et al. (2003) Moss et al. (2000); Boadi et al. (2004); McGinn et al. (2004b); Mohammed et al. (2004b); Beauchemin and McGinn (2006b); Wallace et al. (2006); McAllister and Newbold (2008); Foley et al. (2009); Molano et al. (2008) | Also expensive |
| Essential oils | 0 to 19% | | | Mohammed et al. (2004a); Beauchemin and McGinn (2006b) | May require encapsulation to slow volatilization; see also reviews by Calsamiglia et al. (2007) and Benchaar et al. (2008) |
| Saponins | 0 to 16% | | | Hess et al. (2004); Santoso et al. (2004); Lila et al. (2005); Pen et al. (2007); Holtshausen et al. (2009); Wang et al. (2009) | Only short-term studies |
| Condensed tannins | 12 to 46% in sheep and goats; 0% in beef cattle; 0 to 26% in dairy cattle | | None | Woodward et al. (2002); Carulla et al. (2005); Hess et al. (2006); Beauchemin et al. (2007a); de Oliveira et al. (2007); Animut et al. (2008); Grainger et al. (2009) | Potential negative effect on protein nutrition, fiber digestibility, and milk yield; see also review by Waghorn (2008) |
| Nitrate and sulfate | 16 to 57% | Sustained (1 study) | Yes | Sar et al. (2004); van Zijderveld et al. (2010, 2011) | As electron acceptors, these compounds have to be supplied in stoichiometric proportions, which may make them unrealistic (Weimer, 1998); risk of nitrite toxicity |
| Nitro-ethane and 2-nitropropanol | 0% to 23% in steers | Transient | | Anderson et al. (2004); Anderson et al. (2006); Gutierrez-Bañuelos et al. (2007); Anderson et al. (2008); Brown et al. (2011) | |
| Acetogens | 100% | Sustained | None | Fonty et al. (2007) | Only demonstrated in gnotobiotically raised lambs; likely requires elimination of methanogens |
| <i>Saccharomyces cerevisiae</i> | 0% | | None | McGinn et al. (2004); Hristov et al. (2010); Chung et al. (2011) | |
| Direct-fed microbes | 18% | | None | Takahashi et al. (1997) | |
| Defaunation Nisin Immunization against methanogens | 10 to 40% 10% 0 to 8% | Sustained | Yes None None | Morgavi et al. (2010); many others Santoso et al. (2004) Wright et al. (2004); Williams et al. (2008) Williams et al. (2009) | Decreased NDF digestibility |

¹For sheep, goats, and beef cattle, CH₄ reduction is given as grams per head per day relative to the control and growth rates may or may not have been affected. For dairy cattle, CH₄ reduction is given as grams of CH₄ per kilogram of ECM relative to the control. Extensive reviews can be found in Van Soest and Demeyer (1996), Boadi et al. (2004), Beauchemin et al. (2008), Martin et al. (2010), and Hristov et al. (2013).

²If cell is blank, the experiment was either not designed to test whether effect on CH₄ reduction was transient or sustained or the experiment was less than 30 d in duration.

Tabella 1. Sommario dei modificatori ruminali usati in vivo

4.5 Esperimento sulla somministrazione di additivi

Lo Scotland's Rural College (SRUC) ha condotto uno studio sugli additivi pensati per ridurre le emissioni di metano da parte dei microrganismi ruminali (Bowen et al. 2020). Per l'esperimento gli scienziati si sono serviti di incroci di Aberdeen Angus (AAx) e di limousine (LIMx), a cui è stata offerta una dieta base con un rapporto foraggi:concentrati di 550:450 (g/kg DMI). Ad ogni gruppo è stato aggiunto alla dieta basale uno specifico trattamento: 1 - controllo (CTL) contenente come maggior fonte proteica farina di colza,

2 - nitrato (NIT) sotto forma di nitrato di calcio, 3 - lipidi (MDDG) somministrati sotto forma di granella scura di mais distillata che ha preso il posto della farina di colza (aumentando gli estratti eterei della dieta da 24,0 a 36,7 g/kg DM) o 4 - una combinazione di NIT e MDDG (COMB), che ha portato il valore di estratti eterei da 24,0 a 35,9 g/kg DM. Le diete contenenti nitrato hanno aumentato l'indice di conversione degli alimenti (feed conversion ratio, FCR), riducendo quindi l'efficienza alimentare, ma non hanno modificato il residual feed intake (RFI). I trattamenti contenenti lipidi non hanno influenzato l'efficienza alimentare (né in termini di FCR né di RFI). Non sono state dimostrate interazioni tra le razze e i diversi trattamenti per quanto riguarda le performance dei capi. Non sono state riscontrate differenze significative nel DMI tra i trattamenti, sia se si considera come misura il kg/giorno che il g/kg peso corporeo. L'aggiunta di nitrato ha evidenziato una diminuzione della produzione di metano rispetto al controllo sia se espressa in g/d (riduzione di 27 g/d/11% in NIT e di 36 g/d/15% in COMB) sia in g/kg DMI (riduzione di 1,9 g/kg DMI/8% in NIT e di 3,1 g/kg DMI/13% in COMB). L'inclusione di lipidi nella dieta è risultata in una riduzione delle emissioni di metano sia se considerano i g/d (8g/d/3% nel trattamento MDDG, 36 g/d/15% nel COMB) che i g/kg DMI (0,6 g/kg DMI/3% nel MDDG, 3,1 g/kg DMI/13% in COMB), riduzioni tuttavia non significative. Non è stata trovata alcuna interazione nell'inclusione congiunta nella dieta di lipidi e nitrati. In tutto sono stati classificati 181 generi di microrganismi all'interno del rumine, di cui 164 presenti nei campioni di tutte le diverse diete e identificati, di conseguenza, come quelli più importanti. I restanti 17 taxa, infatti, appartenevano a due o tre dei quattro trattamenti; nessun taxa è risultato essere peculiare di una sola dieta.

Questo studio, insieme a molti altri prima, ha mostrato come variazioni nella dieta abbiano importanti effetti sulle comunità microbiche del rumine, quest'ultime influenzate anche dall'età e dallo stadio di maturazione degli animali. Tuttavia, non si sono potute evidenziare relazioni tra la relativa abbondanza di taxa numericamente importanti e l'efficienza alimentare, nonostante alcuni piccoli legami tra taxa minori e certi trattamenti (sono state rilevate delle connessioni tra l'abbondanza di certi batteri ed Archea e le emissioni di metano). Questo comunque non sorprende, data la notevole

abilità delle popolazioni microbiche ad adattarsi ai cambiamenti della dieta, caratteristica che potrebbe aver mascherato le differenze nell'efficienza alimentare influenzate dai cambiamenti nella comunità microbica stessa (Bowen et al. 2020).

In un recente studio Shabat et al. hanno scoperto che gli animali più efficienti hanno una comunità microbica ruminale meno diversificata e suggeriscono che proprio questo fattore permetta di produrre più metaboliti importanti e quindi che più substrati siano disponibili per gli ospiti (Shabat et al. 2016).

L'osservazione di relazioni occasionali ma inconsistenti tra l'abbondanza di certe famiglie di microrganismi e l'efficienza alimentare suggerisce che ci possano essere meccanismi coinvolti più complessi e ancora da identificare. La differenza nella produzione di metaboliti potrebbe essere più o meno legata ai cambiamenti nelle popolazioni microbiche dovuti a diverse diete di base e alla peculiarità di ciascun animale (inteso sia come razza che come singolo). I microrganismi del rumine sono stati comunque influenzati dall'aggiunta di lipidi e nitrati, con quattro taxa (Methanomassiliicoccales, Methanobrevibacter, Methanosphaera e Succinivibrio) significativamente affetti almeno in una delle diete, ma ciò non ha avuto effetti sull'efficienza alimentare dei bovini esaminati (Bowen et al. 2020).

4.6 Tecniche genetiche per aumentare la produttività e ridurre il CH₄/ECM

Caratteristiche quali le differenze tra i singoli animali nella scelta delle piante da mangiare durante il pascolo, i tassi di ingestione del rumine e le interazioni microbo-ospite potrebbero essere ereditabili e quindi potenzialmente modificabili tramite selezione genetica per ottenere animali con minori emissioni di CH₄ enterico. Anche l'Environmental Protection Agency ha chiaramente sostenuto che "migliorare la produttività del bestiame affinché meno CH₄ sia emesso per unità di prodotto è la tecnica più promettente e conveniente economicamente per ridurre le emissioni". Vacche da latte più efficienti produrranno più latte relativamente alla quantità di alimento ingerito e all'energia persa come CH₄. L'efficienza produttiva può essere

migliorata tramite selezione genetica e tecniche gestionali che influenzino non solo la nutrizione e l'alimentazione ma anche la riproduzione, la tolleranza allo stress da calore, l'incidenza delle malattie, i tassi di abbattimento e la quota di rimonta. Nonostante gli effetti della selezione genetica e del miglioramento gestionale siano comunemente esaminati su scala individuale, dal punto di vista della mitigazione della produzione di metano sarebbe più importante assumere una visione d'insieme, basandosi sull'intera mandria (Knapp 2014).

4.6.1 Selezione genetica per una migliore resa ed efficienza energetica

Negli ultimi '60 anni sono stati fatti dei progressi giganteschi nella selezione genetica delle vacche da latte tanto che, insieme ai miglioramenti nelle tecniche gestionali, in America del Nord si è arrivati ad un aumento della produzione di latte pari al 400%, nonostante la riduzione della popolazione di vacche da latte degli USA del 64%. Anche le emissioni di metano sono notevolmente diminuite se paragonate al passato (57% in meno per unità di prodotto) (Capper, Cady, e Bauman 2009). Nonostante questa continua spinta verso il miglioramento, non vi sono indicazioni sul fatto che il potenziale genetico per la produzione di latte stia per raggiungere un massimo e la grande diversità tra le singole vacche nella produzione per lattazione ($DS = \pm 2500$ kg/lattazione) indica che nelle popolazioni è ancora presente una certa eterogeneità che permette la selezione.

Il rapporto CH_4/ECM può essere ridotto seguendo tre approcci diversi. Il primo è quello di incrementare la produzione per singola vacca con incrementi di assunzione di DMI via via più piccoli, in modo da diluire i costi dell'energia di mantenimento e aumentare l'efficienza dell'energia lorda. Il secondo prevede la riduzione della taglia corporea senza ridurre la resa del latte e i suoi componenti; anche questa via presume come effetto l'aumento dell'efficienza dell'energia lorda, ma attraverso una riduzione dell'energia di mantenimento richiesta. Il terzo propone di fare selezione seguendo i criteri di residual feed intake (RFI) o di produzione di residui solidi (RSP), entrambi parametri che misurano l'efficienza alimentare. Tutte queste idee si basano sul concetto che l'energia di mantenimento è un costo fisso e varia in funzione delle dimensioni corporee. Dato che

la produzione di CH₄ è proporzionale all'energia ingerita dall'animale, ridurre la proporzione di questa usata per il mantenimento, mantenendo o aumentando nel frattempo la produzione, significa far diminuire il rapporto CH₄/ECM.

La selezione genetica nell'arco degli ultimi sei decenni si è basata per la maggiore sul primo approccio, con crescenti rese di latte e di grasso nel latte, mentre la selezione per l'aumento di proteina nel latte è stata implementata nelle ultime due decadi (nell'industria zootecnica americana). Le riduzioni del rapporto CH₄ enterico/ECM ottenute tramite la selezione genetica attuata per ottimizzare la produzione di latte seguono rendimenti via via decrescenti. Un aumento di produzione di 100 kg di latte per lattazione, secondo le previsioni, dovrebbe comportare una diminuzione del 7,3% del rapporto CH₄/ECM a livelli di produzione pari a 7000 kg/lattazione, ma solo del 3,1% a livelli di produzione pari a 13.000 kg/lattazione, assumendo che non ci siano variazioni nella digeribilità o nella fermentazione ruminale.

Nonostante la selezione per la riduzione delle dimensioni corporee sia teoricamente possibile, non è mai stata perseguita a fondo. L'abilità di ridurre la corporatura mantenendo la stessa produzione di latte è limitata dalla minor ingestione, causata proprio dalle ridotte dimensioni corporee. In più, animali più piccoli producono meno carne e, considerando che l'abbattimento delle vacche da latte negli USA genera il 22% della produzione interna di carne, ciò non sarebbe conveniente né dal punto di vista economico né da quello delle emissioni di metano. Questa ipotesi diventa ancor meno percorribile se si pensa che gli animali da latte rappresentano a livello europeo e globale, rispettivamente, il 50 e il 57% della carne bovina totale consumata (FAO 2010). In un esperimento in cui sono state comparate frisona, jersey e Simmental e si è misurata direttamente la produzione di CH₄ e di latte, non è stata rilevata alcuna differenza tra jersey e frisona nella produzione di CH₄/DMI o CH₄/ECM, nonostante sia diffusa la credenza che le jersey siano vacche più efficienti energeticamente a causa della loro taglia minore e del maggior contenuto di sostanza secca nel latte. La Simmental ha mostrato valori simili di CH₄/DMI ma maggiori di CH₄/ECM durante la lattazione a causa della minor produzione di latte dovuta alla minor taglia corporea e quindi alla maggior proporzione di CH₄ associata al mantenimento (Münger e Kreuzer 2006).

RFI e RSP sono due approcci correlati tramite cui vengono selezionate geneticamente le vacche più efficienti nell'utilizzare i nutrienti per sintetizzare i componenti del latte, stabilita una dimensione corporea fissa. L'uso di RFI o RSP in un indice di selezione riduce il rapporto CH₄ enterico/ECM in modo direttamente proporzionale alla riduzione di DMI o all'aumento di sostanza secca nel latte (ad esempio una riduzione pari all'1% del DMI o un aumento dell'1% della sostanza secca del latte riduce il rapporto CH₄/ECM dell'1%), sempre presumendo che la digeribilità non venga influenzata (Knapp 2014).

4.6.2 Durata del periodo produttivo

Approcci genetici che migliorano la salute, la resistenza alle malattie, la riproduzione e la tolleranza allo stress da calore, condurranno ad avere vacche che permarranno per più tempo in stalla e avranno soglie di produzione maggiori, riducendo in questo modo il rapporto CH₄/ECM. L'incidenza delle malattie comuni nei bovini da latte ha una bassa o moderata ereditabilità ($h^2 = 0,05-0,25$) ma è comunque correlata positivamente alla selezione per migliori rese produttive (vacche più resistenti alle malattie possono produrre di più e permanere per più tempo in stalla). Nel corso del decennio passato, gli indici di selezione della vacche da latte sono stati modificati per includere tratti relativi alla riproduzione, alla suscettibilità alla mastite e alla lunghezza della vita produttiva, tutte caratteristiche che aumentano l'efficienza produttiva e riducono le emissioni di metano (Knapp 2014). Esperimenti con vacche selezionate geneticamente hanno mostrato una diminuzione delle emissioni di CH₄/ECM fino alla terza lattazione, ma non nell'arco di tutta la vita, quando comparate con vacche non selezionate. Tuttavia, ingestioni di DM maggiori e una durata maggiore della lattazione, entrambi positivamente correlati con una maggiore produzione di latte, hanno contribuito a emissioni minori di CH₄/ECM nell'arco del periodo produttivo delle vacche (Bell et al. 2011).

La selezione genetica per una miglior resa produttiva o una maggior efficienza energetica attraverso RFI, RSP, resistenza alle malattie e tolleranza allo stress da calore comporta una riduzione di CH₄ enterico/ECM tramite una maggior produzione di latte, la diluizione dei costi alimentari di mantenimento e la minor quota di rimonta. L'impatto

combinato di tutti questi approcci genetici potrebbe ridurre la produzione di CH₄/ECM negli allevamenti intensivi di un valore tra il 9 e il 19%, di cui una parte riscontrabile a livello individuale (maggior produzione) e una parte a livello collettivo (tassi di abbattimento e quote di rimonta più bassi) (Knapp 2014).

È importante evidenziare come, a differenza delle tecniche gestionali, i risultati della selezione genetica siano permanenti, ma debbano essere supportati da un adeguata gestione aziendale per ottenere la riduzione desiderata del rapporto CH₄/ECM.

4.6.3 Considerazioni

Il miglioramento genetico è forse la tecnica più promettente e anche tra le più conosciute e applicate per il miglioramento della produttività non solo degli animali; riuscire ad apportare miglioramenti alla produttività e alla fitness è una delle sfide più importanti da perseguire nei prossimi anni. In un contesto in cui si presta sempre più attenzione al benessere animale, riuscire ad aumentare la produttività senza andare ad inficiare ulteriormente sulla salute dell'animale è una delle sfide più grandi che ci si presentano davanti. Sebbene sia noto che la spinta verso picchi produttivi maggiori implichi un range sempre più ristretto di condizioni ottimali per l'animale, riuscire a limitare questa dipendenza potrebbe essere una chiave di volta per la selezione genetica del futuro, sempre tenendo a mente che a selezione genetica sempre più spinta deve corrispondere una specializzazione maggiore del sistema di allevamento e dell'allevatore stesso.

4.7 Tecniche gestionali per aumentare la produttività e ridurre il CH₄/ECM

Approssimativamente il 50-55% della crescita nella produzione che si è verificata negli ultimi 60 anni circa è stata ottenuta tramite la selezione genetica, mentre la restante parte tramite il miglioramento delle tecniche gestionali. Gli animali, infatti, non possono esprimere al massimo il loro potenziale genetico se ci sono dei fattori limitanti nell'ambiente che li circonda.

Pratiche di gestione che incrementano l'abilità della singola vacca di produrre più latte e raggiungere quindi il massimo potenziale genetico ridurranno dunque il CH_4/ECM a livello dell'intera mandria. Tra queste tecniche gestionali vi sono pratiche che riducono gli abbattimenti non volontari e le malattie, strutture ed equipaggiamenti disegnati per migliorare l'ambiente entro cui vivono gli animali, l'uso di tecnologie atte a migliorare la performance (performance-enhancing technologies) e miglioramenti nella distribuzione dei nutrienti e degli alimenti. Tutte queste tecniche hanno il potenziale per migliorare la redditività e allo stesso tempo diminuire le emissioni di CH_4 (Knapp 2014).

4.7.1 Mitigazione dello stress da caldo

Lo stress generato dalle eccessive temperature causa una riduzione dell'ingestione, dell'incremento medio giornaliero, della produzione di latte e della fertilità, contribuendo invece ad aumentare l'interparto e la quota di rimonta involontaria. Durante lo stress, si riduce maggiormente la produzione di latte rispetto al DMI e ciò causa di conseguenza l'aumento del rapporto CH_4/ECM . Più che l'intensità del picco di calore, ciò che ha un impatto maggiormente negativo è la durata del periodo di stress: più questo dura più l'animale ne sarà influenzato. Un'adeguata aerazione riduce notevolmente l'impatto dello stress, specie in periodi di prolungato caldo e umidità. La soglia alla quale gli animali cominciano a soffrire è direttamente collegata al livello di produzione: la produzione di calore interno all'animale aumenta all'aumentare del DMI e del metabolismo associato alla crescente produzione di latte. Nelle vacche da latte, lo stress da caldo comporta una riduzione del DMI solitamente maggiore nelle pluripare piuttosto che nelle primipare. La perdita di produzione è spesso difficile da quantificare, poiché gli effetti dello stress da caldo sono spesso nascosti dietro altri fattori e sono influenzati da variabili quali lo stadio di lattazione, la razza, l'età e gli effetti carry over. Lo stress da caldo riduce anche la fertilità sia del maschio che della femmina, comportando un performance riproduttiva minore. L'incidenza di nuove infezioni alla mammella e la frequenza delle mastiti aumenta durante i mesi estivi perché i meccanismi difensivi delle mammelle stesse si indeboliscono in questo periodo. Anche la mortalità aumenta durante periodi di stress da caldo. Molti degli effetti dello stress identificati nelle vacche da latte si possono riscontrare anche nei vitelloni, tuttavia con

gravità minori, dato che la loro produzione di calore corporeo è minore (livelli minori di ingestione). Dato che le vacche da latte sono state storicamente selezionate per migliorare le rese produttive, la loro tolleranza allo stress è via via diminuita. Un miglioramento del 25% nella tolleranza allo stress si stima possa ridurre la rimonta del 2,5%, le morti dello 0,5% e le perdite di produzione di latte di 1000 kg/vacca x anno, con una riduzione netta del 10% del rapporto CH₄/ECM (St-Pierre, Cobanov, e Schnitkey 2003).

Le attuali tecniche impiegate per combattere lo stress da caldo spesso usufruiscono di grandi quantità di acqua e di energia per fare funzionare ventilatori e pompe. Strategie che riducono o eliminano l'impiego di acqua ed elettricità potrebbero avere ancor più valore economico ed essere più sostenibili ambientalmente in un prossimo futuro (Knapp 2014).

4.7.2 Gestione della fase di transizione

Uno dei periodi più critici nella gestione delle vacche da latte è il periodo di transizione dalla gestazione alla lattazione. Nei primi 60 giorni post-parto, infatti, si verifica la più alta incidenza di malattie metaboliche e infettive. Molte delle malattie che emergono in questo periodo sono correlate tra loro e una vacca in cui viene riscontrato un problema è più soggetta ad averne altri in futuro. In più, queste malattie si riflettono negativamente sul picco di produzione e dunque su tutta la curva di lattazione, influenzando negativamente anche la fertilità e dunque la riproduzione, con un maggior numero di days open e un numero di servizi maggiore richiesti per il parto. Durante questo periodo anche la sensibilità allo stress da caldo aumenta, causando le problematiche sopra indicate. Una riduzione del 5% della quota di rimonta dovuta alle malattie emerse in questo periodo, insieme ad un aumento della resa pari a 1000 kg/vacca x anno, è stimata ridurre le emissioni della mandria dall'8 al 12% (CH₄/ECM) (Knapp 2014).

4.7.3 Fattori che aumentano la produzione

Ionofori, microbi, enzimi e somatotropina bovina ricombinante (rbST), disponibili negli USA, quando somministrati aumentano l'efficienza alimentare, fungono da sostanze

tampone nel ruminante per evitare l'acidosi, inibiscono i microbi dannosi o stimolano quelli utili, accelerano la crescita e la produzione di latte. Tutti questi fattori permettono di incrementare la produzione e di emettere meno CH₄ per unità di prodotto. La rbST riduce gli input di mantenimento in relazione agli output di produzione, permettendo un uso più efficiente dell'energia e della proteina introdotte con la dieta. Incrementare la produttività del 13% tramite l'uso della rbST permetterebbe di ridurre le emissioni di CH₄ del 9% e in generale di emettere meno GHG se si considera l'insieme costituito dalla vacca e dai suoi sottoprodotti (Knapp 2014).

L'uso dell'ormone artificiale della crescita, tuttavia, va incontro a restrizioni in molti paesi, tanto che gli U.S.A. sono l'unica nazione che permette la sua somministrazione sia nell'allevamento dei bovini da carne che di quelli da latte e anche all'interno del contesto americano sempre più aziende si stanno impegnando nella produzione di prodotti rbST free. L'Unione Europea, nel 1999, interpellata a decidere sulla questione della somatotropina bovina, ha ribadito la sua decisione di proibire l'immissione sul mercato ai fini della commercializzazione e della somministrazione del Posilac (nome commerciale dell'ormone della crescita, a seguito di un rapporto effettuato dalla stessa UE in cui sono stati segnalati problemi quali dolori intensi, sofferenze e stress associati a problemi di mastite, di zoppie e di fertilità (SCAHAW 1999). Le decisioni dell'UE e degli altri paesi di impedire l'uso dell'rbST sembrano definitive e vanno a porre una pietra tombale su un argomento molto interessante dal punto di vista produttivo, ma con ricadute troppo importanti sulla salute animale e umana.

4.7.4 Fertilità

L'efficienza riproduttiva è proporzionalmente diretta alla produttività: vacche che si trovano in programmi di riproduzione ben gestiti hanno un picco di lattazione più lungo e in generale un più ampio periodo produttivo. In questo modo la quota di rimonta esterna diminuisce, gravando meno sulle spese degli allevatori, dato che il 19% di essa è dovuto a ragioni riproduttive. Una riduzione della quota di rimonta (causata dalle migliori condizioni riproduttive) dal 35 al 30% potrebbe ridurre le emissioni di CH₄

enterico dell'intera mandria del 3,1% se l'età di primo parto non supera i 26 mesi (Knapp 2014).

4.7.5 Ridurre il numero delle vacche in asciutta e la quota di rimonta

Ridurre il tasso di abbattimento significa dover rimpiazzare meno animali e ciò comporta una minor produzione di CH₄/ECM e un aumento della redditività. Il numero di vacche in asciutta all'interno di un allevamento è un riflesso diretto dell'efficacia del programma di riproduzione usato. Un buon management della riproduzione permette di avere tempi ottimali di asciutta, un giusto bilancio tra un periodo minimo che permetta ai tessuti mammari di involvere e rigenerarsi (in modo da avere una produzione ottimale nella lattazione successiva) e un periodo improduttivo troppo lungo (Knapp 2014).

E. Wall e altri scienziati (Wall, Coffey, e Pollott 2012) hanno comparato le emissioni di GHG di tre lattazioni di durata diversa (305, 370 e 440 giorni). La lattazione più lunga permette di avere un numero minore di capi e di rimpiazzati, ma le minori emissioni di GHG che questi due fattori comportano vengono compensate dall'aumento delle emissioni verificatesi nelle fasi finali della lattazione. Negli ultimi 6 mesi di lattazione, infatti, le rese sono state molto basse rispetto ai primi 12 mesi, con il latte degli ultimi sei mesi che dunque è risultato essere quello prodotto in modo meno efficiente in termini di GHG. Poiché infatti le richieste energetiche per il mantenimento e l'accumulo di riserve corporee aumentano lievemente alla fine della lattazione e la resa crolla, il rapporto GHG/Kg latte prodotto è aumentato; dato che la resa complessiva sarebbe dovuta restare la stessa nelle tre diverse lattazioni, è emerso che più GHG vengono prodotti in proporzione con lattazioni più lunghe. I risultati delle due lattazioni più brevi sono invece stati simili: lattazioni più corte comportano un maggior numero di capi richiesto ma complessivamente producono meno GHG. Se confrontate con la lattazione di 440 giorni, le lattazioni di 370 e 305 giorni hanno prodotto rispettivamente il 6 e l'11% in meno di GHG.

Il numero di vacche necessarie per la rimonta dipende dalla quantità di vacche eliminate per scarsa produzione, dall'età del primo parto, dalla mortalità e dagli eventuali piani di espansione dell'azienda. Ridurre l'età del primo parto significa ridurre le richieste

energetiche legate al periodo improduttivo dell'animale e quindi il CH₄ prodotto senza che vi sia una produzione effettiva. Anche la riduzione della mortalità delle manze significa allo stesso tempo una riduzione nella produzione di CH₄, dato che gli animali che muoiono o vengono soppressi prima della loro prima lattazione rappresentano solamente un grande consumo di energia e risorse senza alcun ritorno economico. È stato stimato che la riduzione della rimonta dal 35 al 30% e dell'età di primo parto da 26 a 24 mesi, mantenendo la stessa produzione a livello aziendale, potrebbe ridurre le emissioni di metano del 4,6%. Tuttavia, quote di rimonta troppo basse compromettono il progresso genetico di generazione in generazione e manze che partoriscono troppo presto (<21 mesi) hanno una produzione minore nell'arco della loro vita. La riduzione della mortalità delle manze e del tasso di abbattimento comporta una egual riduzione della proporzione di manze necessarie per il rimpiazzo (ad esempio una riduzione del 5% della mortalità e della rimonta significa una pari riduzione del 5% delle manze necessarie per il rimpiazzo) e fornisce l'opportunità di ridurre le emissioni di CH₄ migliorando allo stesso tempo il benessere animale (Knapp 2014).

Bisogna tuttavia considerare che minori abbattimenti di manze e vacche a fine produzione significano minori quantitativi di carne provenienti dagli allevamenti da latte e quindi il bisogno di un maggior approvvigionamento dagli allevamenti da carne, al fine di mantenere costante il livello produttivo nazionale o globale. In più, la carne proveniente dagli animali da latte produce una quantità molto minore di GHG/kg di carne rispetto alla carne proveniente dagli allevamenti da carne intensivi o estensivi (<10 vs 15-70 kg di CO₂eq/kg di carne; (FAO 2010)).

4.7.6 Riassunto delle tecniche gestionali

In sintesi, tecniche gestionali quali il controllo dello stress da caldo, delle malattie e dei trattamenti, tecnologie che mirano al miglioramento delle prestazioni e una gestione accurata della riproduzione possono aumentare la produzione di latte e ridurre la mortalità e la quota di rimonta e quindi il bisogno di animali per il rimpiazzo. Molti di questi approcci sono additivi e si stima siamo in grado di ridurre le emissioni di CH₄ enterico/ECM dal 9 al 19%, a seconda del diverso potenziale genetico degli animali.

4.7.7 Considerazioni

È di fondamentale importanza che le tecniche e le pratiche gestionali vadano di pari passo con il miglioramento genetico. La parola chiave è gestione: saper gestire le varie fasi del processo produttivo richiede e richiederà una sempre maggior preparazione e degli agronomi e degli allevatori per stare al passo con la selezione genetica e poterne quindi esprimere il potenziale al massimo. Con l'esposizione sempre maggiore delle vacche a fattori di stress e di malattia (a causa della maggior produzione ricercata), l'allevatore in primis dovrà fornire all'animale le migliori condizioni possibili per espletare le sue potenzialità al massimo. Se si considera la tendenza globale all'aumento delle temperature, lo stress da caldo può essere un fattore molto importante da tenere in considerazione nei prossimi anni e, allo stesso modo, sarà importante mantenere un certo livello di fertilità per non inficiare troppo sui costi aziendali e compromettere i progressi fatti nella riduzione delle emissioni di CH₄.

4.8 Potenziale di riduzione delle emissioni globali di CH₄

Su scala globale, le emissioni di GHG stimate nel life-cycle assesment della produzione casearia variano di nazione in nazione da 1 a 7,5 kg CO₂eq/kg ECM, con una media di 2,4±0,6 kg CO₂eq/kg ECM, di cui solo una parte è costituita da metano enterico (FAO 2010). Di tutte le emissioni di GHG, il 67% è attribuito al latte e il restante 33% alla carne (FAO 2010). I sistemi intensivi presenti (solitamente) nei paesi più sviluppati hanno i tassi di CO₂eq/ECM più bassi, mentre gli allevamenti estensivi presenti soprattutto nei paesi in via di sviluppo hanno i tassi più alti. Globalmente, le emissioni in stalla (on-farm emissions) sono state stimate essere il 93% delle emissioni totali di GHG rilevate nel settore della produzione casearia e includono la CO₂ proveniente dai carburanti e dall'elettricità consumati, il CH₄ enterico e derivante dalla fermentazione degli effluenti e l'N₂O impiegato nella fertilizzazione delle colture ed emesso dalle deiezioni (FAO 2010). Tuttavia, il metano enterico e le emissioni in stalla contribuiscono solo, rispettivamente, per il 25% e il 70% alle emissioni totali di GHG del settore caseario nei paesi sviluppati, dove hanno più rilevanza la produzione di alimenti extraziendali e i processi di post raccolta e consumo. Le stime di questa analisi suggeriscono che la

combinazione di un insieme di strategie tra quelle sopra analizzate possa portare a una riduzione del rapporto CH₄/ECM del 15-30% negli allevamenti intensivi.

Per continuare ad avere miglioramenti nella produttività degli animali in un prossimo futuro bisognerà focalizzarsi non più solo sulla resa di produzione di latte o dei suoi componenti ma soprattutto su tratti che permettano di incrementare il periodo produttivo e l'efficienza alimentare. Questi caratteri stanno venendo man mano implementati negli indici di selezione genetica di paese in paese. Le tecniche gestionali degli animali, che comprendono la nutrizione, la riproduzione, le condizioni sanitarie e delle infrastrutture, dovranno continuare a progredire per tenere il passo con il miglioramento genetico, permettendo così che il potenziale genetico degli animali possa essere espresso al 100%.

Nel caso dei sistemi estensivi esistono molte più opportunità per ridurre il rapporto CH₄/ECM attraverso combinazioni di selezione genetica, produzione di foraggi, nutrizione e altre tecniche gestionali. Le basi scientifiche per questi miglioramenti esistono già; il loro raggiungimento dipenderà dalle condizioni economiche dei diversi stati e dalle politiche perseguite dai governi, oltre che dal background culturale (Knapp 2014).

4.9 Conclusioni e considerazioni

La ricerca sulla genetica, salute, microbiologia, nutrizione e fisiologia degli animali e l'applicazione dei risultati ottenuti in questi studi ha portato a enormi miglioramenti nelle performance nell'arco dell'ultimo secolo. Questi miglioramenti contribuiscono a creare un apporto sempre crescente di latte, il che minimizza l'impatto ambientale delle emissioni di GHG prodotte dai bovini da latte. La continua applicazione di questi approcci alla produzione lattiero-casearia, insieme alla ricerca e allo sviluppo di nuovi metodi può ulteriormente ridurre le emissioni di CH₄ enterico e degli altri GHG per unità di prodotto, aumentando allo stesso tempo l'offerta di latte necessaria per colmare l'aumento del 58% della domanda di prodotti caseari che si verificherà entro il 2050 (McLeod e Food and Agriculture Organization of the United Nations 2011).

La selezione genetica per una migliore efficienza alimentare, una maggior tolleranza allo stress da caldo, resistenza alle malattie e fertilità può migliorare la selezione per la produttività e portare ad una riduzione delle emissioni di CH₄ enterico/ECM del 9-19%. L'alimentazione e la nutrizione hanno potenziali modesti (2,5-15%) di mitigazione del CH₄ enterico/ECM negli allevamenti intensivi dei paesi sviluppati, mentre hanno un potenziale molto più elevato nei paesi in via di sviluppo (FAO 2010). Traguardi significativi tramite l'alimentazione e la nutrizione verranno raggiunti con approcci volti a migliorare l'efficienza alimentare. Additivi alimentari, inibitori chimici e tecniche biologiche per alterare le popolazioni dei metanogeni e le attività e fermentazioni ruminali non possono compromettere la digeribilità e la fermentazione ruminale se il loro obiettivo è di diminuire le emissioni di metano. Ad oggi, tuttavia, ad eccezione dei nitrati, non sono stati trovati dei modificatori ruminali che evidenzino una sostanziale riduzione di CH₄/ECM. Tutti quegli approcci che spostano la digestione verso l'intestino crasso non comporteranno una riduzione netta delle emissioni di CH₄ a livello dell'allevamento. Miglioramenti nel rilevamento dell'estro, nella sincronizzazione dei cicli estrali, nella prevenzione della morte embrionale precoce, nella gestione dello stress da caldo e della salute durante il periodo di transizione comporteranno miglioramenti nella riproduzione, ridurranno il numero di vacche abbattute per scarsa produttività e per malattia e ridurranno in generale la quota di rimonta dell'allevamento. Tutti queste tecniche gestionali possono contribuire a diminuire le emissioni di CH₄/ECM dal 9 al 19%. Riconoscendo che certi approcci genetici e manageriali di mitigazione delle emissioni non sono completamente additivi e che alcuni di questi non sono applicabili a livello di tutta la mandria, lo studio di Knapp e dei suoi colleghi ha sancito che pur combinate, tutte queste tecniche hanno il potenziale per ridurre le emissioni di CH₄/ECM dal 15 al 30% nei sistemi di produzione intensivi, numeri che gli animali più produttivi stanno già raggiungendo. L'implementazione di qualsiasi strategia volta a mitigare le emissioni di CH₄ deve considerare l'impatto sulle emissioni degli altri GHG per unità di latte prodotto e l'impatto sugli altri settori agricoli, specialmente su quello della carne. L'adozione da parte degli allevatori delle strategie di mitigazione dipenderà da queste considerazioni ma anche e forse soprattutto dalla fattibilità della loro

applicabilità, dall'impatto economico e dalle politiche regolamentari in atto (Knapp 2014).

Nei paesi più sviluppati, in cui spesso si trova una grande concentrazione di allevamenti intensivi, la specializzazione nel miglioramento delle razioni ha già raggiunto livelli molto alti. La disponibilità economica dell'azienda, però, rischia di essere sempre il fattore limitante; foraggi, concentrati, lipidi o additivi che migliorano la produzione e permettono di ridurre le emissioni di CH₄, per quanto interessanti, devono avere prezzi accessibili, oltre che essere disponibili sul mercato. Da questo punto di vista, interventi quali politiche e finanziamenti a favore delle aziende che si impegnano ad acquistare alimenti a minor impatto ambientale, potrebbero essere un criterio fondamentale per il successo di questo obiettivo.

Per quanto riguarda il miglioramento genetico, che forse ad oggi è ancora la via con più prospettiva per il miglioramento delle produzioni e la diminuzione delle emissioni, penso sia importante continuare la ricerca in questo campo, sempre tenendo a mente però che è altrettanto importante mantenere un database genetico il più ampio possibile, conservando quindi razze che, anche se meno produttive, possono indurre dei caratteri favorevoli in quelle selezionate geneticamente. La ricerca continua dell'aumento delle produzioni, infatti, rischia di ridurre sempre di più la varietà genetica all'interno degli allevamenti, caratteristica positiva per gli allevatori, ma negativa in un mondo in cui l'opinione pubblica è sempre più attenta alle azioni che l'uomo compie sugli animali.

Sarebbe importante anche effettuare un ammodernamento delle strutture, che permetterebbe di meccanizzare le operazioni e di aumentare l'efficienza produttiva. Investimenti di una certa portata, però, sono spesso possibili solo per aziende di grandi dimensioni, e questo porta al rischio della scomparsa definitiva delle piccole aziende a conduzione familiare. Sarebbe quindi interessante trovare un modo per aiutare i piccoli allevatori e permettere loro di stare al passo con i grandi produttori (ad esempio finanziandoli nell'acquisto di macchinari e infrastrutture), nonostante il processo di assorbimento di tante piccole aziende in poche aziende di grandi dimensioni sembri ormai infermabile.

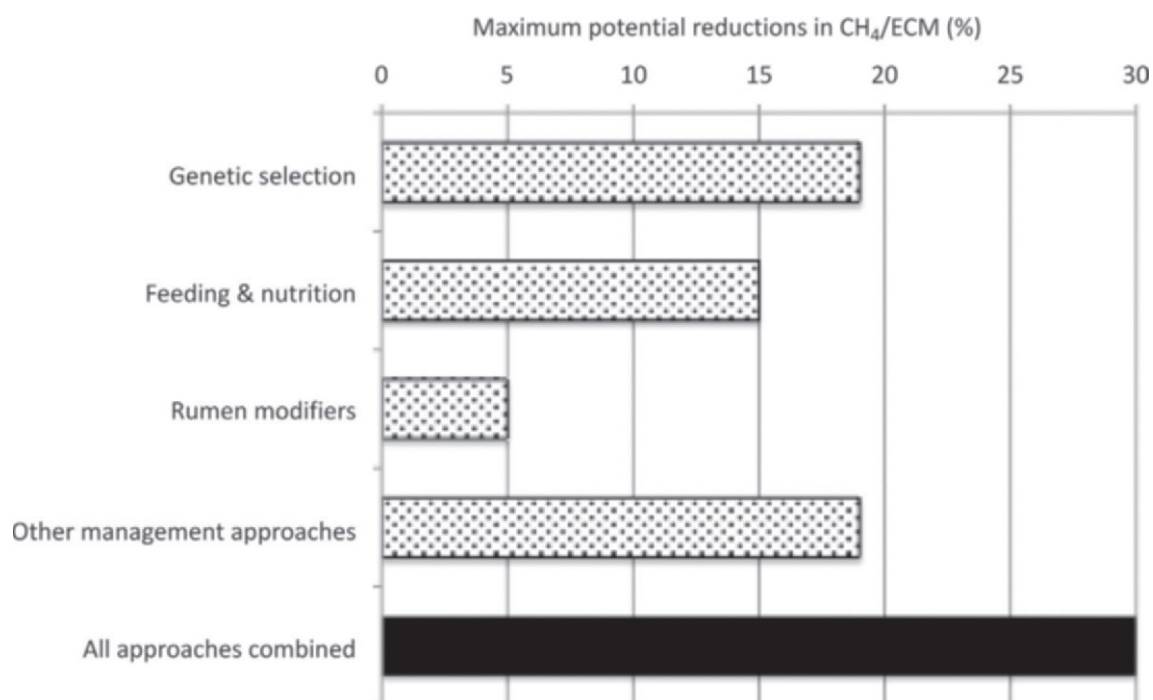


Figura 9. Impatto massimo stimato dei vari approcci nella mitigazione delle emissioni di CH₄ negli allevamenti intensivi di vacche da latte che sono stati dimostrati essere effettivi in vivo. Ci si aspetta che gli approcci non siano totalmente additivi; una bassa additività ridurrà l'effettività di ciascuna strategia (Knapp 2014).

5 GESTIONE DEGLI EFFLUENTI

5.1 Introduzione

Oltre al metano di origine enterica, l'altra grande fonte d'inquinamento di origine bovina e, in generale, animale sono le deiezioni. Il loro stoccaggio e la loro gestione, dal momento in cui vengono raccolte in stalla al momento in cui sono applicate in campo, sono due fattori su cui da anni gli scienziati stanno lavorando. Una corretta gestione del percorso che compiono gli effluenti dall'animale al terreno potrebbe ridurre notevolmente le emissioni in atmosfera di CH₄ e soprattutto di NH₃ e N₂O, che restando intrappolati nelle deiezioni potrebbero aumentare la quantità di azoto che andrebbe a fertilizzare il suolo. La stabulazione, la movimentazione, lo stoccaggio e l'applicazione del letame e del liquame sul suolo come fertilizzanti contribuiscono a produrre il 31% dei GHG (e quasi tutto l'NH₃) emessi dal bestiame a livello europeo (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018). L'unione europea ha messo a punto diverse politiche per cercare di contrastare queste emissioni, in particolar modo focalizzandosi sul

contenimento dell'ammoniaca, tramite protocolli (protocollo di Goteborg, 1999) e direttive (National Emissions Ceiling directive, 2001). Anche altri provvedimenti quali la direttiva nitrati (1991) e il protocollo di Kyoto (1997) contribuiscono a influenzare le emissioni di NH_3 e, in generale, degli altri gas serra. Diversi studi hanno analizzato e valutato il potenziale di diversi processi di ridurre le emissioni di NH_3 e di GHG. Nonostante la validità di questi studi nello stimare la possibilità di riduzione delle emissioni, la maggioranza di essi ha aspetti negativi non indifferenti. La gran parte degli studi, infatti, si è focalizzata sull'abbattimento di un singolo gas, sia esso l' NH_3 o un GHG (CH_4 e N_2O sono stati espressi entrambi in CO_2eq), senza valutare (nonostante questo fenomeno sia già stato discusso in letteratura) le interazioni tra i gas che potrebbero portare al verificarsi del fenomeno chiamato pollution swapping, per il quale l'abbattimento delle emissioni di un particolare gas causa l'aumento delle emissioni di un altro gas. Secondo, ma non per importanza, le strategie analizzate si concentrano solitamente su una specifica fase all'interno di tutto il processo che porta il letame dall'animale al campo, senza considerare che la riduzione delle emissioni in uno stage potrebbe portare all'aumento delle stesse in un altro.

La catena di gestione degli effluenti consiste di varie fasi, dall'alimentazione degli animali fino all'applicazione in campo degli effluenti stessi. L'alimentazione, infatti, variando a seconda del contesto, altera le caratteristiche del letame e di conseguenza le emissioni lungo tutta la catena di gestione delle deiezioni. In ogni fase le emissioni possono essere influenzate dalle pratiche gestionali (ad esempio una frequente pulizia della lettiera o l'interramento nel sottosuolo) o da svariate tecnologie (ad esempio diete a basso contenuto di proteine, l'acidificazione del letame, l'installazione di scrubbers, etc.) (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018).

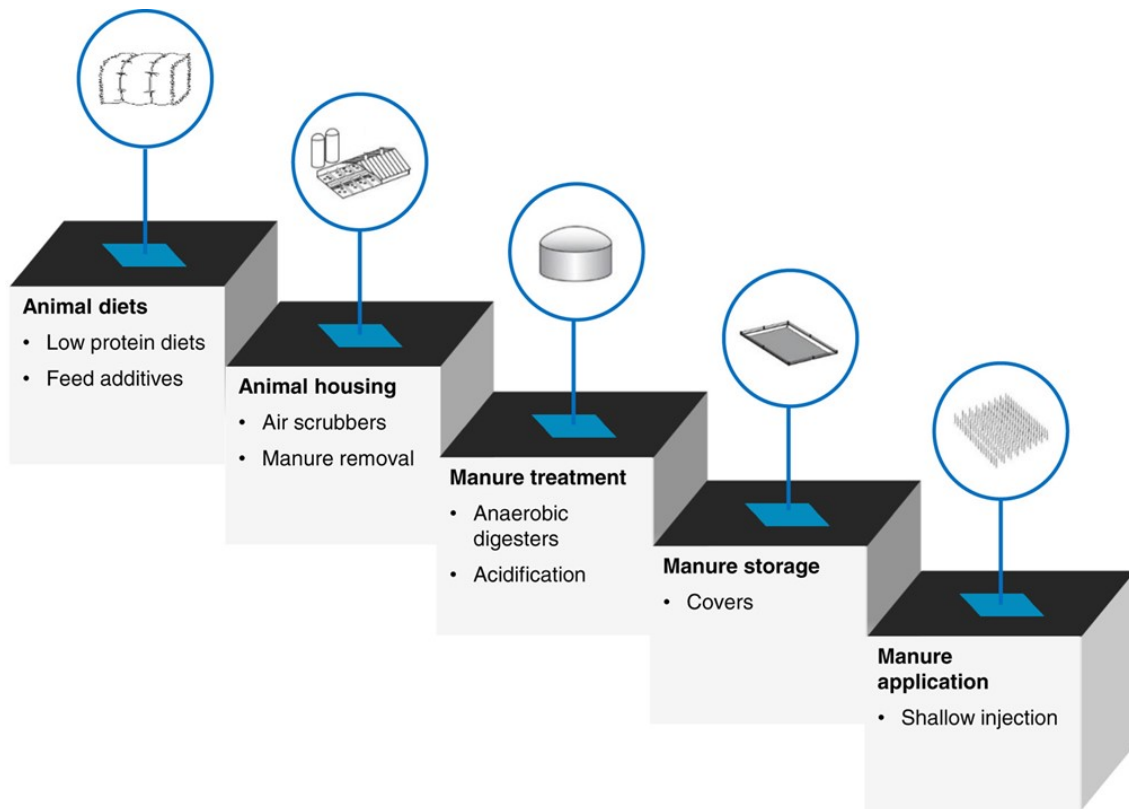


Figura 10. Stage nella catena di gestione degli effluenti e opzioni di abbattimento delle emissioni associate (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018).

5.2 Strategie di alimentazione

La riduzione della proteina grezza (CP) contenuta nella dieta e/o l'aggiunta di additivi quali fibre, enzimi e acidi sono alcune delle opzioni studiate per abbassare le emissioni gassose della catena di gestione del letame.

5.2.1 Riduzione della proteina grezza

Le emissioni di ammoniaca decrescono al decrescere dei livelli di proteina grezza. Un minor quantitativo di proteina grezza abbassa il contenuto di azoto nel letame oltre che il suo pH. Questo porta a valori più alti di inclusione dell'azoto in condizioni stabili come proteina microbica, riducendo così la proporzione di ammonio rispetto all'azoto totale e quindi le emissioni di NH_3 , che sono diminuite in media del $42 \pm 21\%$. Ridurre la CP di meno di due punti percentuali ha portato a una riduzione delle emissioni di NH_3 del $26 \pm 21\%$, mentre ridurla di più di cinque punti percentuali a una riduzione del 51 ± 21 , dimostrando come il contenuto di CP presente nella dieta influenzi pesantemente le

emissioni di NH_3 . Anche La composizione degli alimenti, il tipo di animale considerato e lo stadio di crescita dovrebbero essere conteggiati per la stima della riduzione delle emissioni di NH_3 , dato che, soprattutto nei maiali, si è visto come la riduzione della CP abbia avuto riscontri molto maggiori nei suinetti che negli adulti. Al contrario, le emissioni di CH_4 sono aumentate del $71\pm 131\%$ con la riduzione dei livelli di CP (Tabella 2). Con minori quantità di proteina grezza, infatti, la digeribilità della fibra è minore e quando questa viene escreta nel letame, fornisce più carbonio utile per la metanogenesi, con la generazione di CH_4 durante la fase di stoccaggio. Le emissioni di N_2O tendono a diminuire con minori quantitativi di CP, principalmente a causa del minor contenuto di azoto nel letame, tuttavia, la ridotta digeribilità della fibra favorisce la formazione della crosta superficiale durante lo stoccaggio, il che genera un aumento delle emissioni di N_2O a causa della creazione di zone aerobiche e anaerobiche, con conseguenti fenomeni di nitrificazione e denitrificazione (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018).

5.2.2 Additivi alimentari

Additivi quali fibre, acidi ed enzimi generalmente portano a una riduzione delle emissioni di NH_3 . L'aggiunta di acidi induce una riduzione del pH urinario, il che porta a diminuire l' NH_3 emesso, mentre le fibre influenzano la composizione del letame, spostando l'azoto dalle urine alle feci e rendendolo quindi meno suscettibile alla volatilizzazione. Inoltre, l'aggiunta di alcune fibre quali l'inulina generano un abbassamento del pH del letame e dunque emissioni ancora minori di NH_3 . Tuttavia, fibre come la crusca di frumento sono risultate meno efficienti di altre (inulina e barbabietola da zucchero) a causa del basso contenuto di polisaccaridi amilacei solubili, il che comporta un minor passaggio dell'azoto dalle urine alle feci; in più la crusca è abbastanza resistente alla fermentazione microbica, il che non contribuisce a diminuire il pH dei liquami. Le emissioni di CH_4 sono aumentate in tutto del $20\pm 33\%$ con l'aggiunta degli additivi alimentari, mentre quelle di N_2O , durante la stabulazione degli animali, del $9\pm 9\%$ (Tabella 2) (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018).

5.3 Stabulazione

Un miglior management degli effluenti e l'installazione di appropriate tecnologie possono aiutare ad abbattere le emissioni.

5.3.1 Air scrubbers

Scrubber chimici e biologici sono stati e sono usati per ridurre le emissioni di NH_3 e di odori sgradevoli nelle strutture per polli e maiali, mentre la loro applicazione nelle stalle per bovini risulta più difficile, in quanto le prime usano solitamente sistemi di ventilazione forzata (richiesti per le tecniche di scrubbing) mentre le seconde si avvalgono di ventilazione naturale. Sia gli scrubber chimici che quelli biologici hanno il potenziale per ridurre le emissioni di NH_3 del $59\pm 39\%$, con i primi ($90\pm 8\%$) più efficienti dei secondi ($46\pm 40\%$). I GHG non possono essere rimossi usando scrubber chimici, dato che hanno una solubilità in acqua minore dell' NH_3 . Negli scrubber biologici invece la riduzione delle emissioni di CH_4 è risultata trascurabile ($6\pm 21\%$) mentre le emissioni di N_2O sono aumentate in modo vertiginoso ($164\pm 270\%$) (Tabella 2) (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018).

5.3.2 Pulizia frequente della lettiera

Le emissioni di ammoniaca derivanti dalla fase di stabulazione dipendono dall'area superficiale in contatto con l'aria. Il letame fresco e le urine producono una quantità maggiore di NH_3 ; pertanto, una regolare rimozione della lettiera può ridurre queste emissioni. I risultati delle analisi evidenziano una riduzione delle emissioni di NH_3 del $22\pm 29\%$ nelle strutture con rimozione giornaliera o settimanale degli effluenti dalla stalla. Poiché le emissioni di metano e di protossido di azoto dipendono dalla quantità totale di escrezioni presente, una frequente pulizia ne riduce l'accumulazione e quindi anche le emissioni rispettivamente del $55\pm 5\%$ e del $41\pm 17\%$ (Tabella 2). Temperature più basse durante lo stoccaggio all'aperto contribuiscono a ridurre ulteriormente le emissioni di metano rispetto al letame stoccato in luoghi chiusi (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018).

5.4 Trattamento degli effluenti

Con trattamento degli effluenti ci si riferisce a tutte quelle tecniche che permettono di assicurare una minor emissione di gas inquinanti e, in certi casi, di ottenere energia dalle escrezioni.

5.4.1 Digestione anaerobica

La digestione anaerobica (AD) genera due prodotti: il metano, che può essere usato come fonte di energia rinnovabile, e il digestato, che può essere separato in una frazione liquida e una solida, adatto all'applicazione in campo. La AD produce anche numerosi effetti secondari: riduce sia l'odore che la carica microbica del digestato (rispetto agli effluenti non trattati), uccide i semi delle infestanti e riduce la richiesta sia chimica che biologica di ossigeno del digestato (sempre rispetto agli effluenti non trattati). Nel processo di digestione anaerobica, il contenuto di ammonio degli effluenti aumenta; il digestato, dunque, ha un contenuto di azoto prontamente disponibile per le piante maggiore del letame e del liquame non trattati. La digestione anaerobica può dunque aiutare gli allevatori a massimizzare l'efficacia nutritiva delle deiezioni animali e a ridurre l'impiego di fertilizzanti minerali. Con l'applicazione del digestato in campo, la decomposizione della sostanza organica ha un duplice effetto nella riduzione delle emissioni di N_2O . In primo luogo, mette a disposizione una maggior quantità di N direttamente disponibile per le piante, a causa della mineralizzazione dell'azoto organico in ammonio. In seconda battuta, limita l'attività dei microrganismi che producono N_2O , i quali dipendono dall'apporto di materia organica fresca per soddisfare il loro fabbisogno energetico (Walsh et al. 2012).

Le stime sulle emissioni di NH_3 hanno evidenziato un aumento del $13\pm 76\%$ durante la fase di stoccaggio del digestato e una diminuzione dell' $8\pm 34\%$ quando questo è stato applicato al suolo (le stime totali indicano una lieve diminuzione del $3\pm 45\%$ delle emissioni di NH_3 nel digestato se comparato agli effluenti non trattati). Le emissioni di CH_4 sono diminuite soprattutto durante lo stoccaggio del materiale e in totale del $29\pm 116\%$ (Tabella 2). La variabilità nelle emissioni di metano è dovuta alle diverse composizioni degli effluenti animali e all'influenza di fattori esterni quali la temperatura,

la durata e la struttura di stoccaggio. Bisogna inoltre prestare particolare attenzione a svolgere correttamente tutte le operazioni nei vari sistemi di digestione anaerobica, in modo da evitare perdite inattese che potrebbero compromettere l'efficacia del sistema e dunque la riduzione delle emissioni di GHG. Le emissioni di N_2O sono aumentate del $20\pm 41\%$ durante lo stoccaggio del digestato e diminuite del $29\pm 43\%$ durante la sua applicazione sul suolo. Questo porta ad avere un quadro generale che sancisce che in totale le emissioni di N_2O diminuiscono del $23\pm 44\%$ (Tabella 2). Tuttavia, fattori quali la composizione degli effluenti e le condizioni esterne (quali ad esempio lo spazio tra i pori riempito d'acqua e il bilancio tra domanda e disponibilità di ossigeno) potrebbero causare un aumento nelle emissioni di N_2O al momento dell'applicazione in campo del digestato rispetto agli effluenti non trattati (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018).

5.4.2 Acidificazione degli effluenti

L'acidificazione non è finora stata adottata ampiamente negli Stati Uniti e in alcuni paesi europei a causa della pericolosità degli acidi, della formazione di schiuma e degli alti costi da sostenere. Tuttavia, recentemente sono stati fatti diversi progressi, tanto che in Danimarca questa tecnica è stata riconosciuta come una delle più efficienti nell'abbattere le emissioni di NH_3 . L'aggiunta di acidi agli effluenti riduce il pH degli effluenti stessi, inibendo l'attività dei batteri produttori di ureasi, spostando l'equilibrio dall'azoto ammoniacale all'ammonio e riducendo dunque le emissioni di NH_3 . In aggiunta, la maggior quantità di N trattenuta negli effluenti diventa disponibile per le piante al momento dell'applicazione sul suolo. Le emissioni di ammoniaca sono diminuite del $77\pm 11\%$ durante la permanenza degli effluenti in stalla, del $63\pm 30\%$ durante lo stoccaggio e del $43\pm 18\%$ dopo l'applicazione sul suolo. In totale, si è registrata una diminuzione delle emissioni di NH_3 pari al $60\pm 28\%$ (Tabella 2). Tutti gli studi condotti su questo sistema hanno mostrato evidenti riduzioni delle emissioni di NH_3 , dimostrando però che i risultati sono notevolmente influenzati dal pH finale, dipendente a sua volta dall'aggiunta degli acidi (la riduzione delle emissioni era significativa per $pH < 6$ (Wang et al. 2014)). L'attività di metanogenesi che porta alla formazione del metano si svolge prevalentemente ad un pH compreso tra 6,5 e 8,5 ma l'acidificazione

normalmente porta il pH degli effluenti a livelli minori (<6), inibendo la metanogenesi e riducendo dunque le emissioni di CH₄ (Wang et al. 2014). Gli effetti dell'acidificazione sull' N₂O si sono invece dimostrati misti: l'aggiunta di acido solforico ha evidenziato una riduzione del 17±30% poiché l'abbassamento del pH ha comportato una minor attività dei batteri nitrificatori; con l'acido lattico le emissioni sono state ridotte di oltre il 90% sempre a causa dell'abbassamento del pH; l'uso di acido nitrico, invece, aggiungendo N al sistema e stimolando la denitrificazione, ha portato ad un ampio incremento delle emissioni di N₂O. Escludendo quest'ultimo acido, le stime generali riportano una riduzione totale delle emissioni di N₂O pari al 55±45% (Tabella 2) (proveniente dalla riduzione del 56±51% durante lo stoccaggio e del 52% durante l'applicazione sul suolo). La variazione nella riduzione delle emissioni dipende soprattutto dalla selezione dell'acido appropriato e dal suo tasso di applicazione (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018).

5.5 Stoccaggio degli effluenti

Dopo la loro rimozione dalla stalla o dopo vari trattamenti (es acidificazione) gli effluenti vengono solitamente stoccati in appositi spazi per varie ragioni (giusta maturazione, limitata disponibilità di terreno su cui spanderli, mancanza di tempo del personale per occuparsene, restrizioni quali la direttiva nitrati). Una conservazione impropria delle deiezioni porta a degradazione chimica e fisica, portando a emissioni di gas, odori sgradevoli, perdita di valore fertilizzante e alti costi di trasporto (quando esposte alla pioggia). Una possibile opzione per l'abbattimento delle emissioni durante lo stoccaggio è l'uso di coperture quali paglia trinciata, granulati, coperchi di legno, film galleggianti, teli di plastica, tetti e altri materiali quali olio o torba (Bittman et al. 2014).

Poiché l'entità delle emissioni di NH₃ dipende dall'area superficiale a contatto con l'aria, una copertura permette di formare una barriera che trattiene l'azoto, senza esporlo all'aria, limitandone quindi le perdite. Considerando che alcune cover (film plastici, granulati e torba) hanno evidenziato risultati migliori di altre (paglia, legno e crosta naturale) (Bittman et al. 2014), le riduzioni totali delle emissioni di NH₃ sono state stimate essere del 65±29% (Tabella 2). Alcuni studi hanno congiunto acidificazione e

aggiunta di cover, ottenendo anch'essi risultati positivi circa la riduzione delle emissioni di ammoniacale. L'ossidazione del CH_4 , il mantenimento di un'umidità il più costante possibile, il mantenimento di una concentrazione stabile di CH_4 sopra l'effluente stoccato e l'evitare fenomeni quali l'ebollizione sono tutti fattori che permettono la riduzione delle emissioni di metano, che sono state ridotte del $12\pm 33\%$ con l'applicazione delle cover (Tabella 2). Il processo microbico che governa la produzione di CH_4 con certi dei materiali usati per la copertura (paglia, crosta superficiale) e le condizioni di stoccaggio (tempo, clima, umidità, ...) influenzano in modo rilevante le emissioni di CH_4 . Nel caso dell' N_2O , invece, le emissioni sono incrementate vertiginosamente ($>500\%$) (Tabella 2), con una forte variabilità a seconda del materiale usato. Crosta superficiale, paglia e granulati, generando un misto di zone aerobiche e anaerobiche, forniscono le condizioni ottimali per lo svolgersi dei processi di nitrificazione e denitrificazione, responsabili delle emissioni di N_2O . Alcuni studi suggeriscono che l'uso di coperture impermeabili come teli di plastica, coperchi di legno e film galleggianti potrebbero eliminare l'ossigeno in superficie, riducendo così le emissioni di N_2O fino al 30% ed evidenziando quanto la scelta del materiale di copertura influenzi le emissioni. Fattori esterni quali la formazione di crosta, la durata dello stoccaggio e le condizioni climatiche possono svolgere un ruolo importante nel determinare le emissioni di N_2O . L'uso combinato di acidi e cover ha prodotto risultati discordanti in termini di emissioni di N_2O , per cui ulteriori ricerche ed esperimenti dovranno essere condotti in futuro (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018).

5.6 Spargimento degli effluenti

Gli effluenti animali (in particolare il letame) sono ricchi di macro e micronutrienti essenziali per la crescita delle piante. La loro applicazione sul suolo aumenta la quantità di sostanza organica ma comporta anche l'emissione di NH_3 e N_2O . Le emissioni di metano invece sono di solito trascurabili, a causa dell'assorbimento del carbonio da parte del suolo e della presenza di ambienti aerobici nella maggior parte dei terreni. Uno studio condotto da Sherlock e altri ricercatori (Sherlock et al. 2002) ha stimato che solo lo 0,08% del carbonio applicato al suolo viene perso come CH_4 , mentre il 22,5 e il 2,1%

dell'azoto applicato viene perso rispettivamente sotto forma di NH_3 e N_2O . Se tradotto in CO_2eq , il metano è responsabile dell'emissione di solo 29 kg CO_2eq , mentre l' N_2O di ben 3700 kg CO_2eq .

In media, l'uso di interratori ha permesso di ridurre le emissioni di NH_3 del $71\pm 25\%$ (Tabella 2) rispetto allo spargimento in superficie, a causa del ridotto contatto dell'effluente con l'atmosfera. Allo stesso tempo però, l'iniezione nel sottosuolo ha causato un aumento delle emissioni di N_2O del $259\pm 416\%$ (Tabella 2) (probabilmente a causa della creazione di zone anaerobiche molto umide che hanno promosso la denitrificazione), sebbene siano stati registrati risultati molto variabili nei diversi studi. La disponibilità di ossigeno, le concentrazioni preesistenti di azoto nel suolo, l'umidità del suolo stesso e la lunghezza del percorso di diffusione fino alla superficie del suolo possono influenzare pesantemente le emissioni di N_2O provenienti dalla distribuzione sotto superficiale degli effluenti, arrivando, in alcuni casi, a ridurle o addirittura annullarle (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018).

5.7 Criteri di scelta delle opzioni di abbattimento

Nella scelta delle migliori opzioni per l'abbattimento dei gas inquinanti dovrebbero essere stilati dei criteri per agevolare la scelta, come hanno provato a fare Oenema e altri ricercatori (Oenema et al. 2009), suggerendo che la priorità dovrebbe essere data alle pratiche che: 1 - riducono le perdite di azoto, 2 - aumentano il contenuto di azoto usabile come fertilizzante, 3 - diminuiscono l'input di azoto nel sistema.

Metodi quali l'uso di coperture o la frequente rimozione delle deiezioni dalla stalla riducono sì le emissioni di N in un determinato momento, ma se la gestione globale dell'intero processo non si rivela adatta, c'è il rischio che questo azoto salvato in un primo momento possa essere emesso in un'altra fase della gestione. Dall'altro lato, tecniche quali la riduzione della CP, l'acidificazione e la digestione anaerobica influenzano le emissioni alterando le caratteristiche degli effluenti, alterazione che va poi a influenzare tutti gli stadi successivi della gestione. Si può desumere dunque che le tecniche che alterano le caratteristiche degli effluenti possano essere più efficienti nella riduzione delle emissioni totali (comprendenti tutti gli stage della gestione) rispetto alle

opzioni che non cambiano le proprietà delle deiezioni (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018).

| Abatement stage | Reference scenario | Abatement options | Emission changes† | | |
|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | | | N ₂ O | CH ₄ | NH ₃ |
| Feeding | High protein feeds | Reduced crude protein | -30 (38) | +71 (131) | -42 (21) |
| | | Additives | +9 (9) | +20 (33) | -9 (34) |
| Housing | Liquid manure housing systems | Air scrubbers | +164 (270) | -6 (21) | -59 (39) |
| | | Frequent removal | -41 (17) | -55 (5) | -22 (29) |
| Treatment | No treatment | Anaerobic digesters | -23 (44) | -29 (116) | -3 (45) |
| | | Acidification | -55 (45) | -74 (22) | -60 (28) |
| Storage | No cover | Covers | >+500 | -11 (34) | -65 (29) |
| Application technique | Surface spreading | Injection | +259 (416) | - | -71 (25) |

† Numbers marked in bold with a "+" sign indicates an increase in emissions relative to the reference.

Tabella 2. Variazione delle emissioni (rispetto al riferimento) delle varie strategie nelle diverse fasi della catena di gestione degli effluenti (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018).

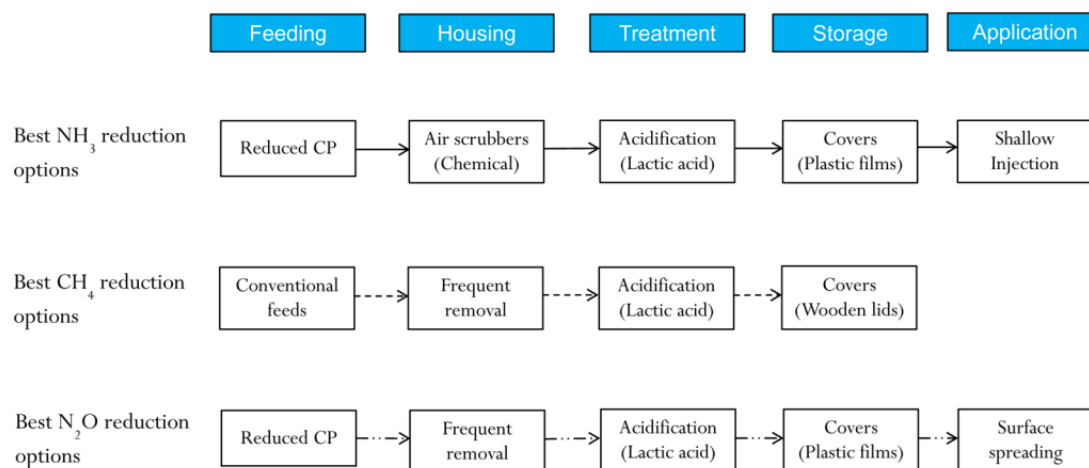


Figura 11. Miglior opzione di abbattimento delle emissioni di NH₃, CH₄ e N₂O in ciascuna fase della catena di gestione degli effluenti (Mohankumar Sajeev, Winiwarter, e Amon 2018).

5.8 Esperimento sull'acidificazione

5.8.1 Introduzione

L'acidificazione degli effluenti è una strategia usata per ridurre le emissioni di NH₃ soprattutto negli allevamenti di suini ma di cui, ultimamente, si sta studiando anche l'applicazione sulle deiezioni bovine (con l'intento di ridurre le emissioni di CH₄ e N₂O, oltre che di NH₃). Le deiezioni suine possiedono quantità diverse di sostanza organica e di nutrienti rispetto a quelle bovine e ciò rende difficile estrapolare i dati ottenuti dalle prime e applicarli alle seconde. Gran parte degli esperimenti e degli studi sono stati

condotti in Danimarca, dove una legge del 2011 impedisce l'applicazione in superficie degli effluenti animali a meno che questi non abbiano un $\text{pH} < 6,4$. Particolare attenzione bisogna prestare a possibili problemi sanitari che acidi forti e composti volatili (es. H_2S) potrebbero causare ad allevatori e bestiame.

Questo studio, condotto da Vera Sokolov et al. al Dalhousie University's Bio-Environmental Engineering Centre a Bible Hill, in Canada, ha comparato del letame di vacche da latte di controllo ($\text{pH} 7,4$) con altro letame sottoposto a due trattamenti con acido solforico (H_2SO_4), uno di media entità ($\text{pH} 6,5$, 1,4 ml acido/L letame, denominato pH medio) e uno di forte entità ($\text{pH} 6$, 2,4 ml acido/L letame, denominato pH basso) (Sokolov et al. 2019).

5.8.2 Risultati e discussioni

PH

Durante tutto il periodo di monitoraggio, i tank contenenti il controllo hanno registrato costantemente il pH più alto (in media tra 6,5 e 7,9), quelli con il trattamento medio si sono aggirati tra 6,1 e 6,8 e quelli con il trattamento più forte tra 6,1 e 6,7. L'aggiunta di un quantitativo maggiore di acido, dunque, non ha ridotto in modo significativo il pH. I trattamenti a pH basso hanno ricevuto il 40% in più di acido, ma il loro pH è risultato inferiore solo di qualche punto decimale rispetto ai trattamenti con pH intermedio. Si sono sviluppati dei gradienti di profondità di pH in tutti i tank, incluso il controllo; il pH era più alto vicino alla superficie (dovuto probabilmente alle emissioni di NH_3 e di CO_2 in corrispondenza della superficie stessa) e più basso man mano che la profondità aumentava. Tutti i tank, poi, hanno mostrato un incremento del pH dopo circa 160 giorni dall'inizio del monitoraggio, probabilmente a causa dell'effetto cumulativo delle perdite di NH_3 e di CO_2 nello strato superficiale (Sokolov et al. 2019).

5.8.3 Emissioni

Metano

Le emissioni totali di metano durante i 160 giorni dell'esperimento sono state di 3640, 491 e 388 g/m^2 rispettivamente per il controllo, il pH medio e quello basso, mentre i

flussi giornalieri di CH₄ sono stati di 22,6, 3,05 e 2,41 g/m²d. I contenitori di controllo hanno avuto una fase di latenza iniziale per poi raggiungere le emissioni massime al quarantacinquesimo giorno di monitoraggio. Il controllo ha mostrato una curva delle emissioni che ha raggiunto il picco durante la metà di agosto, quando si sono registrate le temperature più alte dell'anno. È seguita poi una fase di lento declino delle emissioni, coincidente con i mesi di settembre e ottobre, seguita a sua volta da picchi fuori stagione verificatisi fino alla fine del monitoraggio (1° dicembre).

I tank con il letame acidificato non hanno mostrato alcuna fase di latenza e non hanno seguito la tipica curva delle emissioni di CH₄. Le emissioni maggiori si sono verificate all'inizio dell'esperimento e sono poi decresciute in modo logaritmico fino alla fine, evidenziando come non ci sia stata alcuna risposta alle variazioni stagionali di temperatura e come la durata di stoccaggio e la temperatura non abbiano influito sul processo di acidificazione.

Le emissioni dei trattamenti a medio e basso pH non sono risultate significativamente differenti. Comparate con il controllo, infatti, le emissioni totali di metano sono state ridotte dell'87 e 89% rispettivamente nei tank a medio e basso pH.

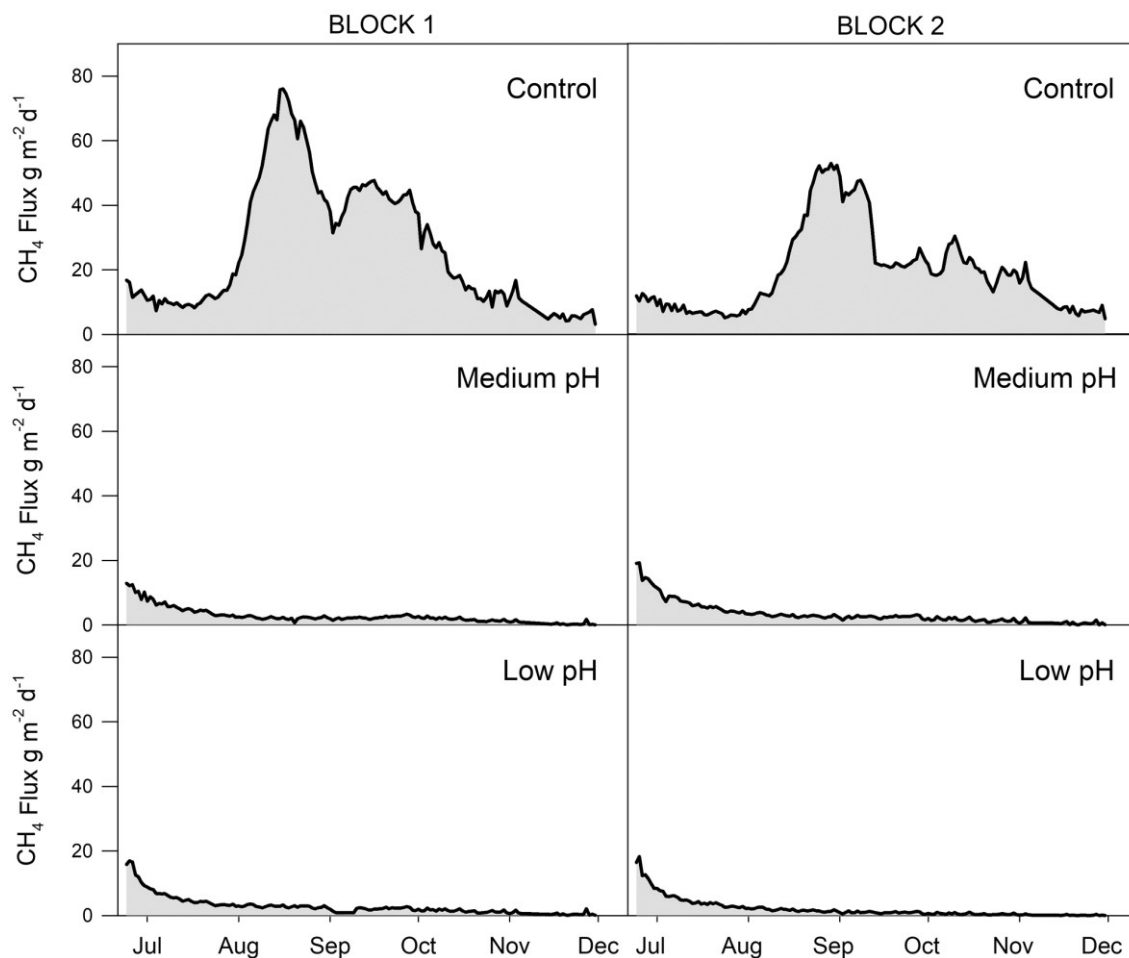


Figura 12. Emissioni medie giornaliere di metano ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) di ciascun tank durante l'intero periodo di monitoraggio (24 giugno - 1 dicembre 2017, 160 giorni) per il controllo, il trattamento a pH medio ($1,4 \text{ mL } 70\% \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ L}^{-1}$) e quello a pH basso ($2,4 \text{ mL } 70\% \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ L}^{-1}$) (Sokolov et al. 2019).

Protossido di azoto

Le emissioni totali di N_2O misurate nei 160 giorni dell'esperimento sono state di 1,27, 0,31 e $0,53 \text{ g/m}^2$ rispettivamente nel controllo, nel trattamento a pH medio e in quello a pH basso, con i due trattamenti che non sono risultati statisticamente differenti. L'assenza di crosta superficiale si è rivelato un fattore più importante del livello del pH nel determinare le emissioni di N_2O . I tank di controllo hanno mostrato un aumento dei flussi di N_2O dall'inizio di luglio fino a metà agosto, seguito poi da un ripido declino fino alla fine dell'esperimento. I contenitori dei due trattamenti non hanno mostrato questa tendenza, evidenziando come le diverse temperature stagionali non abbiano influenzato le emissioni di N_2O .

Ammoniaca

le emissioni totali di NH_3 misurate sono state di 641, 376 e 304 g/m^2 per controllo, medio e basso pH. Come nel caso delle emissioni di N_2O , la differenza tra i due trattamenti non è stata significativa, mentre è stata significativa la differenza tra i due trattamenti e il controllo, con le emissioni ridotte del 41 e 53% rispettivamente per i trattamenti a medio e basso pH. Dopo il trattamento, le emissioni di NH_3 sono diminuite considerevolmente (se comparate con il controllo non trattato), salvo poi crescere e decrescere seguendo il trend delle temperature stagionali. Alla fine dell'esperimento i trattamenti presentavano un pH simile che si attestava intorno a 6,5.

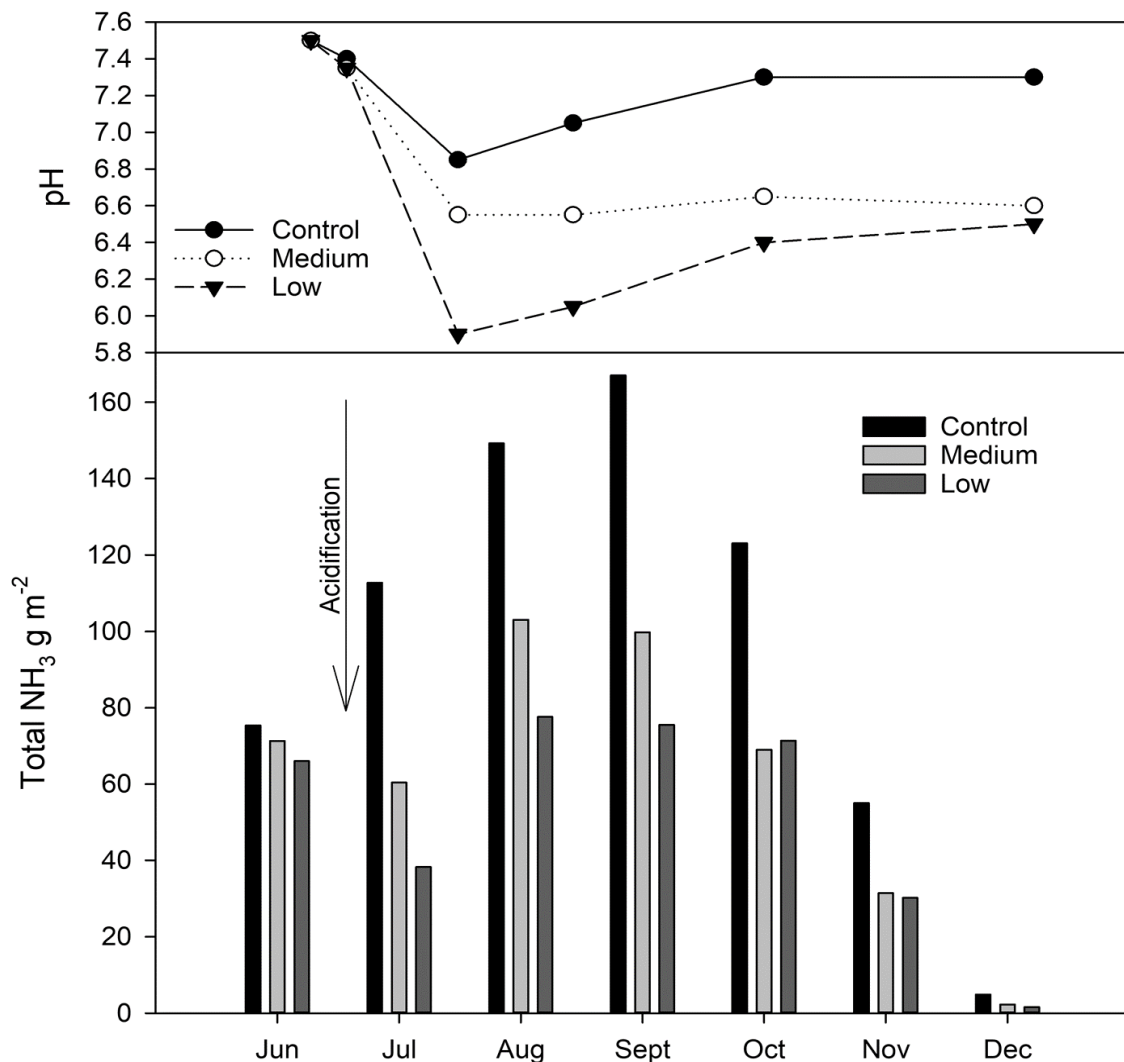


Figura 13. Emissioni totali mensili di NH_3 (g m^{-2}) e pH medio di ciascun tank per il controllo, il trattamento a pH medio (1,4 mL 70% H_2SO_4 L-1) e quello a pH basso (2,4 mL 70% H_2SO_4 L-1). Il mese di giugno include il periodo 10-23 giugno che rappresenta il momento precedente al trattamento di acidificazione, mentre gli altri mesi rappresentano effettivamente le medie mensili dal 1 luglio all'8 dicembre 2017 (Sokolov et al. 2019).

Emissioni di CO₂ equivalenti

In tutto, il trattamento a pH medio ha ridotto le emissioni totali di CO₂eq dell'85%, mentre il trattamento a basso pH dell'88% rispetto al controllo. In tutti e tre i casi, il metano è stato il gas che ha prodotto la maggior parte di CO₂eq, più precisamente il 96 e il 97% nel controllo e nel trattamento a pH medio. Il resto delle emissioni di CO₂eq proveniva da emissioni dirette e indirette di N₂O (<4%). Nel trattamento a basso pH, in totale l'N₂O ha contribuito al 14% dei CO₂eq, a causa della maggior riduzione delle emissioni di CH₄ (86%) (Sokolov et al. 2019).

| Greenhouse gas | Control | | Medium pH | | Low pH | |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | CO ₂ -eq | Proportion of total | CO ₂ -eq | Proportion of total | CO ₂ -eq | Proportion of total |
| | kg m ⁻² | % | kg m ⁻² | % | kg m ⁻² | % |
| CH ₄ | 91.0 | 96.5 | 12.3 | 97 | 9.7 | 86 |
| N ₂ O (direct) | 0.4 | 0.5 | 0.1 | 1 | 0.2 | 1 |
| N ₂ O (indirect) | 3.0 | 3 | 1.8 | 2 | 1.4 | 13 |
| Total | 94.4 | 100 | 14.1 | 100 | 11.3 | 100 |

Tabella 3. Emissioni totali di GHG durante i 160 giorni di monitoraggio di CH₄ e di N₂O dirette e indirette (provenienti dall'NH₃) per il controllo, il trattamento a pH medio (1,4 mL 70% H₂SO₄ L-1) e quello a pH basso (2,4 mL 70% H₂SO₄ L-1) su base CO₂eq. È presentata anche la proporzione di ciascun gas sulle emissioni totali (Sokolov et al. 2019).

5.8.4 Analisi dei costi

Dato che gli effluenti solitamente vengono sparsi all'inizio della primavera o in tardo autunno, durante l'inverno non è necessario acidificare gli effluenti nelle zone con climi più freddi, come ad esempio in Canada, dove è stato condotto l'esperimento. Il costo del trattamento è stato calcolato sulla base di una stalla di 150 vacche da latte, prendendo in considerazione il trattamento a pH medio (1,98 L 98% H₂SO₄/m³ effluente). La fattoria ha prodotto circa 25 m³ di effluenti per giorno, con un emissione annuale di 33 Mg CH₄ (1155 Mg CO₂eq). Prendendo in considerazione tre prezzi diversi per l'H₂SO₄, (stimati in Can\$200, 400 e 600 Mg⁻¹), il costo annuale dell'acido è risultato essere rispettivamente di Can\$983, 1970 e 2950 anno (Can\$ 6,55, 13,10 e 19,6 per ciascuna vacca). Sono stati anche ipotizzati dei crediti di carbonio (carbon credits) nel caso la riduzione delle emissioni di GHG fosse maggiore dell'85%. Tre possibili crediti sono stati pensati, dato che il prezzo del momento era di Can\$10 Mg⁻¹ CO₂eq e ci si aspettava che aumentasse a Can\$ 30 Mg⁻¹ CO₂eq entro il 2020 e a Can\$50 Mg⁻¹ CO₂eq entro il 2022. I guadagni stimati per i tre differenti crediti, ottenuta una riduzione delle

emissioni dell'85%, sono stati calcolati essere Can\$ 10.280, 30.480 e 51.400. Poiché diverse fattorie producono meno CH₄ grazie a ottime tecniche di management, sono stati calcolati i guadagni per i tre diversi crediti anche per riduzioni dell'85% rispetto a emissioni del valore di 16 Mg CH₄. I risultati sono stati di Can\$ 4980, 14.950 e 24.920 per i tre diversi prezzi dei carbon credits (Can\$ 200, 400 e 600). In ogni caso, i crediti di carbone sono stati maggiori dei costi dell'acido, con potenziali di guadagni che vanno da Can\$ 2000 a 50.000 (Sokolov et al. 2019).

5.8.5 Conclusioni

Tuttavia, questa analisi ha delle limitazioni: non include i costi di applicazione dell'acido, ossia le infrastrutture necessarie, il lavoro e i costi di acquisto di grandi quantità di acido (ad esempio spedizione via nave e costi di stoccaggio). Inoltre, ogni azienda avrà richieste differenti per quanto riguarda gli acidi a seconda del pH a cui vorranno portare gli effluenti e della capacità delle loro deiezioni di assorbire l'acido. Infine, lo studio è stato condotto riempiendo i tank in una sola operazione e l'acidificazione è stata eseguita una sola volta, mentre solitamente nelle aziende si ha un riempimento graduale delle vasche di stoccaggio e quindi sarebbe richiesta periodicamente un'aggiunta di acido (Sokolov et al. 2019).

5.9 Conclusioni e considerazioni

La gestione degli effluenti può ricoprire un ruolo molto importante nell'agricoltura odierna. Valorizzare maggiormente quelli che sono considerati dei sottoprodotti, può permettere di fare progressi sia nel campo della sostenibilità ambientale che economica. Tuttavia, come per l'alimentazione, il driver principale rischia di essere sempre il denaro; impianti quali, ad esempio, il biogas, possono portare svariati benefici all'azienda (entrate provenienti dalla vendita dell'energia e il digestato che possiede più azoto disponibile per le piante) ma richiedono un esborso iniziale ingente. Politiche e finanziamenti che agevolino la costruzione di queste strutture potrebbero dare una spinta decisiva in questo senso, dato che ad oggi solo le grandi aziende possono permettersi di costruire un impianto quale quello biogas con le proprie risorse (ovviamente nel caso di aziende più piccole gli impianti dovrebbero essere dimensionati

in base alle possibilità delle stesse). Da questo punto di vista, l'esperimento di Sokolov risulta molto interessante, in quanto dimostra come tramite l'emissione di crediti di carbonio si possa incentivare la costruzione di impianti per la gestione degli effluenti.

Una maggior applicazione degli effluenti in campo permetterebbe di ridurre l'impiego di concimi inorganici (aspetto da non sottovalutare nell'ottica della sostenibilità ambientale e del depauperamento della sostanza organica dei terreni) e di chiudere il "cerchio" del carbonio, dato che dopo il prelievo per nutrire gli animali, vi sarebbe il ritorno in campo della sostanza organica.

6 CONCLUSIONI GENERALI

Nell'allevamento intensivo odierno, la specializzazione ha raggiunto livelli molto alti, ma ancora molto può essere fatto. La formulazione delle razioni è uno degli aspetti a cui si presta più attenzione e su cui sono state effettuate più ricerche. La maggior concentrazione delle diete, però, non deve far dimenticare che i bovini sono in primo luogo ruminanti e che il rumine necessita di un certo quantitativo di foraggi (meno nutritivi dei concentrati) per funzionare correttamente. La somministrazione, dunque, di alimenti che migliorano l'efficienza alimentare e la produttività in diversi modi (foraggi con valori nutritivi maggiori, che aumentano l'ingestione e la digestione, tecniche di raccolta e di stoccaggio migliori, lavorazioni degli alimenti, additivi) è sicuramente uno dei metodi più accessibili e facilmente applicabili (previa la possessione di determinate conoscenze) nell'allevamento odierno.

La selezione genetica, pilastro ormai da decenni dell'allevamento intensivo, è forse ancora oggi il metodo più interessante per aumentare la produzione e l'efficienza degli animali.

Se però si considerano le emissioni di GHG, il vero fulcro di questa tesi, per efficienza bisogna intendere la riduzione del rapporto CH_4/ECM in base agli input, più che l'aumento di produzione. Come dimostrato da Knapp, tecniche di alimentazione e nutrizione, modificatori ruminanti, selezione genetica e tecniche gestionali, essendo spesso non additive, possono portare ad una riduzione del rapporto CH_4/ECM al

massimo del 15-30%, un valore non indifferente, ma che forse non è abbastanza grande se si pensa a tutti gli investimenti in ricerca necessari per ottenere questi risultati.

Molto interessante è l'allevamento estensivo, poco trattato e poco studiato ma che (dato il minor intervento umano che ha subito) presenta un potenziale di miglioramento notevole. Sia che si tratti di miglioramento genetico che di alimentazione, le possibilità di intervento sono molteplici, anche se difficili da applicare. Pensare, ad esempio, di seminare foraggi più nutrienti potrebbe essere un'idea molto interessante, ma sarebbe da verificare l'applicabilità di questa idea (il pascolo viene effettuato in terreni difficili da lavorare e di grandi dimensioni).

La gestione degli effluenti, invece, si prospetta forse ancora più interessante. L'acidificazione e la digestione anaerobica (più conosciuta nelle nostre zone) sembrano essere le due tecniche più promettenti per la riduzione delle emissioni di GHG, dato che permetterebbero non solo una produzione minore di sostanze inquinanti, ma anche di ottenere prodotti interessanti quali effluenti acidificati o digestato e metano (fonte di guadagno) che potrebbero essere utilizzati all'interno dell'azienda. Ovviamente il discorso degli effluenti è legato a ciò che avviene prima della produzione delle deiezioni e quindi all'alimentazione e alla nutrizione dei capi.

Sarebbe quindi importante, oltre che utile, riuscire ad associare la fase che riguarda l'alimentazione e la nutrizione con quella del trattamento degli effluenti, in modo da ottenere una sola grande catena di gestione delle emissioni di GHG e, possibilmente, una riduzione maggiore dell'impatto ambientale.

BIBLIOGRAFIA

- Beauchemin, K. A., M. Kreuzer, F. O'Mara, e T. A. McAllister. 2008. «Nutritional Management for Enteric Methane Abatement: A Review». *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48 (2): 21. <https://doi.org/10.1071/EA07199>.
- Bell, M.J., E. Wall, G. Simm, e G. Russell. 2011. «Effects of Genetic Line and Feeding System on Methane Emissions from Dairy Systems». *Animal Feed Science and Technology* 166–167 (giugno): 699–707. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.049>.
- Bittman, S., M. Dedina, C. M. (Clare) Howard, O. Oenema, e M. A. Sutton. 2014. *Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on*

- Reactive Nitrogen*. Edinburgh: Centre for Ecology & Hydrology, on behalf of Task Force on Reactive Nitrogen, of the UNECE Convention on Long Range transboundary Air Pollution.
- Bowen, Jenna M., Paul Cormican, Susan J. Lister, Matthew S. McCabe, Carol-Anne Duthie, Rainer Roehe, e Richard J. Dewhurst. 2020. «Links between the Rumen Microbiota, Methane Emissions and Feed Efficiency of Finishing Steers Offered Dietary Lipid and Nitrate Supplementation». A cura di Alex V. Chaves. *PLOS ONE* 15 (4): e0231759. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231759>.
- Capper, J. L., R. A. Cady, e D. E. Bauman. 2009. «The Environmental Impact of Dairy Production: 1944 Compared with 20071». *Journal of Animal Science* 87 (6): 2160–67. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-1781>.
- Garnier, Josette, Julia Le Noë, Audrey Marescaux, Alberto Sanz-Cobena, Luis Lassaletta, Marie Silvestre, Vincent Thieu, e Gilles Billen. 2019. «Long-Term Changes in Greenhouse Gas Emissions from French Agriculture and Livestock (1852–2014): From Traditional Agriculture to Conventional Intensive Systems». *Science of The Total Environment* 660 (aprile): 1486–1501. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.048>.
- Huhtanen, P., M. Rinne, e J. Nousiainen. 2009. «A Meta-Analysis of Feed Digestion in Dairy Cows. 2. The Effects of Feeding Level and Diet Composition on Digestibility». *Journal of Dairy Science* 92 (10): 5031–42. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1834>.
- IPCC, 2022. «IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf». s.d. Consultato 13 maggio 2023. https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.
- Johnson, K. A., e D. E. Johnson. 1995. «Methane Emissions from Cattle». *Journal of Animal Science* 73 (8): 2483–92. <https://doi.org/10.2527/1995.7382483x>.
- FAO, 2010. «k7930e00.pdf». s.d.
- Knapp, J R. 2014. «Invited Review: Enteric Methane in Dairy Cattle Production: Quantifying the Opportunities and Impact of Reducing Emissions» 97 (6).
- Lagrange, Sebastian, Karen A. Beauchemin, Jennifer MacAdam, e Juan J. Villalba. 2020. «Grazing Diverse Combinations of Tanniferous and Non-Tanniferous Legumes: Implications for Beef Cattle Performance and Environmental Impact». *Science of The Total Environment* 746 (dicembre): 140788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140788>.
- McLeod, A., e Food and Agriculture Organization of the United Nations, a c. di. 2011. *World Livestock 2011: Livestock in Food Security*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Moe, P W, e H F Tyrrell. 1979. «Methane Production in Dairy Cows» 62 (10).
- Mohankumar Sajeev, Erangu Purath, Wilfried Winiwarter, e Barbara Amon. 2018. «Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Different Stages of Liquid Manure Management Chains: Abatement Options and Emission Interactions». *Journal of Environmental Quality* 47 (1): 30–41. <https://doi.org/10.2134/jeq2017.05.0199>.
- Münger, A., e M. Kreuzer. 2006. «Methane Emission as Determined in Contrasting Dairy Cattle Breeds over the Reproduction Cycle». *International Congress Series* 1293 (luglio): 119–22. <https://doi.org/10.1016/j.ics.2006.01.072>.

- National Research Council (U.S.), a c. di. 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 7th rev. ed. Washington, D.C: National Academy Press.
- OECD e Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2022. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031*. OECD-FAO Agricultural Outlook. OECD. <https://doi.org/10.1787/f1b0b29c-en>.
- Oenema, O., H.P. Witzke, Z. Klimont, J.P. Lesschen, e G.L. Velthof. 2009. «Integrated Assessment of Promising Measures to Decrease Nitrogen Losses from Agriculture in EU-27». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133 (3–4): 280–88. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.025>.
- SCAHAW, 1999. «out21_en.pdf». s.d.
- ISTAT, 2022. «REPORT-CENSIAGRI_2021-def.pdf». s.d.
- Shabat, Sheerli Kruger Ben, Goor Sasson, Adi Doron-Faigenboim, Thomer Durman, Shamay Yaacoby, Margret E Berg Miller, Bryan A White, Naama Shterzer, e Itzhak Mizrahi. 2016. «Specific Microbiome-Dependent Mechanisms Underlie the Energy Harvest Efficiency of Ruminants». *The ISME Journal* 10 (12): 2958–72. <https://doi.org/10.1038/ismej.2016.62>.
- Sherlock, Robert R., Sven G. Sommer, Rehmat Z. Khan, C. Wesley Wood, Elizabeth A. Guertal, John R. Freney, Christopher O. Dawson, e Keith C. Cameron. 2002. «Ammonia, Methane, and Nitrous Oxide Emission from Pig Slurry Applied to a Pasture in New Zealand». *Journal of Environmental Quality* 31 (5): 1491–1501. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.1491>.
- Sokolov, Vera, Andrew VanderZaag, Jermaneh Habtewold, Kari Dunfield, Claudia Wagner-Riddle, Jason J. Venkiteswaran, e Robert Gordon. 2019. «Greenhouse Gas Mitigation through Dairy Manure Acidification». *Journal of Environmental Quality* 48 (5): 1435–43. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.10.0355>.
- St-Pierre, N.R., B. Cobanov, e G. Schnitkey. 2003. «Economic Losses from Heat Stress by US Livestock Industries». *Journal of Dairy Science* 86 (giugno): E52–77. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)74040-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)74040-5).
- CNR, 2007. «volume_clima_global.pdf». s.d.
- Wall, E., M.P. Coffey, e G.E. Pollott. 2012. «The Effect of Lactation Length on Greenhouse Gas Emissions from the National Dairy Herd». *Animal* 6 (11): 1857–67. <https://doi.org/10.1017/S1751731112000936>.
- Walsh, John J., Davey L. Jones, Gareth Edwards-Jones, e A. Prysor Williams. 2012. «Replacing Inorganic Fertilizer with Anaerobic Digestate May Maintain Agricultural Productivity at Less Environmental Cost». *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175 (6): 840–45. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200214>.
- Wang, Kaiying, Dandan Huang, Hongchuang Ying, e Haojie Luo. 2014. «Effects of Acidification during Storage on Emissions of Methane, Ammonia, and Hydrogen Sulfide from Digested Pig Slurry». *Biosystems Engineering* 122 (giugno): 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.03.002>.
- Weimer, P J. 1998. «Manipulating Ruminant Fermentation: A Microbial Ecological Perspective.» *Journal of Animal Science* 76 (12): 3114. <https://doi.org/10.2527/1998.76123114x>.