

1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA, ANIMALI, ALIMENTI,
RISORSE NATURALI E AMBIENTE

Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie Agrarie

Valutazione dell'impatto ambientale di bovine pure
Holstein e meticce tramite l'applicazione a livello
individuale di metodologie derivate da LCA

Relatore
Prof. Luigi Gallo

Laureando
Francesco Colpo
Matricola n. 2021756

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

INDICE

1. RIASSUNTO	3
2. ABSTRACT	4
3. INTRODUZIONE	5
3.1 Il comparto nazionale.....	5
3.2 Allevamento bovino e impatto ambientale.....	5
3.3 Effetto dei gas climalteranti	6
3.3.1 Anidride carbonica.....	7
3.3.2 Metano.....	7
3.3.3 Protossido di azoto	8
3.3.4 Ammoniaca, nitrati e fosforo.....	9
3.4 Consumo di suolo	10
3.5 Normative ambientali legate al settore zootecnico	11
3.6 La valutazione di impatto ambientale: il <i>Life Cycle Assessment (LCA)</i>	12
3.7 Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale negli allevamenti da latte	14
3.8 Il crossbreeding	16
4. SCOPO DELLA TESI.....	19
5. MATERIALI E METODI.....	20
5.1 Origine dei dati.....	20
5.2 Elaborazione dei dati	21
5.3 Durata della vita e produzione di latte in carriera.....	21
5.4 Stima del peso medio corporeo, del BCS e della cagliata fresca prodotta	22
5.5 Stima del fabbisogno energetico netto	22
5.6 Stima del peso e del valore delle carcasse delle singole bovine.....	23
5.7 Life Cycle Assessment.....	24
5.7.1 Inventario del ciclo di vita	25
5.7.2 Valutazione dell'impatto del ciclo di vita	27
5.8 Analisi statistica.....	27
6. RISULTATI.....	28
6.1 Vita della mandria, produzione di latte e tratti relativi alla condizione corporea ...	28
6.2 Categorie di impatto ambientale.....	32
7. DISCUSSIONE.....	38
7.1 Vita della mandria, produzione di latte e caratteristiche morfologiche.....	38
7.2 Impatto ambientale	39
7.3 Applicazione dell'LCA alla singola bovina in lattazione	40

8. CONCLUSIONE	42
9. BIBLIOGRAFIA	43
10. TABELLE	52

1. RIASSUNTO

Il settore del bovino da latte è sempre più sottoposto alla pressione dei media per l'impatto ambientale che esso presenta. È risaputo che l'allevamento sia causa della produzione di gas climalteranti, tra cui principalmente anidride carbonica, metano e protossido di azoto.

L'applicazione delle strategie attuate finora, volte a un aumento della produzione con una selezione spinta, grazie all'introduzione della genomica, ha portato alla luce problematiche di vario tipo, tra cui una riduzione della longevità e della fertilità. Tali condizioni obbligano gli allevamenti ad applicare un maggiore tasso di rimonta, con il conseguente aumento dell'impatto per l'allevamento degli animali giovani.

L'applicazione del crossbreeding a tre vie, nato per contrastare l'eccessivo aumento dell'inbreeding nelle bovine di razza frisona e basato sullo stesso concetto attuato nella creazione di ibridi per le coltivazioni vegetali, può rappresentare un'interessante soluzione per ridurre l'impatto ambientale.

La capacità delle bovine crossbred di produrre una quantità di latte simile alle Holstein, ma con un contenuto di solidi totali maggiore per lattazione, uniti alla maggiore longevità e alla maggiore fertilità portano questo schema di incrocio ad essere di interesse anche per i tipici areali italiani dove il latte viene principalmente trasformato in formaggi DOP.

Grazie alla minore massa magra rispetto alla massa corporea totale, le bovine CR presentano un minore fabbisogno energetico di mantenimento: tale fattore risulta essere il più interessante per l'abbattimento dell'impatto ambientale.

L'applicazione dell'LCA a livello di singolo individuo ha permesso dunque di valutare le emissioni per singolo gruppo genetico, confermando come le bovine Crossbred presentino un minore impatto ambientale per giorno di vita rispetto alle bovine Holstein in purezza.

2. ABSTRACT

The dairy sector is under increasing media pressure because of its environmental footprint. It's known that dairy farm causes the production of climate-changing gases, mainly carbon dioxide, methane and nitrous oxide.

The application of the strategy implemented, aimed at increasing production by means of selective breeding through the introduction of genomics, has brought to various problems, including a reduction in longevity and fertility. These conditions forces breeders to apply an higher rate of substitution, with a consequent greater impact of young animals.

The application of three-way crossbreeding, created to counteract the excessive increase in inbreeding in Holstein cows and based on the same concept implemented in the creation of hybrids for plant breeding, can be an interesting solution to reduce environmental impact.

The ability of crossbred cows to produce a similar amount of milk as Holsteins, but with a higher total solids content per lactation, combined with their longer longevity and higher fertility, make this crossbreeding scheme interest also for the typical Italian areas where milk is mainly processed into PDO cheeses.

Due to the lower lean mass in relation to total body mass, CR cows have a lower energy requirement for maintenance: this factor is the most interesting for the reduction of environmental impact.

The application of the LCA to the individual cow has made it possible to evaluate emissions per genetic group, confirming that Crossbred cows present a lower environmental impact per day of life than purebred Holstein cows.

3. INTRODUZIONE

3.1 Il comparto nazionale

In Italia il settore del bovino da latte include oltre 1,6 milioni di capi (Istat, 2021), la maggior parte dei quali situati nelle zone del Nord Italia dove viene principalmente applicato il sistema di allevamento di tipo intensivo. I motivi legati a tale localizzazione zootecnica sono dovuti principalmente alla presenza di contesti territoriali favorevoli in termini logistici, finanziari e di integrazione verticale (Crea, 2017).

Attualmente il settore zootecnico è in fase di ristrutturazione: il numero di allevamenti è in continuo calo, mentre stanno aumentando le dimensioni medie aziendali.

3.2 Allevamento bovino e impatto ambientale

È risaputo che l'allevamento di animali da reddito influisce in modo negativo sugli equilibri ambientali, tra i quali sono compresi la qualità dell'aria, la qualità delle acque, il suolo, la biodiversità e la qualità del paesaggio.

La crescente preoccupazione dell'opinione pubblica verso le tematiche ambientali e più nello specifico verso la sostenibilità ambientale delle produzioni animali, ha fatto emergere la necessità di attuare strategie volte a ridurre l'impatto ambientale dell'allevamento del bovino da latte.

Tra le principali preoccupazioni di tipo ambientale associate alle produzioni animali vi sono le emissioni di gas climalteranti (GHG), di ammoniaca (NH₃) e di nitrati (NO₃).

I GHG (*Greenhouse Gases*) comprendono principalmente l'anidride carbonica (CO₂), il metano (CH₄) e il protossido di azoto (N₂O). Questi gas sono in grado di trattenere le radiazioni terrestri all'interno dell'atmosfera, causando il cosiddetto "effetto serra".

L'ammoniaca, oltre ad essere precursore del protossido di azoto, viene coinvolta nei meccanismi che causano la formazione delle piogge acide e del particolato atmosferico PM_{2,5}.

I nitrati, oltre ad inquinare le falde acquifere riducendo la qualità e la sicurezza delle acque, concorrono al fenomeno dell'eutrofizzazione dei corpi idrici superficiali. Essi determinano un aumento della concentrazione di azoto permettendo la proliferazione di alghe. Quest'ultime, una volta consumato l'ossigeno presente vanno incontro a morte e

degradazione, con conseguente liberazione dei nitrati precedentemente assorbiti, i quali sono liberi di inquinare i corpi idrici più profondi a causa del fenomeno della lisciviazione. I nitrati contribuiscono ancora, nel corso dei processi di nitrificazione e denitrificazione, alla liberazione di ossidi di azoto.

È stato stimato che il 20% delle emissioni totali di GHG è causato dall'allevamento di bovini da latte (Gerber et al., 2013). Le principali fonti di emissioni sono legate alla fermentazione enterica, che avviene nel rumine per i particolari meccanismi digestivi che caratterizzano i ruminanti e li portano a produrre acidi grassi volatili, necessari per il loro sostentamento. Il processo fermentativo, tuttavia, causa anche la produzione di metano, il quale presenta una capacità di impattare sull'ambiente di 25 volte superiore alla CO₂, seppure sia caratterizzato da una durata media in atmosfera nettamente inferiore a quella del protossido di azoto (IPCC, 2013).

L'allevamento intensivo, grazie all'applicazione di adeguate tecniche di nutrizione e al miglioramento genetico volto all'aumento della produzione per singolo capo, produce latte con il più basso impatto ambientale possibile (< 1,7 kg CO₂-eq/kg latte) se confrontato con altri sistemi di allevamento (Gerber et al, 2013).

3.3 Effetto dei gas climalteranti

Per capire meglio l'impatto dei singoli gas climalteranti è opportuno sapere che il riscaldamento globale causato è legato alla capacità delle molecole di quel gas di interagire con la radiazione terrestre, oltre che dalla quantità assoluta presente dello stesso.

Per effettuare una comparazione tra i diversi gas è necessaria l'applicazione di opportuni coefficienti di potenziale di riscaldamento, GWP (*global warming potential*) i quali sono espressi in equivalenti di CO₂ (CO₂-eq). L'applicazione di tali valori permette di rapportare l'effetto di ogni singolo gas a quello della CO₂, la quale presenta un valore standard pari a 1.

Secondo i dati della FAO (2013) le attività zootecniche incidono, nella produzione complessiva dei GHG di origine antropica, per il 14.5%. L'allevamento di bovini incide per il 65% sulle emissioni totali del settore. Nello specifico l'allevamento di bovini da latte comporta una emissione in atmosfera di GHG pari a 2128 milioni di tonnellate di CO₂-eq.

3.3.1 Anidride carbonica

L'anidride carbonica è il principale responsabile dell'effetto serra grazie a una concentrazione in atmosfera pari a 415 ppm (parti per milione) (NOAA, 2022).

Per quanto riguarda l'allevamento, le emissioni di anidride carbonica derivano direttamente dai processi respiratori come conseguenza delle attività metaboliche svolte dagli animali. Tale ammontare di CO₂, tuttavia, non viene preso in considerazione nemmeno nel protocollo di Kyoto in quanto si suppone che essa sia totalmente compensata dalla CO₂ atmosferica organicata dalle colture utilizzate come ingredienti nell'alimentazione animale.

Tra le produzioni indirette di CO₂ derivanti dal settore zootecnico sono da considerare lo sfruttamento di energia fossile ai fini della produzione industriale e del trasporto dei mezzi tecnici destinati all'attività zootecnica, quali concentrati, additivi, integratori, medicinali. Va inoltre considerata la produzione di anidride carbonica derivante dall'uso di energia fossile per la produzione di prodotti fitosanitari e fertilizzanti utili per la coltivazione di alimenti destinati al bestiame. Kratz et al. (2006) sottolineano come più della metà del consumo di energia di una impresa zootecnica (comprendente energia elettrica e combustibili), sia legata alla produzione e alla conservazione dei prodotti vegetali destinati all'alimentazione degli animali (semina, raccolta, irrigazione, essiccazione, insilamento, ecc.).

La presenza di allevamenti intensivi comporta anche un cambiamento nella destinazione d'uso dei suoli. Il cambiamento della coltura presente, da un bosco o da un prato stabile, a seminativi, comporta una importante liberazione di carbonio nell'ambiente (IPCC, 2014), soprattutto nel caso in cui vengano applicate lavorazioni intensive per l'instaurarsi delle colture di interesse zootecnico. Il cambio d'uso del suolo non riguarda ovviamente solo l'ambito territoriale in cui insiste l'allevamento, ma anche le aree interessate dalla produzione di colture utilizzate nel razionamento degli animali ed importate all'interno dell'azienda dall'esterno (primario da questo punto di vista il ruolo della farina estrazione di soia).

3.3.2 Metano

Il metano rappresenta il secondo gas responsabile dell'effetto serra. Nonostante la sua concentrazione sia pari a 1906 ppb (parti per miliardo) (NOAA, 2022) e sia quindi notevolmente inferiore rispetto a quella dell'anidride carbonica, esso presenta un potenziale maggiore (pari a 28 volte quello della CO₂) nei confronti del riscaldamento globale (IPCC,

2013), ma una durata in atmosfera nettamente inferiore (12 anni rispetto ai 50-200 della CO₂) (Houghton et al., 1996).

Tale gas è emesso in molti processi naturali e di origine antropica: si stima infatti che circa la metà del metano emesso in atmosfera derivi da attività umane (IPCC, 2001). In particolare tra le varie fonti di metano, vanno segnalate le fermentazioni enteriche degli animali, soprattutto ruminanti, ma anche le risaie, le paludi, le discariche, gli oceani e la combustione di biomasse.

Di tutta la quota di GHG emessa dagli allevamenti di bestiame, pari al 14,5% (Gerber et al., 2013), l'allevamento della bovina da latte ne è responsabile per il 18,9%, emissioni derivanti principalmente dalla produzione di metano (van Middelaar et al., 2014).

La produzione di CH₄ a livello enterico deriva dalle fermentazioni microbiche dei carboidrati presenti nella razione alimentare degli animali (cellulosa, emicellulosa, pectine e amido). Tali processi, oltre ad avvenire nel rumine dei poligastrici e nel cieco dei monogastrici, derivano anche dalle defezioni stoccate (IPCC, 2006).

È noto come la fermentazione, soprattutto delle frazioni fibrose, comporti una perdita del 6% dell'energia ingerita proprio a causa della produzione di metano come sottoprodotto (Johnson e Johnson, 1995). Tuttavia, la metanogenesi è influenzata da molteplici fattori: oltre alla specie animale, all'indirizzo e al livello produttivo, sono importanti la composizione della razione alimentare, il tipo di carboidrati strutturali e non, il livello di ingestione, il grado di saturazione dei lipidi inseriti nella razione e fattori genetici quali l'efficienza di conversione degli alimenti (McAllister et al., 1995, 2006).

3.3.3 Protossido di azoto

Il protossido di azoto, con un potenziale di riscaldamento globale di 310 (CO₂/ Climate Report, 1997) e un tempo di permanenza in atmosfera di 120 anni (Houghton et al., 1996), è il terzo gas serra, presente nell'atmosfera a una concentrazione pari a 335 ppb (NOAA, 2022). Nonostante la sua bassa concentrazione, tale gas è responsabile dell'effetto serra (unitamente agli altri gas sopra citati) e dell'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico.

Il settore dell'allevamento è un produttore importante di tale gas: circa il 53% di quello prodotto dall'attività antropica deriva da questo settore (Gerber et al., 2013). La produzione è legata principalmente alla conservazione, manipolazione e utilizzo dei reflui prodotti in

allevamento e dipende dalla modalità e dalla durata di tali operazioni, oltre che dalla sostanza secca del refluo e dalla temperatura ambientale.

Affinché avvenga l'emissione di protossido di azoto è necessario che i reflui siano sottoposti inizialmente a una fase di aerobiosi. Questa condizione permette la conversione dell'urea secreta dagli animali in ammoniaca (NH_4^+) e successivamente in nitrati e nitriti. Il successivo processo, in condizioni di anaerobiosi, permette il processo di denitrificazione. In questo caso i nitrati e i nitriti prodotti precedentemente vengono convertiti in azoto molecolare (N_2), passando tuttavia per passaggi intermedi quali protossido di azoto e ossido di azoto, i quali si accumulano nel caso in cui il processo di riduzione non sia completo.

Oltre a tale fonte di N_2O , vanno considerate anche le quote derivanti dalla concimazione chimica dei terreni destinati alla produzione di alimenti per il bestiame: l'entità di tali emissioni dipende dalla strategia di distribuzione, dal momento di applicazione e dalle caratteristiche del fertilizzante di sintesi.

3.3.4 Ammoniaca, nitrati e fosforo

L'ammoniaca, presente sotto forma di gas a temperatura ambiente, presenta un notevole profilo circa il suo potenziale impatto sui sistemi ambientali. Tra le diverse vie di azione, l'ammoniaca è precursore del N_2O , ed è tra i maggiori imputati alla formazione del PM fine, oltre che a essere il precursore dell'acido nitrico, il quale contribuisce al fenomeno di acidificazione ed eutrofizzazione delle acque per deposizione umida o secca.

Le emissioni di ammoniaca derivano principalmente dall'agricoltura, nello specifico dallo stoccaggio e uso agronomico di reflui e fertilizzanti azotati: il 93% delle emissioni totali di ammoniaca in Europa deriva dall'agricoltura e si stima che circa i due terzi siano di origine antropica legate al settore zootecnico (EAA,2019). Allo stesso settore vanno attribuite anche le emissioni di ammoniaca derivate dall'uso di fertilizzanti di sintesi per le colture destinate all'alimentazione del bestiame.

I nitrati, particolarmente soggetti a lisciviazione nel suolo, possono contaminare le acque superficiali a seguito di spandimento errato o eccessivo dei reflui. Per ridurre tale situazione è necessario applicare una corretta gestione agronomica. Va inoltre considerato l'apporto di nitrati eseguito tramite le concimazioni di copertura con concimi di sintesi: una quota dell'N distribuito è infatti soggetto a percolazione ed è responsabile, insieme al P, dell'eutrofizzazione delle acque.

Generalmente l'80% del fosforo fornito alle bovine da latte con la nutrizione viene escreto (Mikkelsen, 2000) e viene distribuito negli appezzamenti dedicati alla produzione di alimenti per il bestiame tramite lo spargimento dei reflui. L'applicazione di reflui zootecnici sottoforma di liquame, tuttavia, potrebbe presentare alcune problematiche per la gestione del fosforo. Infatti, la movimentazione del P avviene principalmente attraverso il deflusso superficiale, accompagnato da erosione del suolo. Il fosforo, in soluzione nell'acqua presente nel suolo, viene così liberato: viene disciolto il fosforo solubile e parte del fosforo inorganico adsorbito. Tale fenomeno, seppur non presenti un rischio per l'uomo, comporta una contaminazione delle acque, aumentando il rischio di eutrofizzazione in relazione alle caratteristiche idrogeologiche del territorio (Winthers e Sharpley, 1995).

3.4 Consumo di suolo

L'effetto delle attività zootecniche sui suoli è noto: coinvolge processi quali desertificazione, erosione, riduzione del contenuto di sostanza organica, compattazione e salinizzazione, i quali possono portare tutti ad una perdita delle principali funzioni svolte dal suolo in quanto tale (Commissione ASPA, 2009).

Questi processi di degrado possono essere innescati da errate pratiche agricole per la produzione di alimenti destinati al bestiame (eccessiva concimazione, monocoltura), per l'adozione di sistemi di pascolamento non razionale o per la deforestazione (fenomeno molto accentuato in Sud America). Il sovrapascolamento, come riportato da Steinfeld et al. (2006) è causa della degradazione del 20% dei suoli, soprattutto nelle zone aride.

L'intensificazione delle attività zootecniche si associa in genere all'intensificazione dell'attività agricola: ciò comporta un aumento dell'utilizzo di reflui e fertilizzanti, talvolta distribuiti in quantità eccessiva. L'eccessiva distribuzione di nutrienti, se immobili, possono causare modificazioni alla struttura e caratteristiche del suolo; se mobili possono invece causare inquinamento delle falde e favorire il processo di eutrofizzazione.

Non va inoltre dimenticato che in zootecnia vengano utilizzati integratori, additivi alimentari e medicinali veterinari (Halling-Sorensen et al., 1998), il cui impatto ambientale non è ancora stato ben definito.

3.5 Normative ambientali legate al settore zootecnico

Il settore zootecnico, con l'aumento dell'interesse dell'opinione pubblica sull'impatto ambientale, è stato soggetto a diverse normative di stampo europeo e italiano al fine di minimizzare l'impatto che un allevamento ha in termini direttamente ambientali e agli occhi del consumatore.

Prima fra tutte è la direttiva Nitrati (91/676/CEE), emanata dall'Unione Europea e poi recepita dall'Italia con il D. Lgs 152/99. In seguito, con il D.M. 152/2006 vennero stabiliti i criteri e le norme tecniche delle attività di utilizzazione agronomica e della gestione degli effluenti e delle acque reflue di origine zootecnica, in ottemperanza agli obblighi comunitari imposti dalla direttiva. L'applicazione della direttiva ha imposto, inoltre, l'individuazione di zone vulnerabili (ZVN) ai Nitrati, le quali presentano acque già contaminate o che potrebbero diventare tali senza l'adozione di adeguate tecniche colturali, ove l'impiego massimo di effluente zootecnico comporta un apporto non superiore ai 170 kg di azoto per ettaro. Nelle aree così definite vanno messi in atto i "codici di buona pratica agricola", i quali stabiliscono le quantità applicabili di fertilizzanti, reflui zootecnici e la modalità di stoccaggio.

A partire dal 2022 la Regione Veneto con il DGR 813/2021 ha imposto, oltre alla compilazione del Piano di Utilizzazione Aziendale (PUA), già compilato dalle aziende con suoli in ZVN, la creazione del Registro di concimazione anche per le zone non vulnerabili. Lo scopo di tale normativa è quello di applicare i codici di buona pratica agricola, per tutte le aziende zootecniche, anche nelle zone non vulnerabili.

Inoltre, a partire da luglio 2018, lo Stato italiano ha recepito la direttiva 2016/2284 relativa alla riduzione delle emissioni atmosferiche di inquinanti in atmosfera associate ad attività umane. Tra gli obiettivi della direttiva va sottolineato quello riguardante la riduzione delle emissioni di SO₂, NO_x, NH₃ e particolato fine (PM_{2,5}). Ciò rende necessaria l'elaborazione e successiva attuazione di programmi a livello nazionale di controllo e monitoraggio dell'inquinamento atmosferico. Gli Stati europei hanno elaborato perciò un "codice nazionale indicativo di buone pratiche agricole" per verificare le emissioni di NH₃ derivanti dai sistemi di stoccaggio e spandimento del letame, dall'alimentazione e stabulazione dei capi.

A livello nazionale si è provveduto alla redazione di linee guida, accordi quadro e interventi normativi a carattere interregionale, tra cui l'Accordo di Bacino Padano tra Ministero per

l'Ambiente e Regioni a maggior vocazione zootecnica e agricola, quali: Lombardia, Piemonte, Veneto ed Emilia-Romagna, dove si sottoscrive l'impegno di adottare misure congiunte per il miglioramento della qualità dell'aria attraverso delle strategie a breve-medio- lungo termine. In tale contesto, la zootecnia risulta contribuire alla formazione del particolato secondario derivante, ad esempio, dall'ossidazione degli idrocarburi e ricombinazione dei composti a base di azoto e zolfo. Le misure applicabili dalle attività zootecniche, mirando al contenimento di NH₃, si rivolgono alla gestione degli stoccaggi dei liquami cui segue un corretto spandimento ed interrimento dei reflui.

3.6 La valutazione di impatto ambientale: il *Life Cycle Assessment* (LCA)

Il Life Cycle Assessment (LCA) è una metodologia che permette lo studio integrato dell'impatto ambientale legato al ciclo di vita di un prodotto, merce o servizio, applicando un approccio che comprende tutte le fasi, dall'estrazione e lavorazione delle materie prime fino allo smaltimento del prodotto stesso.

Secondo quanto stabilito dalle norme ISO 14040 e 14044 (ISO, 2006) il metodo è standardizzato ed è applicabile a molte filiere produttive. Attualmente è raccomandato anche dalle istituzioni pubbliche (Commissione Europea, 2016) per esprimere l'impatto ambientale di vari fattori produttivi, tra cui anche gli allevamenti.

L'analisi LCA viene definita nella ISO 14040:2006 come una "compilazione e valutazione degli input, output e dei potenziali impatti ambientali di un sistema di prodotti durante tutto il suo ciclo di vita". Tale sistema di valutazione di impatto ambientale è un valido supporto per identificare, quantificare e valutare le performance di un prodotto o di un servizio individuando tutte le fasi del ciclo di vita che lo compongono, ponendo particolari attenzioni a possibili fasi migliorabili.

I principali punti di forza del metodo LCA risiedono nella sua capacità di fornire una valutazione globale dei processi produttivi, riuscendo a identificare le misure che si limitano a spostare i problemi ambientali da una fase all'altra del ciclo di vita (MacLeod et al., 2013).

Secondo la FAO (2016), l'LCA è riconosciuto come una delle metodologie più complete e corrette per la valutazione dell'impatto ambientale di prodotti e processi. Tuttavia la sua applicazione in ambito agricolo risulta spesso complessa a causa della multipla natura della produzione (es. Carne, latte, reflui zootecnici). Ciò implica che l'impatto ambientale della

produzione deve essere ripartito tra tutte le uscite utilizzando l'espansione o l'allocazione del sistema (MacLeod et al., 2013).

L'applicazione del sistema "LCA" prevede 4 fasi:

1) Definizione dell'obiettivo e dell'ambito di applicazione

In tale fase preliminare viene definito il sistema preso in considerazione, elencando le categorie da sottoporre ad analisi. La scelta del campo di applicazione comporta l'approfondimento delle funzioni del sistema prodotto, dell'unità funzionale, dei confini del sistema e della qualità dei dati. La UNI EN ISO 14040 definisce il "sistema prodotto" come l'insieme elementare di unità di processo, connesse tra loro per quanto riguarda materia ed energia, che perseguono una o più funzioni definite. Il sistema è suddiviso in unità di processo, ognuna delle quali contiene tutte le attività relative a una singola o ad un gruppo di operazioni. L'unità funzionale indica il prodotto, il servizio o la funzione in sé su cui impostare l'analisi rappresentando l'unità di misura del nostro studio su cui tutti gli input e output saranno normalizzati.

I confini del sistema rappresentano le unità di processo che vanno incluse nell'analisi LCA. Per delinearli si considerano i flussi in entrata e in uscita: acquisto di materie prime, gestione dei rifiuti, processi di fabbricazione, uso e produzione di energia e combustibili ed infine uso e manutenzione del prodotto.

Per ottenere una buona analisi LCA è necessario che i dati raccolti siano di alta qualità e che siano rappresentativi della realtà.

2) Inventario del ciclo di vita

È la fase più delicata per effettuare una corretta analisi. Essa è costituita dall'acquisizione e organizzazione di tutti gli input e output, sia produttivi sia di impatto, osservati in relazione alle singole fasi destinate alla produzione di un prodotto e all'insieme delle attività interne ai confini del sistema. Il problema dell'allocazione dei singoli flussi in entrata e in uscita delle unità di processo si ha nel momento in cui vengono ottenuti più prodotti da un unico processo o nel momento in cui vengano riciclati dei prodotti intermedi. Pertanto i flussi di materia ed energia devono essere allocati ai differenti prodotti secondo procedure ben definite (Hauschild et al., 2018).

3) Valutazione dell'impatto del ciclo di vita

In questa fase si applica a ogni flusso di prodotto dell'inventario un contributo all'impatto ambientale. Tale valutazione evidenzia l'entità della modificazione ambientali derivate da emissione e consumo di risorse derivanti dalla produzione.

L'impatto viene quantificato attraverso l'applicazione di fattori di caratterizzazione in modo da inserire gli effetti ambientali per ogni categoria prescelta uniformando gli output a una stessa unità di misura (es. I gas climalteranti sono riportati in CO₂ – eq). Dalla caratterizzazione deriva il profilo ambientale per ogni categoria, il quale viene rappresentato tramite un istogramma a barre.

4) Interpretazione dei risultati

Al termine dell'analisi si giunge alla traduzione e all'interpretazione dei risultati derivati dallo studio verificando il raggiungimento degli obiettivi inizialmente fissati, della qualità dei dati e i limiti del sistema.

3.7 Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale negli allevamenti da latte

Il settore zootecnico da latte impatta a livello ambientale su vari settori, tra i quali la produzione di GHG, l'inquinamento delle acque di falda, il consumo di suolo e la perdita di nutrienti in aria, oltre a influire negativamente sui fenomeni dell'eutrofizzazione e dell'acidificazione (Froldi et al., 2022). La produzione di latte e l'industria ad essa correlata sono responsabili del 4% delle emissioni totali di GHG nel mondo e in Italia del 3-5% (Dalla Riva et al., 2017).

Tra i GHG maggiormente prodotti dall'allevamento il metano la fa da padrone. La necessità di raccogliere dati il più qualitativi possibili per l'analisi dell'LCA per capire al meglio i punti critici della produzione di latte, ha portato a un approfondimento dei sistemi di stima della produzione di tali gas climalteranti. A partire dal 2012 infatti, Dehareng et al. hanno dimostrato come sia possibile stimare la produzione di CH₄ di un singolo capo bovino partendo da un semplice campione di latte tramite la tecnologia del medio infrarosso. Tuttavia, tale applicazione riscontra difficoltà nel suo utilizzo: l'attendibilità dell'analisi è

fortemente legata ai giorni di lattazione della bovina e al profilo degli acidi grassi presenti nel campione di latte (Dehareng et al., 2012).

Grazie ai maggiori sviluppi di queste tecnologie è quindi possibile attuare delle tecniche atte a ridurre l'impatto ambientale della produzione di latte.

L'applicazione di un sistema di produzione di tipo intensivo, come quello attuato tipicamente in pianura padana, permette di ridurre l'impatto ambientale a livello di “*farm gate*” per kg di latte prodotto. L'applicazione di un approccio basato sull'efficienza produttiva intesa come kg di latte prodotto per kg di sostanza secca ingerita è indice di una alimentazione e di una selezione genetica adeguata che comporta una riduzione dell'impatto ambientale (Guerci et al., 2013; Bava et al., 2014).

L'uso di sottoprodotti (distiller di frumento e colza) permette di ridurre ulteriormente l'impatto degli allevamenti da latte in quanto essi consentono una riduzione del suolo necessario per la produzione di alimenti destinati agli animali (-35%), una minore impronta carbonica (-20%) e un minore potenziale di eutrofizzazione (-20%) (Lindberg et al., 2021).

Grossi et al. (2021) hanno dimostrato inoltre, come la parziale sostituzione di farina estrazione di soia con urea a lento rilascio, abbia portato a un miglioramento delle performance in allevamento, impattando positivamente sulla produzione di latte con una minore ingestione di sostanza secca. Tale fenomeno ha permesso di aumentare l'efficienza di conversione da 1,54 a 1,7 con una conseguente riduzione dell'impatto ambientale per kg di latte prodotto, come spiegato da Guerci et al., (2013) e Bava et al. (2014). Van Middelaar et al. (2014), hanno osservato inoltre che l'uso di urea a lento rilascio, associata all'utilizzo di prodotti derivanti da lino estruso e associata a una migliore digeribilità della frazione foraggera (Eugène et al., 2021) comportano una ulteriore riduzione nella produzione di GHG.

Tuttavia, oltre a tutte le strategie applicate a livello strettamente ambientale, occorre anche considerare se sia possibile agire tramite la selezione genetica, assegnando gli effetti ambientali a specifici caratteri di selezione.

La selezione genetica rappresenta una soluzione ad elevato interesse in quanto tutti i cambiamenti ottenuti tramite essa sono cumulativi e permanenti (Lassen and Difford, 2020).

Molti sono i miglioramenti genetici volti a contrastare le conseguenze causate dai GHG a livello ambientale, tra cui la selezione per la resistenza allo stress da caldo o l'applicazione

del crossbreeding per migliorare l'adattabilità a condizioni avverse (IPCC, 2022) tuttavia non sono presenti studi riguardo a selezioni genetiche effettuate e che hanno dato un effettivo riscontro sul campo.

Haas et al. (2021) hanno provato ad inserire la produzione di metano come parametro economico all'interno dell'attuale indice di selezione tedesca, il quale contiene 15 tratti correlati alla produzione di latte, alla longevità, alla salute, alla fertilità, alla conformazione e alla *feed efficiency*. È stata considerata una ereditabilità di 0,21 per la produzione di metano enterico. L'inserimento della produzione di metano all'interno dell'indice di selezione attuale porterebbe a una riduzione del 24% della produzione di CH₄ entro il 2050.

La Holstein moderna, nonostante venga posta a forte pressione di selezione grazie alla genomica, si presenta come una bovina "fragile". Una possibile soluzione per ottenere bovine più longeve, sane, fertili e con un maggior ritorno economico per l'allevatore è l'applicazione del crossbreeding.

3.8 Il crossbreeding

Il valore del crossbreeding nelle specie allevate è riconosciuto da molto tempo: esso è un sistema già applicato per il miglioramento genetico di bovini destinati alla produzione di carne, di maiali e del pollame, anche se si sta insinuando lentamente nel mondo delle bovine da latte (Sørensen et al., 2008). In Danimarca già il 24% degli allevamenti da latte ha iniziato ad applicare tale sistema di incrocio (Sørensen et al., 2008).

Esso si basa sul concetto di "eterosi", il quale viene definito come un aumento delle performance dovuto a effetti genetici non additivi di dominanza ed epistasi (Shull, 1948). In soggetti crossbred c'è una maggiore possibilità che l'eterosi sia massima: ciò è dovuto al fatto che loci appartenenti allo stesso gene derivano da razze differenti.

Se le razze parentali hanno alleli diversi o frequenze alleliche diverse, la prole mostrerà dunque un maggior grado di eterozigosi rispetto agli incroci tra razze che presentano una frequenza allelica simile. Pertanto, come descritto da Mäki-Tanila (2007), l'eterosi aumenta con l'aumentare della distanza genetica e si riduce con l'aumentare della consanguineità tra le razze parentali. Il massimo grado di eterosi si ottiene sempre in F1, dove tutte le coppie di geni della prole avranno un gene di ciascuna delle due razze progenitrici.

In ambito animale il crossbreeding a tre vie è stato applicato da due aziende: Coopex Montbeliarde e Viking Genetics, con lo scopo di contrastare l'aumento della consanguineità

presente nella Holstein moderna e con l'obiettivo di creare animali più profittevoli per gli allevatori. La moderna selezione, basata sull'utilizzo della genomica, ha permesso di selezionare anticipatamente i tori che portano all'interno del loro genoma caratteristiche di rilievo per l'allevamento della bovina da latte. Tale selezione, tuttavia, ha causato una perdita di diversità genetica con un conseguente aumento dell'inbreeding (Makanjuola et al., 2020). Tale fenomeno porta a una riduzione della fitness degli animali allevati e a una riduzione dei tratti di interesse ereditati dalle figlie, a causa dell'accumulo di omozigoti recessivi.

L'applicazione del crossbreeding a tre vie, composto da Holstein (HO), Viking Red (VR) e Montbeliarde (MO), permette di affrontare questo problema, garantendo sempre un buon grado di eterozigosi, e sviluppando il cosiddetto vigore ibrido. Tale sistema sta ottenendo sempre più apprezzamento da parte degli allevatori, in quanto si ottengono bovine adatte a condizioni climatiche temperate (Shonka-Martina et al., 2019). La scelta di queste tre razze è legata a ciò che ogni razza apporta all'interno del piano di accoppiamento:

- la HO permette di ottenere una elevata produzione in termini di latte, kg di grasso e kg di proteina, mantenendo una statura media;
- La VR racchiude al suo interno le sub-popolazioni della Rossa Svedese, della Ayrshire finlandese e della Rossa Danese. Essa ha lo scopo di apportare facilità di parto, longevità, salute (Pryce et al., 2014) e di aumentare la quantità di solidi totali prodotti nel latte (grasso + proteina) (Jonsson, 2015);
- La MO apporta forza, fertilità e adattabilità ambientale. Inoltre apporta una massa muscolare maggiore, che influisce indirettamente e positivamente sul BCS (Montbéliarde, 2018).

Dall'unione di queste razze si ottengono bovine con un grado di eterosi variabile tra il 100% (nella F1) e l'86%, quando il piano di incrocio è avviato a pieno regime.

L'eterosi sviluppata dal piano di selezione permette di ottenere notevoli vantaggi all'interno dell'allevamento. Le bovine meticce presentano infatti una migliore fertilità rispetto alle Holstein in purezza, arrivando a un CR (*Conception Rate*) maggiore del 6% in prima lattazione, per poi aumentare con le successive. Inoltre, le bovine derivanti da crossbreeding presentano la necessità di 0,22 interventi in meno per gravidanza con la conseguenza di ottenere anche una riduzione dei giorni aperti, variabili tra i -9 e i -17 a seconda dell'ordine di lattazione (Hazel et al., 2020).

Le bovine meticce presentano anche un'età al primo parto minore rispetto alle holstein in purezza, con una differenza pari a -0.3 mesi; differenza che si ripercuote anche nelle successive lattazioni arrivando a un anticipo di 49 giorni nel momento del terzo parto. D'altro canto, la produzione di latte a 305 giorni è maggiore nelle frisone in purezza, le quali tuttavia producono gli stessi solidi (Grasso + proteina) delle bovine incrociate. Ciò indica che quest'ultime presentano titoli più elevati e di conseguenza permettono all'allevatore di compensare le perdite per minor latte prodotto con una maggiore qualità (Hazel et al., 2020).

Hazel et al. (2021) hanno notato come oltre all'anticipo dell'età al primo parto, le bovine cross presentino una maggiore efficienza alimentare con una conseguente riduzione del costo razione variabile tra $-\$0,042$ e $-\$0,359$.

La maggior ingestione delle bovine Holstein (Shonka-Martin et al., 2019), unita alle maggiori dismetabolie nel periodo di transizione (Mendonça et al., 2014), ai maggiori costi sanitari (Hazel et al., 2020) e la ridotta fertilità se confrontata con le meticce (Hazel et al., 2020) ne fanno una razza che probabilmente impatta maggiormente a livello ambientale.

La maggior ingestione delle bovine HO in purezza è legata principalmente alla diversa struttura delle bovine, intesa come massa muscolare, massa grassa e ossa. Come dimostrato da Agnev e Yan (2000), infatti, il mantenimento in termini energetici della massa proteica è maggiore rispetto a quello della massa grassa, la quale una volta creata non necessita di una quota energetica importante per il mantenimento. In questo senso le bovine Crossbred presentano una massa proteica corporea inferiore rispetto alle HO in purezza, che permette loro di richiedere una quantità di energia minore per il mantenimento. Inoltre, le bovine derivanti dal sistema di incrocio a tre vie presentano caratteristiche morfologiche diverse dalle HO in purezza, tra cui una minore altezza al garrese, una minore lunghezza del corpo e una minore circonferenza cardiaca, tutte caratteristiche che possono influenzare positivamente l'efficienza produttiva delle bovine (Saha et al., 2018).

4. SCOPO DELLA TESI

Lo scopo della tesi è quello di valutare se l'applicazione di uno schema di incrocio rotazionale a 3 vie, definito commercialmente ProCROSS, sia una possibile soluzione per ridurre l'impatto ambientale del settore del bovino da latte nelle principali pianure del Nord Italia.

In particolare, è stato valutato l'impatto ambientale a livello di singolo animale tramite metodologia LCA applicata a singoli individui, considerando un approccio centrato sui singoli gruppi genetici presi in analisi.

5. MATERIALI E METODI

5.1 Origine dei dati

I dati utilizzati per lo svolgimento di tale studio hanno coinvolto 791 bovine da latte, allevate in due distinti allevamenti situati nella pianura padana. Di questi allevamenti sono conosciute le informazioni riguardanti il gruppo genetico di appartenenza, la composizione del latte e la resa in cagliata, oltre alle misure corporee. In entrambe le aziende è stato seguito il seguente piano di accoppiamento:

- il seme VR è stato utilizzato per fecondare bovine HO in purezza per produrre la prima generazione F1 (VR x HO);
- il seme MO è stato utilizzato per fecondare le bovine F1 (VR x HO) per ottenere la progenie F2 MO x (VR x HO);
- il seme HO è stato utilizzato per fecondare le F2 per produrre la progenie di terza generazione F3 HO x [MO x (VR x HO)];
- la sequenza, in seguito, ricomincia per mantenere un elevato grado di eterosi.

In uno dei due allevamenti, tuttavia, è stato seguito anche un piano di accoppiamento differente:

- la progenie F1 è originata dall'incrocio di MO x HO;
- la progenie F2 è originata dall'incrocio di VR x (MO x HO);
- la progenie F3 è originata dall'incrocio di HOx [VR x (MO x HO)].

Il primo dei due allevamenti (A) è situato nella pianura lombarda, in zona Grana Padano DOP, mentre il secondo (B) è situato in Emilia-Romagna, in zona Parmigiano Reggiano DOP. Entrambi gli allevamenti gestiscono le bovine in gruppo unico, in stabulazione libera con zona di riposo a cuccetta e alimentate nello stesso identico modo. La composizione delle diete è riportata nella tabella 1.

5.2 Elaborazione dei dati

Per calcolare l'impatto ambientale di ogni singolo capo, il dataset di partenza è stato arricchito di informazioni aggiuntive quali:

- dati riguardanti i principali eventi, verificatisi per ogni singolo capo (data di nascita, parto, messa in asciutta e abbattimento o morte);
- dati sulla produzione e sulla qualità del latte dell'intera carriera produttiva (produzione, grasso, proteine).

Per ottenere il set finale dei dati, inoltre, sono state prese in considerazione solo le bovine che rispettavano determinate condizioni:

- abbattimento o morte entro la fine di aprile 2021 (data di conclusione dell'acquisizione dei dati) con all'attivo almeno 36 mesi di vita;
- informazioni complete sulla carriera produttiva (produzioni, contenuto di nutrienti del latte, date di asciutta e di parto);
- misurazioni complete su circonferenza toracica, altezza al garrese, lunghezza del corpo e BCS.

Dall'applicazione di tali condizioni è stato ottenuto un set comprendente 564 capi: 279 HO e 285 CR, suddivise nei due allevamenti.

5.3 Durata della vita e produzione di latte in carriera

Per quanto riguarda gli eventi che fanno capo al periodo di vita delle bovine, sono stati calcolati il periodo giovanile (data del primo parto – data di nascita), la longevità (data di macellazione o di morte – data del primo parto) e la durata della vita (data di macellazione o morte – data di nascita) per ogni singolo capo.

Inoltre, per ogni lattazione, i giorni in mungitura sono stati considerati uguali ai giorni in lattazione (DIM, *Days in Milk*), mentre il periodo di asciutta è stato calcolato come la differenza tra la data del parto successivo e la data di asciutta. Come conseguenza, il periodo in lattazione dell'intera mandria è stata calcolata come la somma di tutte le lattazioni, mentre il periodo improduttivo è stato calcolato come la sommatoria tra i giorni di asciutta di tutte le lattazioni, più il periodo giovanile.

La produzione di latte dell'intera carriera delle bovine (MYlife, *lifetime milk yield*) è stata calcolata come la somma del latte effettivamente prodotto da ogni bovina, durante tutte le lattazioni.

Grasso e proteine totali per ogni lattazione sono stati altresì calcolati moltiplicando la produzione di latte per i valori medi dell'intera lattazione. Da qui è stato possibile calcolare la produzione totale di solidi, sommando la produzione di grasso e proteine.

La produzione di latte, grasso e proteine per giorno di vita è stata calcolata dividendo la quantità totale prodotta per ogni tratto considerato per la durata della vita delle bovine.

Infine, la produzione di cagliata è stata ottenuta tramite l'applicazione del sistema 9-MilCA, descritto in dettaglio da Saha et al. (2020).

5.4 Stima del peso medio corporeo, del BCS e della cagliata fresca prodotta

Per stimare il peso corporeo (*BW*, *Body weight*) è stato utilizzato un modello di regressione multipla, basato sulle misure corporee prese in campo (altezza al garrese, circonferenza toracica, lunghezza del corpo) e su un subcampione di 227 bovine pesate realmente. Questi dati sono stati in seguito uniti all'ordine di parto e allo stadio di lattazione, in modo da ottenere una equazione in grado di prevedere il peso corporeo delle bovine in un determinato giorno.

In questo studio è stato preso in considerazione l'impatto ambientale di ogni singola bovina nella sua intera vita; tuttavia, tutte le informazioni relative all'aspetto morfologico riguardano uno specifico giorno, le quali sono state riportate all'intera carriera della bovina. Per tale motivo è stato stimato il peso medio corporeo dell'intera vita di ogni singolo animale, dalla data del primo parto alla data di morte/abbattimento (*BWCOW*) e dalla data di nascita alla data del primo parto (*BWHEI*) tramite l'applicazione di determinati coefficienti, variabili a seconda dello stadio di lattazione.

Una volta ottenuto il *BW* di ogni singolo capo per le diverse fasi di vita, è stato possibile stimare l'ingestione di sostanza secca (*DMI*) e il fabbisogno energetico netto per il mantenimento tramite un'equazione descritta all'interno del *NASEM* (2021).

La stima del *BCS* e della *CY* (*Cheese Yield*, resa in cagliata) dell'intera vita di ogni singola bovina è stata effettuata tramite l'applicazione dello stesso modello usato per la stima del *BW*.

5.5 Stima del fabbisogno energetico netto

Il fabbisogno di energia netta di ogni bovina è stato calcolato separatamente per ogni singola fase di vita (manza, bovina in lattazione e bovina in asciutta). Il fabbisogno giornaliero totale di energia è stato calcolato come la somma del fabbisogno per la crescita, la gravidanza (tramite le equazioni riportate nell'*IPCC* (2019)), la produzione di latte applicando le

equazioni del NASEM (2021) e per il mantenimento (per quest'ultimo applicando due approcci diversi).

Il primo approccio ha previsto il calcolo della NEm (energia netta di mantenimento) tramite l'applicazione delle procedure descritte nel NASEM (2021), utilizzando il BWCOW precedentemente calcolato per le vacche (in lattazione e in asciutta) e il BWHEI per gli animali giovani, dapprima convertiti in peso metabolico (MW) come segue:

$$\mathbf{NEm_mw} \text{ (MJ/d)} = 0.418 \times (\mathbf{BW}_{\text{COW/HEI}})^{0.75} \text{ (NASEM, 2021)}$$

In seguito, poiché la NEm giornaliera media per vacca è dovuta principalmente ai tessuti magri (Agnev e Yan, 2000; NASEM, 2021), sono state calcolate la massa grassa e la massa proteica corporea mediante le equazioni proposte da Fox et al. (1999) e modificate per essere riferite al BW e al BCS su una scala da 1 a 5.

Le equazioni risultanti sono le seguenti:

$$\text{Massa grassa corporea (pBfat, kg)} = (0.06171 \times \text{BCS} - 0.0308706) \times \mathbf{BW}_{\text{COW}};$$

$$\text{Massa magra corporea (pBprt, kg)} = (-0.01287 \times \text{BCS} + 0.170174) \times \mathbf{BW}_{\text{COW}}.$$

La massa magra è stata calcolata con tale equazione solo per il sottogruppo delle HO in quanto tutte le equazioni fanno riferimento a tale razza, la principale allevata al mondo.

Partendo dai risultati ottenuti tramite l'equazione, è stato comunque possibile trovare il valore di ENm necessaria per soddisfare il mantenimento di un kg di massa magra, dividendo il valore calcolato per i kg di massa magra delle bovine. Il valore ottenuto (0,631 MJ/kg di massa magra) ha permesso in seguito di calcolare i fabbisogni delle bovine meticce. Esso, infatti, è stato trattato come un coefficiente: dalla moltiplicazione di tale valore per la massa magra di ogni bovina delle diverse razze, è stato possibile calcolare un fabbisogno attendibile di energia netta di mantenimento legato alla massa proteica corporea (NEm_PM).

5.6 Stima del peso e del valore delle carcasse delle singole bovine

Il BW stimato al momento dell'abbattimento è stato considerato pari al BW stimato all'ultima lattazione effettuata da ciascuna bovina. Per ottenere il coefficiente di resa da inserire per stimare il valore delle carcasse, è stato diviso il peso delle carcasse (CW) per il BW stimato al momento dell'abbattimento. In seguito, è stata calcolata la media della resa di macellazione per ogni gruppo genetico (0,419 per le HO e 0,454 per le CR). Il coefficiente ottenuto è stato successivamente applicato per calcolare il peso della carcassa di ogni bovina. La CW ottenuta è stata confrontata con quella indicata da Piazza et al. (2022), ottenendo una differenza di $1,7 \pm 58,9$ kg.

Inoltre, da Piazza et al. (2022), è stato ricavato il valore delle carcasse, pari a € 1,89/kg per le HO e € 2,09/kg per le CR. Tali valori sono stati utilizzati per calcolare i valori delle singole carcasse.

5.7 Life Cycle Assessment

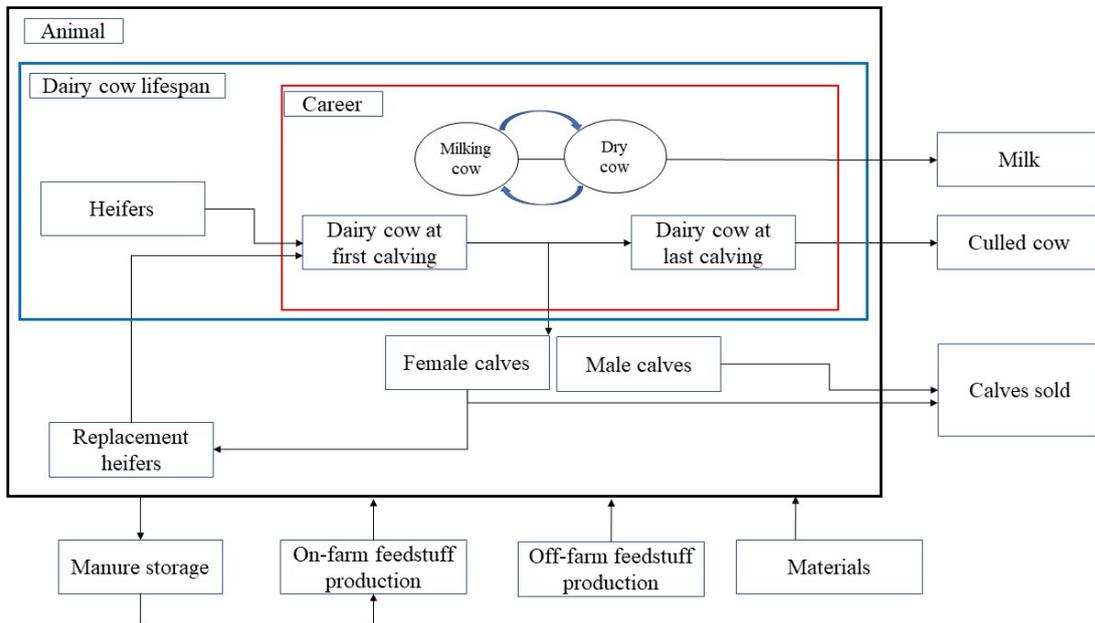
Il calcolo dell'impatto ambientale è stato basato sul protocollo ILCD (Commissione Europea, 2010). L'obiettivo dell'analisi LCA è stato quello di verificare l'effetto di uno schema di incrocio a rotazione di tre razze, rispetto a uno schema di accoppiamento in purezza HO sull'impatto ambientale. L'unità di riferimento del modello LCA è stata la singola bovina da latte. Sebbene la produzione di latte sia multifunzionale (in quanto viene prodotta anche carne e vitelli in eccedenza), l'intero impatto di tutte le operazioni necessarie e svolte per la produzione sono state assegnate al latte. Inoltre, sono stati adottati tre diversi tipi di unità funzionale (FU):

- il primo riguarda un punto di vista temporale, relativo alla durata della vita delle bovine, considerando come UF la durata della vita;
- il secondo riguarda un punto di vista produttivo (resa in kg di latte, in termini di solidi totali prodotti (grasso + proteina) e in cagliata fresca);
- il terzo riguarda un punto di vista economico, come UF è stato preso in considerazione un euro di reddito lordo e un euro di reddito oltre i costi di alimentazione (IOFC).

Sono state valutate quattro tipologie di impatto: il potenziale di riscaldamento globale (GWP, kg CO₂-eq), di acidificazione (AP, g SO₂-eq), di eutrofizzazione (EP, g PO₄-eq) e l'occupazione di suolo (LO, m²/a).

I confini del sistema (Figura 1) sono stati impostati in modo da includere l'impatto dovuto alla gestione della singola vacca da latte dalla nascita alla vendita o morte, all'allevamento della manza sostitutiva, alla gestione delle deiezioni, alla produzione di mangimi all'esterno dell'azienda e prodotti all'interno dell'azienda e consumati dalle bovine in lattazione o dalle manze, alla produzione e all'uso di fonti energetiche e di materiali di lettiera.

Figura 1. Limiti del sistema per il calcolo dell'impatto ambientale delle singole bovine da latte. In nero il confine del sistema (corrispondente al gruppo genetico di appartenenza delle bovine), in blu: intera vita della bovina, in rosso: bovina in lattazione.



5.7.1 Inventario del ciclo di vita

L'inventario per ogni singola bovina è stato costruito sulla base della raccolta di due diverse variabili: una basata sull'individuo (se riferito alla singola bovina da latte) e una sull'azienda (se riferito a tutte le bovine presenti nella stessa azienda).

La creazione dell'inventario riguardante le singole bovine è stato possibile applicando i dati elaborati come spiegato precedentemente, mentre l'inventario riguardante l'azienda è stato compilato sulla base di un questionario e di una visita aziendale.

I dati dell'azienda, comuni per tutte le bovine, comprendono informazioni relative alla composizione delle diete degli animali, alla produzione di alimenti in azienda (Tabella 2) e alla quantità di materiale di lettiera consumati.

L'assunzione giornaliera di alimento delle bovine in lattazione, delle bovine in asciutta e delle manze è stata calcolata come rapporto tra il fabbisogno energetico di energia netta (NE) e il contenuto di NE delle razioni (MJ/kg di ss, DM).

Il contenuto energetico e la composizione chimica delle razioni sono stati calcolati sulla base della composizione chimica dei singoli alimenti. I dati dei singoli alimenti sono stati ricavati da INRA (2019) e Sauvant et al. (2004), tranne che per i mangimi complessi, per i quali sono stati seguiti i dati forniti nelle etichette commerciali.

Il flusso di azoto (N) in entrata e uscita è stato calcolato tramite l'applicazione delle equazioni proposte da Katelaars e Van der Meer (1999) (Tabella 3). L'escrezione è stata calcolata come assunzione meno ritenzione.

L'assunzione è stata calcolata come:

$$(\text{assunzione di sostanza secca}) \times (\text{contenuto proteico della dieta}) \times 6,25.$$

La ritenzione è stata calcolata come segue:

$$(\text{ritenzione azotata nel latte (contenuto proteico/6,38)}) + (\text{ritenzione azotata per la crescita degli animali e per la gravidanza}).$$

I coefficienti applicati per stabilire la ritenzione azotata per la crescita e la gravidanza provengono da Katelaars e Van der Meer (1999).

Per quanto riguarda i calcoli relativi alle diverse voci di impatto ambientale, si è seguita la procedura che segue.

Gli impatti relativi alle diverse fasi della vita della bovina (manza e bovina in lattazione, comprendente una o più lattazioni, suddivise tra periodo in mungitura e periodo in asciutta) sono stati calcolati separatamente. La somma di tutti questi contributi ha permesso di stimare l'impatto ambientale di ogni singola bovina per la sua intera vita.

Per valutare il contributo che la singola bovina ha alla sua futura sostituzione, è stata calcolata una quota aggiuntiva di emissioni moltiplicando il valore totale ottenuto per 1,2 (il valore 1,2 deriva dal fatto che vengono considerate anche la mortalità e la selezione che viene effettuata tra le manze), dividendolo in seguito per il numero di lattazioni effettivamente svolte da ogni bovina.

Il metano, il protossido di azoto e l'anidride carbonica sono tutti gas inclusi nel calcolo del GWP.

Le emissioni di metano derivanti dalla fermentazione enterica sono state calcolate tramite l'equazione proposta da Ramin e Huhtanen (2013) (Tabella 4), mentre le emissioni di CH₄ e N₂O verificatesi durante lo stoccaggio delle deiezioni sono state basate sui dati forniti dall'IPCC (2019) (Tabella 5). Infine, le emissioni di N₂O derivanti dalle concimazioni applicate in area agricola sono state calcolate sempre tramite il protocollo fornito dall'IPCC (2019).

Il potenziale di acidificazione comprende l'emissione di ammoniaca (NH₃) e di ossidi di azoto, fenomeni collegati alla volatilizzazione dell'N.

Il calcolo dell'N volatilizzato durante la fase di gestione del letame è stato basato sul protocollo dell'Agenzia Europea per l'Ambiente (AEA, 2019), mentre quello avvenuto in campo è stato basato sull'IPCC (2019).

I composti lisciviati dell'N contribuiscono, insieme ai composti legati al P, all'eutrofizzazione. Le perdite di P durante la produzione di alimenti aziendali sono state calcolate tramite le equazioni proposte da Nemecek e Kägi (2007), mentre per la stima delle perdite di N per lisciviazione è stato applicato il protocollo dell'IPCC (2019).

Gli impatti relativi agli input acquistati all'esterno dell'azienda (alimenti, risorse energetiche, lettine, concimi chimici, prodotti fitosanitari, sementi) sono stati calcolati sulla base di fattori di impatto proposti da Werter et al. (2016).

5.7.2 Valutazione dell'impatto del ciclo di vita

Ogni composto emesso, associato alla categoria di impatto a cui può contribuire, è stato convertito in Co₂-eq tramite l'applicazione dei fattori di caratterizzazione.

I fattori di caratterizzazione per il GWP sono stati ricavati da Mhyre et al. (2013), mentre per AP, EP e LO dalla CML-IA (Oers, 2016).

Inoltre, in base alle diverse unità funzionali, sono state calcolate tali metriche:

- basate sulla dimensione temporale → ogni categoria di impatto è stata correlata all'intera vita della bovina e per giorno di vita
- basate sulla dimensione produttiva → ogni categoria di impatto è stata correlata per kg di latte prodotto, per kg di grasso e proteine e per kg di formaggio prodotto
- basate sulla redditività → ogni categoria di impatto è stata messa in relazione per unità di reddito lordo e per unità di reddito lordo oltre i costi alimentari (IOFC). In quest'ultimo caso l'IOFC poteva assumere valori negativi, per tale motivo è stato necessario invertire il rapporto per esprimere il livello di emissioni.

5.8 Analisi statistica

Tutti i dati relativi alla durata della vita, alla carriera, al peso, alla composizione corporea, alla produzione di latte e dei relativi solidi, a tutte le metriche relative all'impatto ambientale, sono stati analizzati mediante l'uso di un modello GLM (versione 9.4; SAS Institute Inc., Cary, USA) che includeva gli effetti fissi del gruppo genetico (2 gruppi, HO e CR), dell'azienda (2 classi, A e B) e dell'interazione azienda per gruppo genetico. Gli effetti sono stati dichiarati significativi per $P < 0,05$ e tendenziali per $P > 0,05$ ma $\leq 0,10$.

6. RISULTATI

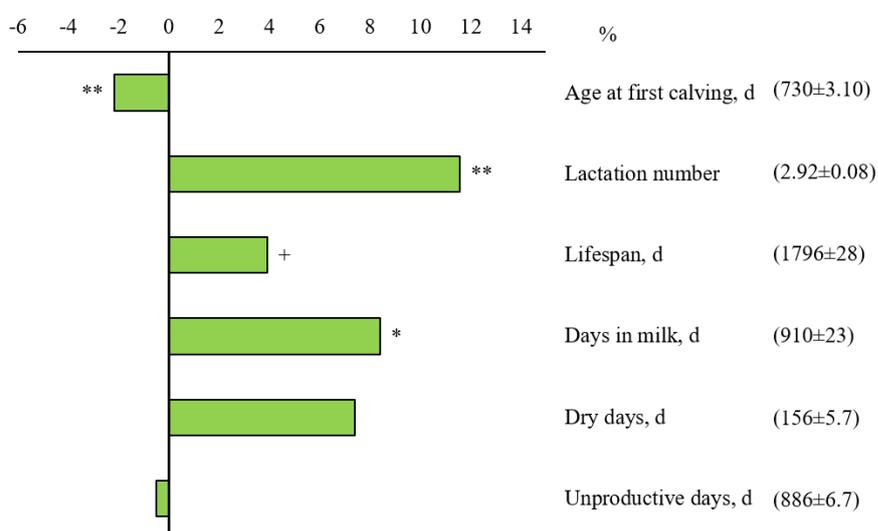
6.1 Vita della mandria, produzione di latte e tratti relativi alla condizione corporea

Le medie dei principali dati, le deviazioni standard e i risultati dell'ANOVA sono riportati nella tabella 6 (specifiche della vita della mandria), nella tabella 7 (dati relativi alla produzione di latte) e nella tabella 8 (dati relativi alle caratteristiche morfologiche).

In media le vacche hanno partorito per la prima volta dopo circa 24 mesi (coefficiente di variazione, CV: 9%); dalla nascita hanno effettuato poco più di 3 lattazioni, con una notevole variazione tra le bovine (CV: 42%). Le bovine hanno avuto una vita media di mandria di 1126 giorni, di cui circa l'85% in lattazione e il restante in asciutta, con una durata complessiva della vita di 1841 giorni. La mandria ha influenzato significativamente tutti i tratti relativi alla vita, mentre il gruppo genetico ha avuto impatto significativo su età al primo parto, numero di lattazioni e sulla quantità di giorni complessiva svolti in lattazione. Inoltre, il gruppo genetico presenta una tendenza a influenzare l'intera durata della vita delle bovine.

Nello specifico è possibile notare nella figura 2 come le vacche CR presentino un'età al primo parto anticipata rispetto alle HO (-2,2%), un numero di lattazioni maggiore (+11,3%) e una vita più lunga all'interno della mandria (+8,3%). Quest'ultimo dato determina di conseguenza anche una vita più lunga in termini percentuali pari al 3,9%.

Figura 2. Deviazione percentuale dei minimi quadrati delle bovine incrociate rispetto alle bovine Holstein per I tratti relative alla vita della mandria (tra parentesi sono indicate I dati medi delle bovine Holstein). Gli asterischi si riferiscono al grado di significatività (** P<0.01, * P<0.05, + P<0.1).



Per quanto riguarda la produzione (Tabella 7), le bovine presentano una produzione media di circa 31000 kg di latte nella loro carriera produttiva, associati a 2170 kg di solidi totali e 5200 kg di cagliata fresca, con una variabilità notevole compresa tra il 46 e il 48%.

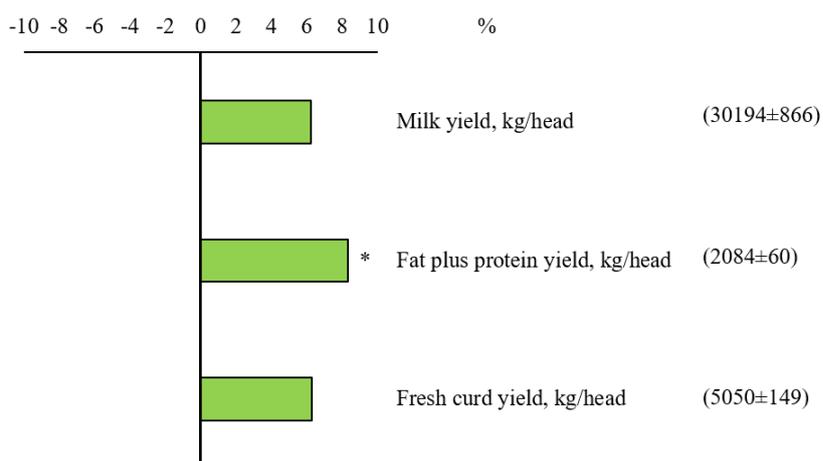
I dati analizzati per giorno di vita invece indicano una produzione di 16,1 kg con 1,1 kg di solidi totale e 2,7 kg di cagliata fresca, con una variabilità compresa tra il 24 e il 27%.

Il gruppo genetico ha influenzano in modo significativo la produzione di grasso + proteina nell'intera carriera produttiva della bovina (P<0,05) e tende a influenzarne la produzione per giorno di vita (P = 0,07).

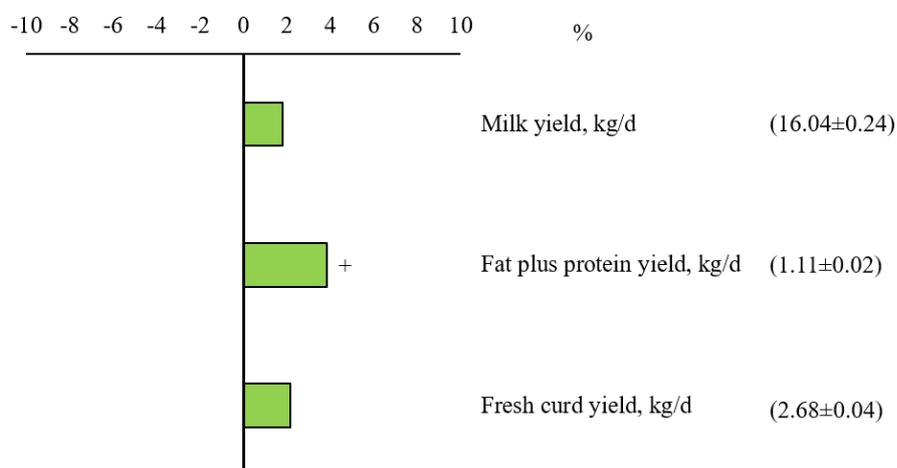
Rispetto alle HO (Figura 3a), le bovine CR evidenziano una produzione di grasso e proteine nel latte maggiore di quasi l'8% se riferita all'intera carriera produttiva e di quasi il 4% se riferita per giorno di vita (Figura 3b). Anche la produzione di latte e di cagliata sono nominalmente più alti nelle CR rispetto alle HO.

Figura 3. Deviazione percentuale dei minimi quadrati delle bovine incrociate rispetto alle bovine Holstein per i dati relativi alla produzione di latte, alla produzione di solidi totali (grasso + proteina) e alla produzione di cagliata fresca, riferita all'intera carriera produttiva (a) e per singolo giorno di vita (b) (tra parentesi sono indicate I dati medi delle bovine Holstein). Gli asterischi si riferiscono al grado di significatività (** P<0.01, * P<0.05, + P<0.1).

a) per carriera produttiva



b) per giorno di vita

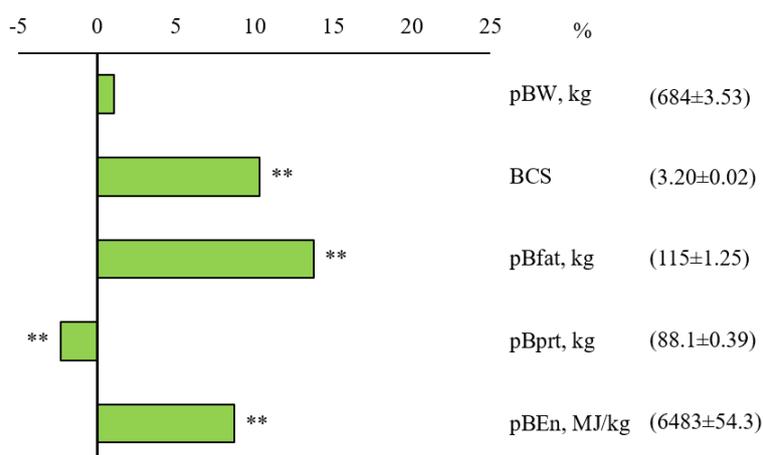


Il peso medio calcolato per le bovine durante la loro vita e il BCS sono stati rispettivamente 684 kg e 3,33, mentre le masse grasse e proteiche sono state di 120 e 87 kg.

L'ingestione di sostanza secca stimata è stata di 8 kg per le manze, 23 kg per le bovine in lattazione e 11 kg per le bovine in asciutta.

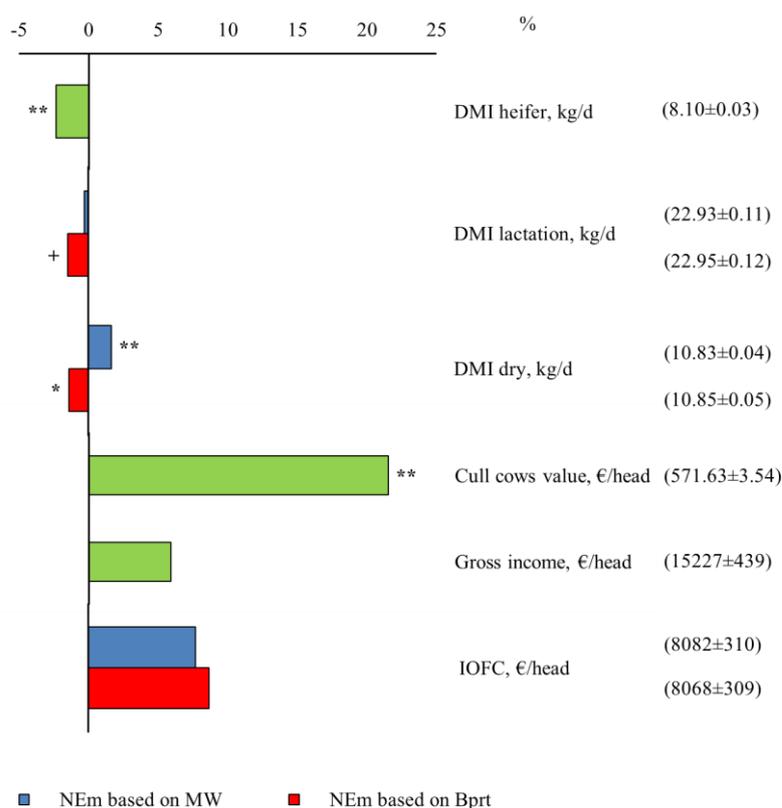
Le carcasse delle bovine presentavano un valore di circa € 632 (CV pari al 13%), le quali hanno contribuito al reddito lordo (€ 16000 per bovina) e al reddito al netto dei costi alimentari (€ 9000/capo). Il gruppo genetico ha influenzato la maggior parte dei tratti analizzati, a esclusione del BW medio, della DMI durante la lattazione e delle metriche relative al reddito (Tabella 8). In particolare, in Figura 4 è possibile notare come le bovine CR presentino un BCS maggiore (+10%), un contenuto energetico corporeo e un contenuto di massa grassa maggiori (+8,7 e +13,8%) e un contenuto proteico corporeo minore del 2,3% rispetto alle bovine HO.

Figura 4. Deviazione percentuale dei minimi quadrati delle bovine incrociate rispetto alle bovine Holstein per i dati relativi al peso corporeo stimato (pBW), al *Body Condition Score* (BCS), alla massa grassa (pBfat), alla massa magra (pBEn) e al contenuto energetico totale dell'animale. (tra parentesi sono indicati i dati medi delle bovine Holstein). Gli asterischi si riferiscono al grado di significatività (** P<0.01, * P<0.05, + P<0.1).



Le bovine CR (Figura 5) presentano una DMI minore durante la fase giovanile (-2%), mentre la variazione di DMI durante la fase di asciutta è legata al modo di calcolare la NEm. Infine, le vacche CR hanno raggiunto un valore più alto della carcassa (+21%) e tendono a fornire un valore più alto per il reddito lordo e per l'IOFC.

Figura 5. Deviazione percentuale dei minimi quadrati delle bovine incrociate rispetto alle bovine Holstein per i dati relativi alla sostanza secca ingerita (DMI) stimata dalle manze, dalle bovine in lattazione e dalle bovine in asciutta, per l'IOFC e per il reddito lordo, basato sulla stima tramite il peso metabolico (MW) e il peso proteico corporeo (Bprt), e dati relativi alla differenza di valore delle carcasse (tra parentesi sono indicati i dati medi delle bovine Holstein). Gli asterischi si riferiscono al grado di significatività (** P<0.01, * P<0.05, + P<0.1).



6.2 Categorie di impatto ambientale

I dati relativi a tale analisi derivano dalle tabelle dalla 9 alla 11; i dati sono stati calcolati per ogni categoria di impatto ambientale facendo riferimento ai valori di NEm legati al MW e alla massa proteica corporea.

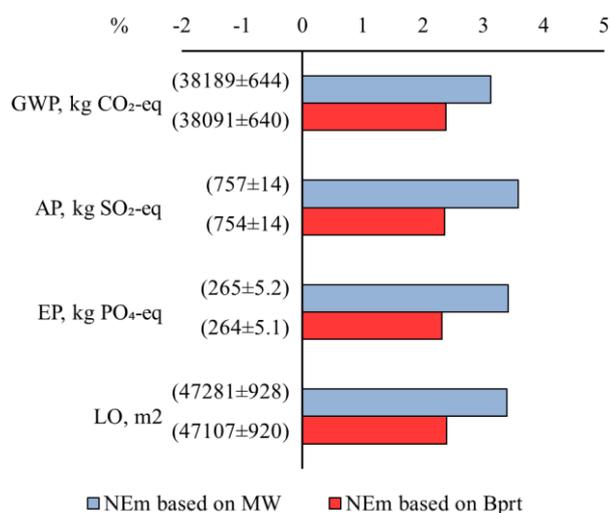
In media le emissioni prodotte durante l'intero ciclo di vita delle bovine sono state pari a 39000 kg di CO₂-eq, 780 kg di SO₂-eq e 280 kg di PO₄-eq, rispettivamente per GWP, AP ed EP, mentre l'occupazione complessiva di suolo è stata in media di circa 49500 m².

Le emissioni per giorno di vita sono risultate pari a circa 21 kg di CO₂-eq, 420 g di SO₂-eq e 150 g di PO₄-eq, mentre la quantità di suolo necessaria si è attestata a quasi 26,5 m².

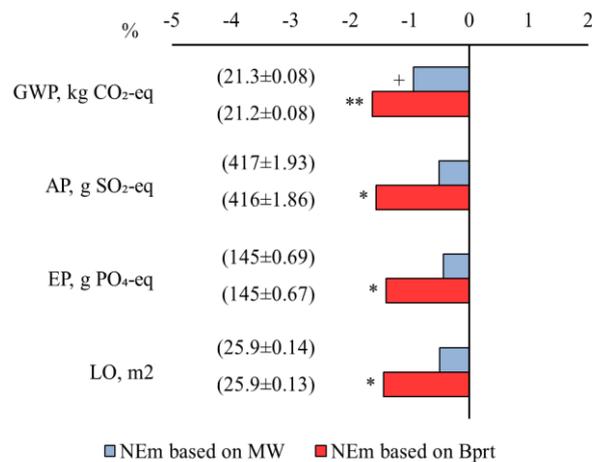
Il gruppo genetico non ha influenzato i valori di impatto per l'intera vita con entrambi i metodi di calcolo della NEm, tuttavia gli impatti, se calcolati sulla NEm derivante dalla massa proteica corporea e se riportati per giorno di vita, sono risultati diversi tra i due gruppi genetici. Le vacche CR in questo caso hanno dimostrato valori di impatto minori (-1,4% fino a -1,6%) rispetto alle HO (Figura 6).

Figura 6. Deviazione percentuale dei minimi quadrati delle bovine incrociate rispetto alle bovine Holstein per i dati relativi a GWP (potenziale di riscaldamento globale), AP (potenziale di acidificazione), EP (potenziale di eutrofizzazione), LO (occupazione di suolo), confrontati per durata della carriera produttiva (a) e per giorno di vita (b), calcolando i fabbisogni di NEm basandosi sul MW (peso metabolico) e sulla massa proteica corporea (Bprt) (tra parentesi sono indicati i dati medi delle bovine Holstein). Gli asterischi si riferiscono al grado di significatività (** P<0.01, * P<0.05, + P<0.1).

a) Impatto per tutta la carriera produttiva



b) Impatto per giorno di vita

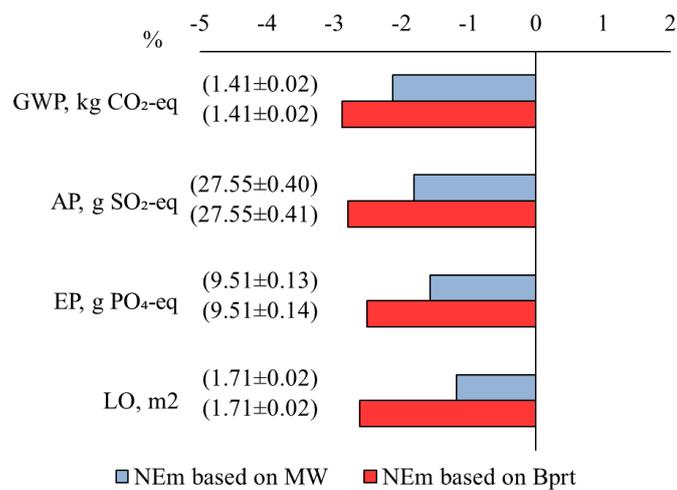


Per quanto riguarda le UF legate alla produzione (kg di latte prodotto, kg di solidi totali, kg di cagliata fresca), i valori medi di impatto riferiti a 1 kg di latte sono risultati pari a 1,4 kg di CO₂-eq, 27 g di SO₂-eq e 10 g di PO₄-eq, oltre a 1,7 m² di suolo occupato.

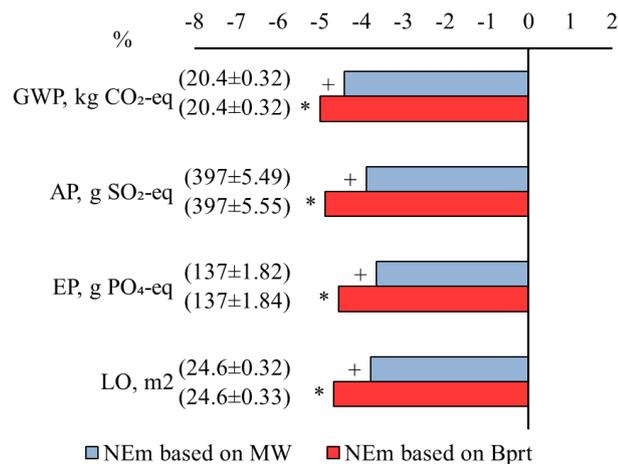
Rispetto alle HO (Figura 7), le CR presentano valori di impatto nominali minori statisticamente significativi per unità di solidi totale del latte. Inoltre, considerando il NEm_PM si nota una diminuzione tendenziale dei valori di impatto per tutte le categorie per le bovine CR rispetto alle HO, anche in riferimento alla cagliata prodotta.

Figura 7. Deviazione percentuale dei minimi quadrati delle bovine incrociate rispetto alle bovine Holstein per i dati relativi a GWP (potenziale di riscaldamento globale), AP (potenziale di acidificazione), EP (potenziale di eutrofizzazione), LO (occupazione di suolo), confrontati per kg di latte prodotto (a), per kg di solidi totali (grasso + proteine)(b) e per cagliata fresca prodotta (c), calcolando i fabbisogni di NEm basandosi sul MW (peso metabolico) e sulla massa proteica corporea (Bprt) (tra parentesi sono indicati i dati medi delle bovine Holstein). Gli asterischi si riferiscono al grado di significatività (** P<0.01, * P<0.05, + P<0.1).

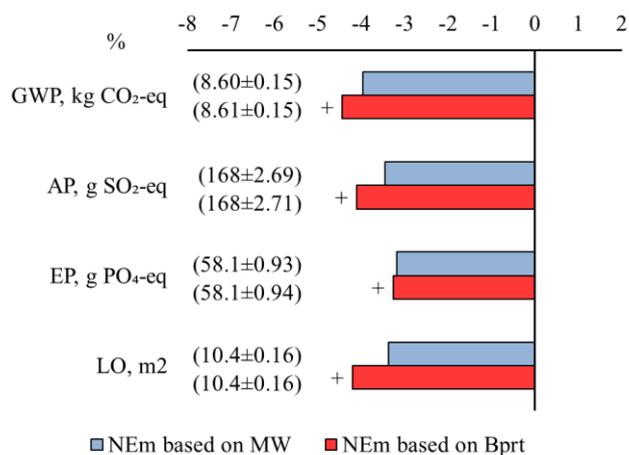
a) Impatto per kg di latte prodotto



b) Impatto per kg di grasso + proteine



c) Impatto per kg di cagliata fresca

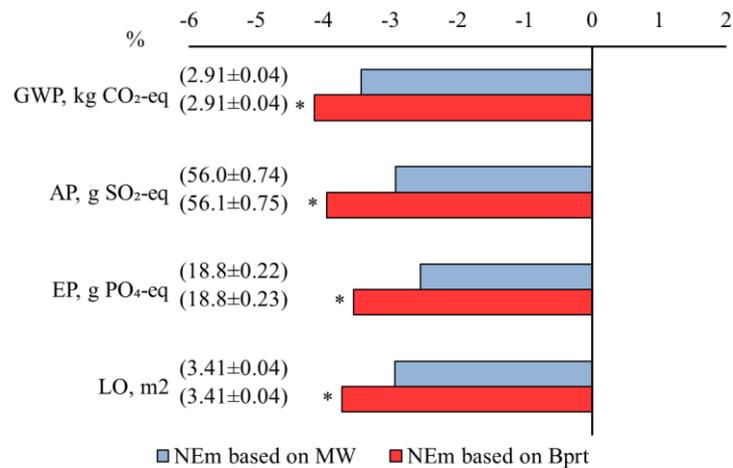


Considerando infine le metriche di impatto ambientale rapportate ai parametri legati al reddito, non sono presenti differenze statisticamente significative quando le emissioni sono calcolate basando la NEm sul MW, mentre sono presenti differenze quando le emissioni sono state calcolate basando la NEm sulla massa proteica corporea.

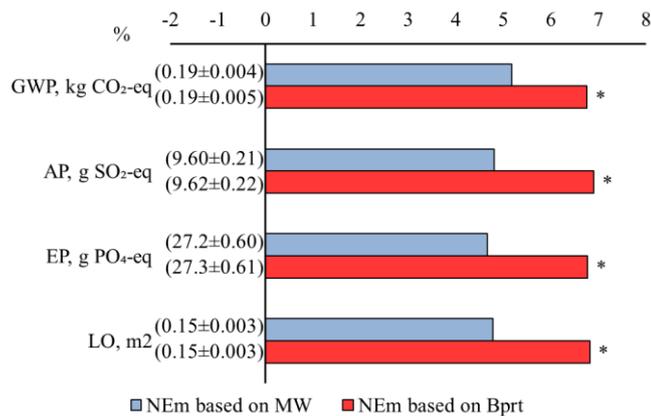
Le bovine CR hanno infatti evidenziato un impatto inferiore che raggiunge il 4% per € di ricavo lordo rispetto alle bovine in purezza (Figura 8a). Inoltre, hanno fornito un IOFC superiore di quasi il 7% per unità di impatto (Figura 8b).

Figura 8. Deviazione percentuale dei minimi quadrati delle bovine incrociate rispetto alle bovine Holstein per i dati relativi a GWP (potenziale di riscaldamento globale), AP (potenziale di acidificazione), EP (potenziale di eutrofizzazione), LO (occupazione di suolo), confrontati con il ricavo lordo (a) e per l'IOFC (b), calcolando i fabbisogni di NEm basandosi sul MW (peso metabolico) e sulla massa proteica corporea (Bprt) (tra parentesi sono indicati i dati medi delle bovine Holstein). Gli asterischi si riferiscono al grado di significatività (** P<0.01, * P<0.05, + P<0.1).

a) Impatto per € di ricavo lordo



b) IOFC per unità di impatto ambientale



7. DISCUSSIONE

7.1 Vita della mandria, produzione di latte e caratteristiche morfologiche

La prima fase di questo studio è stata necessaria per ottenere i dati utili per il calcolo delle diverse categorie di impatto ambientale. In tale fase sono state analizzate una serie di variabili volte a descrivere le prestazioni della bovina nella loro carriera e nella loro intera vita.

In particolare, i dati ottenuti hanno indicato come le bovine CR presentino una maggiore longevità produttiva e una maggiore durata della vita. Le vacche incrociate presentano una produzione di latte inferiore, ma un contenuto di solidi totale più elevato, come sostenuto da Malchiodi et al. (2014) e Shonka-Martin et al. (2019).

La maggiore durata della vita delle bovine incrociate potrebbe tuttavia aver influenzato la produzione di latte nell'arco della vita oltre che di solidi rispetto alle HO. Tale maggiore longevità è stata confermata anche da Heins et al. (2012).

Una durata maggiore della carriera produttiva significa più tempo per accumulare produzione e di conseguenza reddito. In questo studio le bovine CR tendono a fornire un reddito lordo e un IOFC più elevati rispetto alle HO, come testimoniato anche da Shonka-Martin et al. (2019).

L'IOFC maggiore è legato anche a una maggiore efficienza di conversione della sostanza secca ingerita (Shonka-Martin et al., 2019), anche se in questo studio le DMI sono state paragonabili tra i due gruppi genetici. Piazza et al. (2022) hanno suggerito come sia opportuno applicare metriche diverse per stimare l'efficienza produttiva delle bovine, basandosi sulla diversa composizione corporea. Tale concetto si basa sulle indicazioni di Di Costanzo et al. (1990), il quale sostiene che per una diversa composizione corporea è necessaria una diversa quantità di energia per il mantenimento. In particolare, la massa proteica corporea richiede una maggiore quantità di energia per essere mantenuta; massa che è presente in quantità maggiore nelle HO.

I risultati ottenuti hanno confermato quanto sopra citato: le bovine CR presentano un BCS più elevato, un maggiore contenuto di Bfat e un minore contenuto di Bprt, il tutto con un peso corporeo simile a quello delle HO. Il maggior BCS delle CR è confermato anche da Hazel et al. (2020): tale condizione permette alle bovine di avere condizioni corporee migliori.

Inoltre, nello studio in analisi, le carcasse CR hanno raggiunto un valore maggiore del 21% rispetto alle carcasse HO, come sostenuto da Hazel et al. (2021), nel cui studio tuttavia le bovine derivanti da incrocio fornivano un valore maggiore del 16%.

7.2 Impatto ambientale

Lo scopo principale del lavoro svolto è stato quello di analizzare l'impronta ambientale di due gruppi genetici differenti (CR e HO) allevati in un sistema intensivo italiano, adottando tre diverse tipologie di unità funzionali (temporale, produttiva ed economica) e due diversi metodi per calcolare il fabbisogno di NEm.

I risultati ottenuti hanno evidenziato che le bovine CR hanno il potenziale per ridurre l'impatto ambientale associato alla produzione di latte, anche se una modifica delle unità funzionali e dei metodi di calcolo della NEm potrebbero modificare il grado potenziale di mitigazione.

Tra le diverse unità funzionali, le maggiori differenze si sono notate in quella produttiva, nello specifico nella produzione di solidi totali, dove è evidente una differenza significativa rispetto alle HO applicando entrambi i metodi di calcolo della NEm. Tale risultato è riconducibile a una maggiore produzione di grasso e proteina nel latte durante la carriera produttiva della bovina, a fronte di un impatto simile nella vita di mandria rispetto alle bovine HO.

D'altro canto, la produzione di solidi è stata l'unica UF a mostrare una netta differenza, anche se le CR presentano valori assoluti migliori rispetto alle HO per quanto riguarda la durata della vita, il latte, la cagliata prodotta, il reddito lordo e l'IOFC. In questo senso, la riduzione osservata per le vacche CR rispetto alle HO, quando è stato adottato un sistema di calcolo della NEm basandosi sulla massa proteica corporea, è legato alla modifica dei valori di impatto ambientale sulla durata della vita.

La minore DMI, sia durante la lattazione sia durante la fase di asciutta, è probabilmente il fattore principale di riduzione dei valori di impatto ambientale sulla vita.

Per quanto riguarda l'IOFC, l'adozione della NEm_PM ha alterato la quantità assunta di sostanza secca, ma anche il relativo costo di alimentazione, aumentandone di fatto il valore rispetto alle HO. È quindi essenziale capire che il metodo utilizzato per calcolare i fabbisogni energetici di mantenimento è un punto focale per la valutazione dell'impatto ambientale delle bovine CR.

L'effetto di mitigazione dell'impatto ambientale dovuto all'aumento di produzione di latte per singolo animale è già noto grazie a Gerber et al. (2011), tuttavia ulteriori aumenti a partire dall'elevato livello produttivo già raggiunto, potrebbe causare effetti non sempre redditizi, come dimostrato da Moallem (2016).

La maggior longevità delle bovine CR ha suscitato interesse: una maggior durata della permette di mitigare l'impatto di un singolo animale più a lungo nel tempo. Una maggiore longevità comporta una riduzione degli animali giovani improduttivi all'interno della mandria (periodo

nel quale gli animali producono emissioni ma non producono latte) e una riduzione nel numero di animali giovani allevati.

L'abbassamento della quota di rimonta ha effetti mitiganti sull'impatto ambientale, poiché le manze consumano risorse alimentari che devono essere prodotte, emettono metano enterico ed espellono nutrienti (Hristov et al., 2013; Knapp et al., 2014).

Una possibile problematica della diminuzione della quota di sostituzione è legata alla riduzione della carne derivante da bovine da latte nel mercato: tale situazione comporterebbe un aumento dei capi specializzati nella produzione di carne, i quali sono maggiormente impattanti rispetto a quelli da latte (De Vries et al., 2015).

Questa situazione potrebbe essere controbilanciata da tre diversi fattori:

- le carcasse delle bovine CR presentano una conformazione migliore delle HO (Piazza et al., 2022), migliorando l'offerta qualitativa di coprodotti offerti dal settore del bovino da latte;
- l'uso di seme di tori da carne tramite la fecondazione artificiale può aumentare la produzione di carne derivante dagli allevamenti da latte (Holden e Butler, 2018);
- l'atteggiamento dei consumatori europei e la loro disponibilità a pagare per prodotti a base di carne bovina, si è spostata verso produzioni più sostenibili (Dudinskaya et al., 2021), per cui una maggiore produzione di carne derivante dal settore del bovino da latte potrebbe essere ben accolta.

Inoltre, una elevata quota di riforma potrebbe indicare uno stato di scarso benessere animale, motivo per cui un tasso di riforma più basso potrebbe aumentare l'accettazione a livello sociale dell'allevamento da latte (Cardoso et al., 2016).

7.3 Applicazione dell'LCA alla singola bovina in lattazione

L'applicazione della metodologia LCA viene solitamente eseguita per valutare l'impatto ambientale di un prodotto su scala aziendale.

L'azienda agricola è l'unità produttiva in cui vengono raccolti e conservati i dati necessari per l'analisi dell'inventario e l'unità in cui possono essere prese le decisioni volte a ridurre l'impronta ambientale.

Tuttavia, l'LCA presenta alcuni limiti, tra cui l'esclusione della variabilità intra-aziendale dovuta alla diversità degli animali allevati. L'uso dell'LCA su singoli animali potrebbe richiedere un notevole dispendio di tempo e necessita di dati precisi, ma l'applicazione di tale sistema in questa modalità potrebbe evidenziare approfondimenti sulla valutazione delle

emissioni GWP. McAuliffe et al. (2018) hanno notato come siano presenti differenze se vengono utilizzati dati individuali o medi dell'intera mandria.

In questo studio l'applicazione dell'LCA a livello di singolo individuo ha permesso di valutare il differente impatto ambientale tra bovine CR e bovine HO basandosi su molteplici dati, tra cui il numero di lattazioni, la durata della vita della mandria, la quantità di solidi totali prodotta, la composizione corporea e il valore economico delle carcasse.

Dall'altro lato i dati relativi all'organizzazione aziendale, alla gestione delle deiezioni e alla produzione di alimenti per l'allevamento sono ottenibili solo su scala aziendale, motivo per cui essi devono essere considerati come fattori di gestione comuni a tutte le bovine. Tale combinazione di dati aziendali e dati individuali è stata impostata nel modo più accurato possibile rispetto ai dati disponibili. L'applicazione di pratiche zootecniche di precisione per monitorare a livello individuale diverse variabili, tra cui l'assunzione di sostanza secca, potrebbe aumentare la precisione dei modelli utilizzati per l'LCA. Infatti, grazie a dati di partenza più precisi, è possibile cogliere in modo migliore possibili differenze tra gruppi genetici e potrebbe aiutare a prendere decisioni per ridurre l'impatto ambientale associato all'allevamento della bovina da latte.

8. CONCLUSIONE

I risultati di questo studio hanno confermato quanto specificato anche da altri autori. Le bovine CR, rispetto alle HO, presentano una carriera produttiva più lunga, concludono un numero maggiore di lattazioni e trascorrono più tempo in lattazione. Inoltre producono un contenuto di solidi totali maggiore nell'arco della loro vita, mantenendo una condizione fisica migliore (BCS maggiore del 10%), un valore maggiore della carcassa e portando un maggiore introito di reddito lordo pari a € 900/capo.

Per quanto riguarda l'aspetto ambientale, le bovine CR presentano emissioni comparabili alle HO per giorno di vita e per kg di latte prodotto, anche se le prime hanno emissioni inferiori per kg di grasso più proteine e per kg di cagliata fresca.

L'applicazione dello schema di incrocio a tre vie può essere considerata una valida strategia per mitigare le emissioni di gas serra e di altri inquinanti delle bovine da latte allevate in un sistema intensivo; tuttavia, le applicazioni di tecnologie di precision farming e di medio infrarosso (una volta migliorate) potrebbero fornire dati più precisi. Sono dunque necessari ulteriori approfondimenti con dati raccolti direttamente sul campo per ottenere un quadro più completo.

9. BIBLIOGRAFIA

Agnew, R. E., & Yan, T. (2000). Impact of recent research on energy feeding systems for dairy cattle. *Livestock Production Science*, *66*(3), 197-215.

Bava, L., Sandrucci, A., Zucali, M., Guerci, M., & Tamburini, A. (2014). How can farming intensification affect the environmental impact of milk production?. *Journal of Dairy Science*, *97*(7), 4579-4593.

Bittante, G., Negrini, R., Bergamaschi, M., Ni, Q., Patel, N., Toledo-Alvarado, H., & Cecchinato, A. (2021). Purebreeding with sexed semen and crossbreeding with semen from double-muscled sires to improve beef production from dairy herds: Live and slaughter performances of crossbred calves. *Journal of Dairy Science*, *104*(3), 3210-3220.

Cardoso, C. S., Hötzel, M. J., Weary, D. M., Robbins, J. A., & von Keyserlingk, M. A. (2016). Imagining the ideal dairy farm. *Journal of Dairy Science*, *99*(2), 1663-1671.

Cubero Dudinskaya, E., Naspetti, S., Arsenos, G., Caramelle-Holtz, E., Latvala, T., Martin-Collado, D., ... & Zanolli, R. (2021). European consumers' willingness to pay for red meat labelling attributes. *Animals*, *11*(2), 556.

Dalla Riva, A., Burek, J., Kim, D., Thoma, G., Cassandro, M., De Marchi, M., 2017. Environmental life cycle assessment of Italian mozzarella cheese: hotspots and improvement opportunities. *J. Dairy Sci.* *100*, 7933–7952.

De Haas, Y., Veerkamp, R. F., de Jong, G., & Aldridge, M. N. (2021). Selective breeding as a mitigation tool for methane emissions from dairy cattle. *Animal*, *15*, 100294.

De Vries, W., Kros, J., Dolman, M. A., Vellinga, T. V., De Boer, H. C., Gerritsen, A. L., ... & Bouma, J. (2015). Environmental impacts of innovative dairy farming systems aiming at improved internal nutrient cycling: a multi-scale assessment. *Science of the Total Environment*, *536*, 432-442.

Dehareng, F., Delfosse, C., Froidmont, E., Soyeurt, H., Martin, C., Gengler, N., ... & Dardenne, P. (2012). Potential use of milk mid-infrared spectra to predict individual methane emission of dairy cows. *Animal*, 6(10), 1694-1701.

DiCostanzo, A., Meiske, J. C., Plegge, S. D., Peters, T. M., & Goodrich, R. D. (1990). Within-herd variation in energy utilization for maintenance and gain in beef cows. *Journal of Animal Science*, 68(7), 2156-2165.

Eugène, M., Klumpp, K., & Sauvant, D. (2021). Methane mitigating options with forages fed to ruminants. *Grass and Forage Science*, 76(2), 196-204.

Fox, D. G., Van Amburgh, M. E., & Tylutki, T. P. (1999). Predicting requirements for growth, maturity, and body reserves in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 82(9), 1968-1977.

Froldi, F., Lamastra, L., Trevisan, M., Mambretti, D., & Moschini, M. (2022). Environmental impacts of cow's milk in Northern Italy: Effects of farming performance. *Journal of Cleaner Production*, 132600.

Gerber, P., Vellinga, T., Opio, C., Steinfeld, H., 2011. Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. *Livestock Science*, 139(1), 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.03.012>

Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falucci, A., Tempio, G., 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

Grossi, S., Compiani, R., Rossi, L., Dell'Anno, M., Castillo, I., & Sgoifo Rossi, C. A. (2021). Effect of slow-release urea administration on production performance, health status, diet digestibility, and environmental sustainability in lactating dairy cows. *Animals*, 11(8), 2405.

Guerci, M., Bava, L., Zucali, M., Sandrucci, A., Penati, C., & Tamburini, A. (2013). Effect of farming strategies on environmental impact of intensive dairy farms in Italy. *Journal of dairy research*, 80(3), 300-308.

Halling-Sørensen, B. N. N. S., Nielsen, S. N., Lanzky, P. F., Ingerslev, F., Lützhøft, H. H., & Jørgensen, S. E. (1998). Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment-A review. *Chemosphere*, *36*(2), 357-393.

Hauschild, M.Z., Rosenbaum, R. K., Olsen, S.I. Life Cycle Assessment, Theory and Practice. 2018

Hazel, A. R., Heins, B. J., & Hansen, L. B. (2020). Fertility and 305-day production of Viking Red-, Montbéliarde-, and Holstein-sired crossbred cows compared with Holstein cows during their first 3 lactations in Minnesota dairy herds. *Journal of dairy science*, *103*(9), 8683-8697.

Hazel, A. R., Heins, B. J., & Hansen, L. B. (2020). Health treatment cost, stillbirth, survival, and conformation of Viking Red-, Montbéliarde-, and Holstein-sired crossbred cows compared with pure Holstein cows during their first 3 lactations. *Journal of dairy science*, *103*(11), 10917-10939.

Heins, B. J., & Hansen, L. B. (2012). Fertility, somatic cell score, and production of Normande× Holstein, Montbéliarde× Holstein, and Scandinavian Red× Holstein crossbreds versus pure Holsteins during their first 5 lactations. *Journal of dairy science*, *95*(2), 918-924.

Holden, S. A., & Butler, S. T. (2018). Applications and benefits of sexed semen in dairy and beef herds. *Animal*, *12*(s1), s97-s103.

Holtshausen, L., Benchaar, C., Kröbel, R., & Beauchemin, K. A. (2021). Canola Meal versus Soybean Meal as Protein Supplements in the Diets of Lactating Dairy Cows Affects the Greenhouse Gas Intensity of Milk. *Animals*, *11*(6), 1636.

Houghton, E. (1996). *Climate change 1995: The science of climate change: contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 2). Cambridge University Press.

Hristov, A. N., Oh, J., Firkins, J. L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., ... & Tricarico, J. M. (2013). Special topics—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of animal science*, *91*(11), 5045-5069.

Institut de la Recherche Agronomique (INRA), 2019. INRA feeding system for ruminants. 2nd edition. Wageningen Academic Publishers. Wageningen, The Netherlands.

IPCC, 2013. Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., Zhang, H., 2013. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I To the Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)] IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, 2019. *Guidelines for national greenhouse gas inventories - Volume 4: Agriculture, Forestry and Other land Use – Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Geneva, Switzerland.

IPCC, 2022. *Climate change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.

ISO, I. (2006). 14040. *Environmental management—life cycle assessment—principles and framework*, 235-248.

ISO, I. (2006). 14044: 2006. *Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*, 1-46.

Jönsson, R. (2015). Estimation of heterosis and performance of crossbred Swedish dairy cows.

Ketelaars, J.J.M.H., Van der Meer, H.G., 1999. Establishment of Criteria for the Assessment of the Nitrogen Content of Animal Manures. Report 14. Final report to ERM. Plant Research International, Wageningen, The Netherlands.

Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W. P., & Tricarico, J. M. (2014). Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of dairy science*, 97(6), 3231-3261.

Kraatz S., Berg W., Küstermann B., Hülsbergen K.J., 2006. Energy and carbon balancing in livestock keeping. Proc. World Congress: Agricultural engineering for a better world, Bonn, 03.-07.09.2006, pp. 417-418

Lassen, J., & Difford, G. F. (2020). Genetic and genomic selection as a methane mitigation strategy in dairy cattle. *Animal*, 14, s473-s483.

Lindberg, M., Henriksson, M., Bååth Jacobsson, S., & Berglund Lundberg, M. (2021). Byproduct-based concentrates in Swedish dairy cow diets—evaluation of environmental impact and feed costs. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A—Animal Science*, 70(3-4), 132-144.

MacLeod, M., Gerber, P., Mottet, A., Tempio, G., Falcucci, A., Opio, C., Vellinga, T., Henderson, B. Steinfeld, H. 2013. Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains – A global life cycle assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

Macri, M. C., CREA, 2017. La zootecnia in Italia. Produzioni, regolamentazione, ricerca, politiche per la qualità e la biodiversità.

Makanjuola, B. O., Miglior, F., Abdalla, E. A., Maltecca, C., Schenkel, F. S., & Baes, C. F. (2020). Effect of genomic selection on rate of inbreeding and coancestry and effective population size of Holstein and Jersey cattle populations. *Journal of dairy science*, *103*(6), 5183-5199.

Mäki-Tanila, A. (2007). An overview on quantitative and genomic tools for utilising dominance genetic variation in improving animal production. *Agricultural and food science*, *16*(2), 188-198.

Malchiodi, F., Cecchinato, A., & Bittante, G. (2014). Fertility traits of purebred Holsteins and 2-and 3-breed crossbred heifers and cows obtained from Swedish Red, Montbéliarde, and Brown Swiss sires. *Journal of Dairy Science*, *97*(12), 7916-7926.

Malchiodi, F., Cecchinato, A., Penasa, M., Cipolat-Gotet, C., & Bittante, G. (2014). Milk quality, coagulation properties, and curd firmness modeling of purebred Holsteins and first- and second-generation crossbred cows from Swedish Red, Montbéliarde, and Brown Swiss bulls. *Journal of Dairy Science*, *97*(7), 4530-4541.

McAllister et al., 2005. Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis. World Resources Institute, Washington, DC.

McAllister, T. A., Cheng, K. J., Okine, E. K., & Mathison, G. W. (1996). Dietary, environmental and microbiological aspects of methane production in ruminants. *Canadian Journal of Animal Science*, *76*(2), 231-243.

McAuliffe, G. A., Takahashi, T., Orr, R. J., Harris, P., & Lee, M. R. F. (2018). Distributions of emissions intensity for individual beef cattle reared on pasture-based production systems. *Journal of cleaner production*, *171*, 1672-1680.

Mendonça, L. G. D., Abade, C. C., da Silva, E. M., Litherland, N. B., Hansen, L. B., Hansen, W. P., & Chebel, R. C. (2014). Comparison of peripartum metabolic status and postpartum health of Holstein and Montbéliarde-sired crossbred dairy cows. *Journal of dairy science*, *97*(2), 805-818.

Mikkelsen, R. L. (2000). Beneficial use of swine by-products: opportunities for the future. *Land application of agricultural, industrial, and municipal by-products*, 6, 451-480.

Moallem, U. (2016). Future consequences of decreasing marginal production efficiency in the high-yielding dairy cow. *Journal of dairy science*, 99(4), 2986-2995.

Montbeliarde, O. S. 2018. Discovering the Montbeliarde: the scoring table. <https://www.montbeliarde.org/assets/files/Publications/fiches-techniques/POINTAGE.pdf>

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F. M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., ... & Lee, D. (2013). Mendoza, 25 B. Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., and Zhang, H. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: Stocker, T., Qin, D., Plattner, GK, Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P.(eds) *Climate Change*, 505.

NASEM, 2021. Nutrient requirements of dairy cattle. Eight revised edition. The National Academies Washington, DC, USA.

Nemecek, T., Kägi, T., & Blaser, S. (2007). Life cycle inventories of agricultural production systems. *Final report ecoinvent v2. 0 No, 15*, 1-360.

Oers, L. van, 2016. CML-IA Database, Characterisation and Normalisation Factors for Midpoint Impact Category Indicators. August 2016. downloaded from, Version 4.8. <http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>

Piazza, M., Berton, M., Amalfitano, N., Bittante, G., & Gallo, L. (2022). Cull cow carcass traits and risk of culling of Holstein cows and 3-breed rotational crossbred cows from Viking Red, Montbéliarde, and Holstein bulls. *Journal of Dairy Science*.

Pryce, J. E., Woolaston, R., Berry, D. P., Wall, E., Winters, M., Butler, R., & Shaffer, M. (2014, August). World trends in dairy cow fertility. In *Proceedings of the 10th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production* (Vol. 10, p. 6).

Saha, S., Amalfitano, N., Bittante, G., & Gallo, L. (2020). Milk coagulation traits and cheese yields of purebred Holsteins and 4 generations of 3-breed rotational crossbred cows from Viking Red, Montbéliarde, and Holstein bulls. *Journal of dairy science*, *103*(4), 3349-3362.

Sauvant, D., Perez, J. M., & Tran, G. (Eds.). (2004). *Tables of composition and nutritional value of feed materials: pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses and fish*. Wageningen Academic Publishers.

Sharpley, A. N., & Menzel, R. G. (1987). The impact of soil and fertilizer phosphorus on the environment. *Advances in agronomy*, *41*, 297-324.

Shonka-Martin, B. N., Heins, B. J., & Hansen, L. B. (2019). Three-breed rotational crossbreds of Montbéliarde, Viking Red, and Holstein compared with Holstein cows for feed efficiency, income over feed cost, and residual feed intake. *Journal of dairy science*, *102*(4), 3661-3673.

Shull, G. H. (1948). What is "heterosis"? *Genetics*, *33*(5), 439.

Sørensen, M. K., Norberg, E., Pedersen, J., & Christensen, L. G. (2008). Invited review: crossbreeding in dairy cattle: a Danish perspective. *Journal of Dairy Science*, *91*(11), 4116-4128.

Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., de Haan C., 2006. Livestock's long shadow. Environmental issues and options. FAO.

Tackling climate change through livestock—A global assessment of emissions and mitigation opportunities, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy (2013)

Van Middelaar, C. E., Dijkstra, J., Berentsen, P. B. M., & De Boer, I. J. M. (2014). Cost-effectiveness of feeding strategies to reduce greenhouse gas emissions from dairy farming. *Journal of Dairy Science*, *97*(4), 2427-2439.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1218–1230

Withers, P. J., Sharpley, A. N., & Rehcigl, J. E. (1995). Phosphorus fertilizers. *Soil amendments and environmental quality*, 65-107.

10. TABELLE

Tabella 1. Statistica descrittiva della composizione degli ingredienti presenti nelle razioni e della loro relativa composizione chimica, somministrate a ciascuna categoria di animali (vacche in lattazione, vacche in asciutta, manze), nei due allevamenti (A e B)

Variable	Farm A			Farm B		
	Lactating cow	Dry cow	Heifer	Lactating cow	Dry cow	Heifer
<i>Ingredient composition, %</i>						
Maize silage	20.6	11.6	3.2			
Sorghum silage	7.7		10.8			
Wheat silage	2.6		0.1			
Maize ears silage	19.3					
Grass silage	2.9	14.6	7.2			
Hay	0.3	7.7		10.4	48.1	19.5
Alfalfa hay	2.6		1.5	26.8	2.4	0.7
Wheat straw			4.3			
Maize flour	5.5		0.3	28.6	1.9	3.5
Barley grain				10.1	1.2	0.2
Sunflower meal			4.7			
Molasses	4.6		0.2			
Compound feed 1	24.4		1.3			
Compound feed 2	9.2		0.4			
Compound feed 3		3.1	0.7			
Compound feed 4				14.5	3.8	3.2
Compound feed 5				1.9	2.9	
Compound feed 6				1.2		
Compound feed 7				0.1	1.0	
<i>Chemical composition¹</i>						
GE, MJ/ kg DM	18.16	16.65	17.4	18.15	17.57	18.04
DE, MJ/ kg DM	14.19	11.23	11.73	12.3	10.3	11.76
NE, MJ/ kg DM	7.23	5.46	5.88	6.8	5.43	5.81

CP, % DM	16.01	10.59	12.87	17.32	11.64	14.04
CF, % DM	12.36	27.47	27.87	15.49	28.95	24.57
EE, % DM	4.57	3.59	2.91	3.34	2.88	3.17
Ash, % DM	3.66	9.53	7.62	6.65	9.22	7.98
NDF, % DM	25.66	49.52	55.44	31.34	59.23	50.36
Starch, % DM	28.35	11.69	5.22	26.89	3.53	13
P, % DM	0.34	0.48	0.26	0.37	0.32	0.35
NSC, % DM	50.10	26.76	21.15	41.35	17.03	24.44
OMD, % DM	79.04	77.37	71.85	69.74	62.87	66.6

¹ GE: energia lorda, DE: energia digeribile, NE: energia netta, CP: proteina grezza, CF: fibra grezza, EE:estratto etero, NDF: fibra neutro detersa, P: fosforo, NSC: carboidrati non strutturali, OMD: sostanza organica digeribile.

Tabella 2. Statistica descrittiva degli input e della resa per ogni alimento prodotto nelle due aziende.

Crop	Product	Area	Fertilisati on, mineral	Fertilisati on, manure	Fertilisati on, mineral	Fertilisati on, manure	Pesticides	Yield
Unit		ha	kg N/ha	kg N/ha	kg P/ha	kg P/ha	kg/ha	q DM/ha
Farm A								
Maize	Maize silage	51	18	413	0	258	19	214
	Maize ears							
Maize	silage	28	28	390	0	244	19	152
Grass	Grass silage	13	0	182	0	114	0	78
Grass	Hay	39	0	405	0	253	0	80
Wheat	Wheat silage	3.5	0	301	0	188	0	161
Sorghum	Sorghum silage	27	2	283	0	177	0	158
Alfalfa	Alfalfa hay	11	0	57	0	36	0	101
Farm B								
Barley	Barley grain	82	84	152	0	101	2	64
Grass	Hay	1	0	121	0	76	0	80
Alfalfa	Alfalfa hay	67	24	170	57	107	0	90

Tabella 3. Equazioni per il calcolo del flusso input-output dell'N per ogni categoria di animale secondo Katelaars e Van der Meer (1999).

Variable	Unit	Acronym	Formula	Type
Dairy cow, herd life				
Nitrogen intake	kg	N_int_dairy	$N_int_MC + N_int_DC$	individual
Nitrogen retention, in milk	kg	N_ret_milk_dairy	$prtlife/6.25;$	individual
Nitrogen retention, in body weight increase	kg	N_ret_BW_dairy	$(BW_{COW} - BW_{HEI}) * 0.025;$	individual
Nitrogen retention, during pregnancy	kg	N_ret_preg_dairy	$(BW_{BIRTH} * 0.22 / 6.25) * (lact_n - 1)$	individual
Nitrogen retention	kg	N_ret_dairy	$N_ret_milk_dairy + N_ret_BW_{COW} + N_ret_preg_dairy$	individual
Nitrogen excretion	kg	N_excr_dairy	$N_int_dairy - N_ret_dairy$	individual
Heifer, from birth to the first calving				
Nitrogen retention, in milk	kg	N_ret_milk_HEI	0	individual
Nitrogen retention, in body weight increase	kg	N_ret_BW_HEI	$(BW_{HEI} - BW_{BIRTH}) * 0.027$	individual
Nitrogen retention, during pregnancy	kg	N_ret_preg_HEI	$(BW_{BIRTH} * 0.22 / 6.25)$	individual
Nitrogen retention	kg	N_ret_HEI	$N_ret_milk_HEI + N_ret_BW_{HEI} + N_ret_preg_HEI$	individual
Nitrogen excretion	kg	N_excr_HEI	$N_int_HEI - N_ret_HEI$	individual

Tabella 4. Equazioni per la determinazione delle emissioni dovute alle fermentazioni enteriche e alla gestione dei reflui.

Variable	Unit	Acronym	Formula
Enteric fermentation			
CH ₄	L/head/d	CH ₄ _ent_L	$-64+26*DMI-0.61*(DMI-12.5)^2+0.25*OMD*10-66.4*EE/100*DMI-45*(NSC/(NDF+NSC))$
	kg/head/d	CH ₄ _ent	$0.716*CH_4_ent_L/1000$
Manure management			
CH ₄	kg/head/d	CH ₄ _man	$VS*(Bo(T)*0.67*\sum(MCF_s/100)*MS_s$ $VS = (GEI*(1-DE/100)+(0.04 *GEI))*((1-ASH)/GE_DM)$
			GEI: Gross Energy, MJ/day; DE: diet digestibility, %; ASH: ash content of manure; GE_DM: Gross Energy MJ/kg DM, Bo(T) = m ³ CH ₄ / kg of VS excreted (0.24 cow, 0.18 heifer); MCF _s : methane conversion factor for manure management system S (Solid = 0.02, Slurry = 0.14); MS _s : fraction of livestock category handled using manure management S (50% solid; 50% slurry).
N ₂ O direct Nitrogen volatilisation	kg/head	N ₂ O_manu_dir	$(N_excreted*0.005)*(44/28)$
		TAN_solid	$(N_excr+N_bedding)*MS_solid*0.6$
		TAN_slurry	$N_excreted *MS_slurry*0.6$
		N_vol_solid_housing	$TAN_solid*0.08$
		N_vol_slurry_housing	$TAN_slurry*0.24$
		TAN_solid_storage	$TAN_solid-N_vol_solid_housing$
		TAN_solid_storage	$TAN_slurry-N_vol_slurry_housing$
		N_vol_solid_storage	$TAN_solid_storage*0.32$
		N_vol_slurry_storage	$TAN_slurry_storage*0.32$

N volatilised from manure management	kg/head	N_vol	$N_vol_solid_housing+N_vol_solid_storage+N_vol_slurry_housing+N_vol_slurry_storage$
N ₂ O indirect	kg/head	N ₂ O_manu_indir	$N_vol*0.01*(44/28)$

Tabella 5. Equazioni per la determinazione delle emissioni legata alla produzione di alimenti nei suoli aziendali.

Variable	Unit	acronym	Formula	Tipo	Reference
N ₂ O direct	kg	N ₂ O_dir_crop	(FSN + FON + FCR) * EF * 44 / 28 FSN = annual amount of synthetic fertiliser N applied to soils, kg N; FON = annual amount of animal manure, kg N; FCR = annual amount of N in crop residues, kg N; EF = 0.01 kg N-N ₂ O / kg N applied.	farm	IPCC, 2019
Nitrogen volatilisation		N_vol_crop	FSN × 0.11 + FON × 0.21	farm	IPCC, 2019
N ₂ O indirect, from N volatilised	kg	N ₂ O_indir_crop	N_vol_crop × 0.01 × 44 / 28	farm	IPCC, 2019
NO ₃ leaching	kg	N_leach	(FSN + FON + FCR) × 0.24	farm	IPCC, 2019
N ₂ O indirect, from N leaching	kg	N ₂ O_indir_leach	N_leach * 0.011 * 44 / 28	farm	IPCC, 2019
P (kg) leaching	kg/ha		0.07	farm	Nemecek and Kagi, 2007
P (kg) run-off	kg/ha		0.175*[1+0.2/80*mineral P ₂ O ₅ (kg/ha)+0.4/80*manure P ₂ O ₅ (kg/ha)+0.7/80]	farm	Nemecek and Kagi, 2007

Ramin M., Huhtanen P., 2013. Development of equations for predicting methane emissions from ruminants. *J. Dairy Sci.* 96, 2476-2493.

<https://doi.org/10.3168/jds.2012-6095>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories- Volume 4: Agriculture, Forestry and Other land Use. Geneva, Switzerland.

Nemecek, T., Kägi, T., 2007. Life cycle inventories for Swiss and European agricultural production system – Final report Ecoinvent no 15. Agroscope Reckenholz

Taenikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland

Tabella 6. Medie, deviazione standard (SD) e risultati dell'ANOVA per i tratti relative alla vita di 564 bovine (279 bovine Holstein in purezza e 285 bovine Crossbred).

Variable	Means	SD	ANOVA P-values			RMSE ²
			Herd	Genetic group ¹	Herd × Genetic group	
Age at first calving, d	715	64	<0.01	<0.01	>0.1	1.27
Number of lactations	3.15	1.33	<0.01	<0.01	>0.1	52
Lifespan, d	1841	478	<0.01	0.09	>0.1	388
Days in milk, d	955	394	<0.01	0.03	>0.1	93
Dry days, d	171	107	<0.01	>0.1	>0.1	113
Unproductive days, d	887	113	0.01	>0.1	>0.1	472

¹Bovine Holstein o Crossbred.

²RMSE: errore quadratico medio.

Tabella 7. Medie, deviazione standard (SD) e risultati dell'ANOVA per i dati relativi alla produzione di latte, alla quantità di solidi totali prodotti (grasso + proteine) e cagliata fresca prodotta di 564 bovine (279 bovine Holstein in purezza e 285 bovine Crossbred).

Variable	Means	SD	ANOVA P-values			RMSE ²
			Herd	Genetic group ¹	Herd × Genetic group	
Lifetime production, kg/cow:						
Milk yield	31140	14484	>0.1	>0.1	>0.1	14459
Fat plus protein yield	2168	996	>0.1	0.05	>0.1	993
Fresh curd yield	5185	2494	>0.1	>0.1	>0.1	2495
Production per day of life, kg/d:						
Milk yield	16.13	3.96	>0.1	>0.1	>0.1	3.96
Fat plus protein yield	1.12	0.27	>0.1	0.07	>0.1	0.27
Fresh curd yield	2.69	0.73	0.04	>0.1	>0.1	0.73

¹Bovine Holstein o Crossbred.

²RMSE: errore quadratico medio.

Tabella 8. Medie, deviazione standard (SD) e risultati dell'ANOVA per il peso medio previsto (pBW), il body condition score (BCS), massa grassa stimata (pBfat), massa grassa proteica (pBprt), contenuto energetico totale corporeo stimato (pBEn), assunzione stimata di sostanza secca (DMI) per le manze, le vacche in lattazione e le vacche in asciutta, e IOFC calcolati sulla base del peso metabolico (MW) e sulla massa proteica corporea (pBrt) e valore delle carcasse delle bovine.

Variable	Mean	SD	ANOVA P values			RMSE ²
			Herd	Genetic group ¹	Herd × Genetic group	
Body attributes:						
pBW, kg	684	60.1	<0.01	>0.1	0.04	58.9
BCS	3.33	0.37	<0.01	<0.01	<0.01	0.31
pBfat, kg	120	23.4	<0.01	<0.01	<0.01	21.0
pBprt, kg	87	6.6	>0.1	<0.01	>0.1	6.5
pBEn, MJ/kg	6667	990	<0.01	<0.01	<0.01	908
DMI computed on NEm based on MW:						
DMI heifer, kg/d	8.00	0.59	<0.01	<0.01	<0.01	0.55
DMI lactation, kg/d	22.89	1.92	>0.1	>0.1	>0.1	1.93
DMI dry, kg/d	10.88	0.77	<0.01	<0.01	>0.1	0.75
DMI computed on NEm based on Bprt:						
DMI lactation, kg/d	22.78	2.02	>0.1	>0.1	>0.1	2.02
DMI dry, kg/d	10.76	0.84	<0.01	<0.01	>0.1	0.83
Economic traits, €/cow:						
Cull cows value	632	84.6	0.01	<0.01	>0.1	59.1
Gross income	16357	8155	<0.01	>0.1	>0.1	7340
IOFC _{MW}	8993	5994	<0.01	>0.1	>0.1	5171
IOFC _{PM}	9011	5973	<0.01	>0.1	>0.1	5154

¹Bovine Holstein o Crossbred.

²RMSE: errore quadratico medio.

Tabella 9. Medie, deviazione standard (SD) e risultati dell'ANOVA per le categorie di impatto ambientale rispetto alla carriera produttiva e per giorno di vita, con fabbisogni di mantenimento calcolati sulla base del peso metabolico (MW) e della massa proteica corporea (Bprt).

Variable	Unit	Mean	SD	ANOVA P-value			RMSE ²
				Herd	Genetic group ¹	Herd × Genetic group	
NEm based on MW							
Lifespan impact categories ³ :							
GWP	kg CO ₂ -eq	3902 6	10911	<0.01	>0.1	>0.1	10707
AP	kg SO ₂ -eq	781	245	<0.01	>0.1	>0.1	233
EP	kg PO ₄ -eq	281	107	<0.01	>0.1	>0.1	86
LO	m ²	4964 4	17740	<0.01	>0.1	>0.1	15390
Impact categories per day of life:							
GWP	kg CO ₂ -eq/d	21.2	1.4	<0.01	0.10	0.01	1.4
AP	g SO ₂ -eq/d	420	40	<0.01	>0.1	<0.01	31
EP	g PO ₄ -eq/d	150	31	<0.01	>0.1	<0.01	11
LO	m ² /d	26.6	4.3	<0.01	>0.1	0.01	2.2
NEm based on Bprt							
Lifespan impact categories:							
GWP	kg CO ₂ -eq	3895 7	10971	<0.01	>0.1	>0.1	10763
AP	kg SO ₂ -eq	779	247	<0.01	>0.1	>0.1	235
EP	kg PO ₄ -eq	280	108	<0.01	>0.1	>0.1	87
LO	m ²	4954 2	17874	<0.01	>0.1	>0.1	15502
Impact categories per day of life:							
GWP	kg CO ₂ -eq/d	21.1	1.5	<0.01	0.01	0.02	1.41
AP	g SO ₂ -eq/d	419	42	<0.01	0.02	0.01	32
EP	g PO ₄ -eq/d	150	32	<0.01	0.05	<0.01	12
LO	m ² /d	26.5	4.4	<0.01	0.07	0.01	2.3

¹Bovine Holstein o Crossbred.

²RMSE: errore quadratico medio.

³GWP: potenziale di riscaldamento globale, AP: potenziale di acidificazione, EP: potenziale di eutrofizzazione, LO: occupazione di suolo.

Tabella 10. Medie, deviazione standard (SD) e risultati dell'ANOVA per le categorie di impatto ambientale rispetto alla produzione di latte, ai solidi totali (grasso + proteina) e alla cagliata fresca prodotta, con fabbisogni di mantenimento calcolati sulla base del peso metabolico (MW) e della massa proteica corporea (Bprt).

Variable	Unit	Mean	SD	ANOVA P-value			RMSE ²
				Herd	Genetic group ¹	Herd × Genetic group	
NEm based on MW							
Raw milk ³							
GWP	kg CO ₂ -eq/kg	1.40	0.39	>0.1	>0.1	>0.1	0.39
AP	g SO ₂ -eq/g	27.6	6.9	<0.01	>0.1	>0.1	6.8
EP	g PO ₄ -eq/g	9.80	2.93	<0.01	>0.1	>0.1	2.27
LO	m ² /kg	1.74	0.46	<0.01	>0.1	>0.1	0.77
Fat plus protein							
GWP	kg CO ₂ -eq/kg	20.0	5.4	>0.1	0.06	>0.1	5.4
AP	g SO ₂ -eq/g	394	95	<0.01	0.09	>0.1	93
EP	g PO ₄ -eq/g	140	41	<0.01	0.07	>0.1	31
LO	m ² /kg	24.8	6.3	<0.01	0.05	>0.1	5.5
Fresh curd							
GWP	kg CO ₂ -eq/kg	8.48	2.54	0.04	>0.1	>0.1	2.54
AP	g SO ₂ -eq/g	167	47	<0.01	>0.1	>0.1	45.3
EP	g PO ₄ -eq/g	60.0	20.1	<0.01	>0.1	>0.1	15.7
LO	m ² /kg	10.6	3.2	<0.01	>0.1	>0.1	2.74
NEm based on Bprt							
Raw milk							
GWP	kg CO ₂ -eq/kg	1.39	0.39	>0.1	>0.1	>0.1	0.39
AP	g SO ₂ -eq/g	27.5	6.8	<0.01	>0.1	>0.1	6.7
EP	g PO ₄ -eq/g	9.78	2.91	<0.01	>0.1	>0.1	2.24
LO	m ² /kg	1.73	0.46	<0.01	>0.1	>0.1	0.40
Fat plus protein							
GWP	kg CO ₂ -eq/kg	19.9	5.4	>0.1	0.03	>0.1	5.4
AP	g SO ₂ -eq/g	392	94	<0.01	0.02	>0.1	92
EP	g PO ₄ -eq/g	140	40	<0.01	0.02	>0.1	30
LO	m ² /kg	24.7	6.3	<0.01	0.02	>0.1	5.4
Fresh curd							
GWP	kg CO ₂ -eq/kg	8.46	2.53	>0.1	0.08	>0.1	2.52
AP	g SO ₂ -eq/g	167	47	<0.01	0.06	>0.1	45
EP	g PO ₄ -eq/g	59.6	20.0	<0.01	0.08	>0.1	15.6

LO	m ² /kg	10.5	3.2	<0.01	0.07	>0.1	2.7
----	--------------------	------	-----	-------	------	------	-----

¹Bovine Holstein o Crossbred.

²RMSE: errore quadratico medio.

³GWP: potenziale di riscaldamento globale, AP: potenziale di acidificazione, EP: potenziale di eutrofizzazione, LO: occupazione di suolo.

Tabella 11. Medie, deviazione standard (SD) e risultati dell'ANOVA per le categorie di impatto ambientale rispetto al ricavo lordo e al ricavo al netto dei costi alimentari (IOFC), con fabbisogni di mantenimento calcolati sulla base del peso metabolico (MW) e della massa proteica corporea (Bprt).

Variable	Unit	Mean	SD	ANOVA P-value			RMSE ²
				Herd	Genetic group ¹	Herd × Genetic group	
NEm based on MW							
Gross income ³							
GWP	kg CO ₂ -eq/€	2.74	0.93	<0.01	>0.1	>0.1	0.75
AP	g SO ₂ -eq/€	53.6	15	<0.01	>0.1	>0.1	12.6
EP	g PO ₄ -eq/€	18.5	3.9	>0.1	>0.1	>0.1	3.9
LO	m ² /€	3.32	0.76	<0.01	>0.1	>0.1	0.73
Income over feed cost							
GWP	€/kg CO ₂ -eq	0.21	0.10	<0.01	>0.1	>0.1	0.08
AP	€/g SO ₂ -eq	10.5	4.6	<0.01	>0.1	>0.1	3.6
EP	€/g PO ₄ -eq	28.8	11.1	<0.01	>0.1	>0.1	10.1
LO	€/m ²	0.16	0.06	<0.01	>0.1	>0.1	0.06
NEm based on Bprt							
Gross income							
GWP	kg CO ₂ -eq/€	2.74	0.93	<0.01	0.07	>0.1	0.74
AP	g SO ₂ -eq/€	53.4	14.8	<0.01	0.04	>0.1	12.4
EP	g PO ₄ -eq/€	18.5	3.8	>0.1	0.05	>0.1	3.8
LO	m ² /€	3.31	0.75	<0.01	0.05	>0.1	0.72
Income over feed cost							
GWP	€/kg CO ₂ -eq	0.21	0.10	<0.01	0.05	>0.1	0.07
AP	€/g SO ₂ -eq	10.5	4.6	<0.01	0.04	>0.1	3.6
EP	€/g PO ₄ -eq	29.0	11.0	<0.01	0.04	>0.1	10.1
LO	€/m ²	0.16	0.06	<0.01	0.03	>0.1	0.06

¹Bovine Holstein o Crossbred.

²RMSE: errore quadratico medio.

³GWP: potenziale di riscaldamento globale, AP: potenziale di acidificazione, EP: potenziale di eutrofizzazione, LO: occupazione di suolo.