



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ciencia Animal

Selección por emisiones de metano y eficiencia alimentaria

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Mejora Genética Animal y Biotecnología de la Reproducción

AUTOR/A: Mohedano Rodriguez, Ana

Tutor/a: Santacreu Jerez, María Antonia

Cotutor/a externo: González Recio, Oscar

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Máster Interuniversitario en Mejora Genética Animal y  
Biotecnología de la Reproducción

---

# SELECCIÓN POR EMISIONES DE METANO Y EFICIENCIA ALIMENTARIA

---

*Trabajo de Fin de Máster*

Madrid, junio 2024

**Ana Mohedano Rodríguez**

Director: **Dr. Óscar González Recio**

Tutora UPV: **Dra. M<sup>a</sup> Antonia Santacreu**



## AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar, quiero agradecer al Dr. Oscar González Recio, mi tutor de tesis, por su supervisión y orientación durante la realización de este Trabajo de Fin de Máster. Su experiencia y conocimientos han sido valiosos para el desarrollo de este proyecto.

A todos los compañeros del INIA-CSIC con los que he trabajado durante casi 10 meses y muy especialmente a mis compañeros de despacho, Mónica, Adrián y Raúl. Por escucharme, apoyarme y ayudarme en todo momento. Sois geniales, no habría sido igual sin vosotros.

A las niñas, Irene, Ana y Elisa. Por ser un lugar seguro, por los días de estudio en una mesa en la que no cabían el ordenador y los apuntes a la vez, porque sois guapísimas y listísimas. Es preciosos tener amigas como vosotras.

A mi familia. Por estar siempre, por quererme tanto y por animarme cuando sabéis que no estoy dando lo mejor de mí.

A David. Por recordarme que soy fuerte y por darme ánimos cuando me faltaban. Por hacerme reír en los peores días, por ayudarme con todo y estar siempre a mi lado. No me has dejado caer ni un momento. Gracias.

Y por último, gracias a mí misma. He trabajado día a día, he sacado fuerzas de donde no las había, he aprendido desde cero y he pasado muchas horas delante del ordenador. Este trabajo es gracias a mí.

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN.....	5
RESUM.....	6
ABSTRACT .....	7
ABREVIATURAS .....	8
INDICE DE TABLAS.....	9
INDICE DE FIGURAS.....	10
INTRODUCCIÓN .....	11
<b>1. Ganadería como fuente de emisiones de GEI.....</b>	<b>12</b>
<b>2. Estrategias para la mitigación de las emisiones de metano en rumiantes .....</b>	<b>14</b>
<b>3. Estado del arte de la selección genética para bajas emisiones de metano .....</b>	<b>17</b>
<b>4. Implementación de la selección genética para menores emisiones .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1. Definir los objetivos de selección.....</b>	<b>19</b>
<b>4.2. Mediciones de las emisiones de metano en ganado.....</b>	<b>22</b>
<b>4.3. Evaluaciones genéticas.....</b>	<b>27</b>
<b>4.4. Apareamientos: selección de los mejores individuos.....</b>	<b>27</b>
OBJETIVOS.....	31
MATERIALES Y MÉTODOS .....	32
<b>1. Teoría de los índices de selección .....</b>	<b>32</b>
<b>1.1. Importancia económica de los caracteres en el índice de selección.....</b>	<b>33</b>
<b>1.2. Respuesta a la selección.....</b>	<b>33</b>
<b>2. Caracteres del objetivo de selección.....</b>	<b>34</b>
<b>3. Caracteres del índice de selección .....</b>	<b>34</b>
<b>4. Valores económicos.....</b>	<b>37</b>
<b>5. Parámetros genéticos.....</b>	<b>38</b>
<b>6. Análisis de sensibilidad.....</b>	<b>39</b>
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	41
<b>1. Importancia económica relativa .....</b>	<b>41</b>
<b>2. Respuesta genética esperada.....</b>	<b>43</b>
<b>2.1. Escenario de Referencia.....</b>	<b>43</b>
<b>2.2. Emisiones de metano.....</b>	<b>45</b>
<b>2.3. Fenotipos de ingesta .....</b>	<b>46</b>

<b>2.4. Efecto de la inclusión de los Componentes Principales de composición de la microbiota .....</b>	<b>48</b>
<b>2.5. Rentabilidad .....</b>	<b>49</b>
<b>3. Análisis de sensibilidad.....</b>	<b>51</b>
CONCLUSIONES.....	55
BIBLIOGRAFÍA.....	56

## RESUMEN

---

El cambio climático se ha convertido en una de las principales preocupaciones internacionales y se sabe que el principal contribuyente es la liberación de gases de efecto invernadero (GEI). El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>) encabezan el ranking de GEI en mayor concentración en la atmósfera. Las últimas estimaciones de la FAO indican que la actividad ganadera puede suponer hasta un 12.1% de las emisiones globales de GEI, siendo el CH<sub>4</sub> el principal gas emitido. El metano se produce como un subproducto natural de la digestión de los rumiantes y es indeseable por dos motivos: 1) Contribuye al calentamiento global, 2) representa una pérdida la energía consumida de entre el 2 y el 12% de la ingesta de energía neta. La reducción de las emisiones de CH<sub>4</sub> no sólo es beneficiosa para el medio ambiente, sino que también daría como resultado, animales más eficientes para el ganadero. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue proponer posibles subíndices de selección que incluyan las emisiones de metano (MeP) y la eficiencia alimentaria (DMI o RFI) en vacuno lechero en España.

Los valores económicos de producción, tipo y funcionalidad fueron proporcionados por CONAFE (ICO), el valor económico de MeP se calculó a partir del precio del carbono en el mercado voluntario, que establece 14€/tCO<sub>2</sub> para 2050, resultando en -0.14 €/g CH<sub>4</sub>/día. Para DMI se estimó el valor económico como el coste de una unidad forrajera (-0.31 €/kg).

Todos los subíndices estudiados dieron como resultado una respuesta favorable en las emisiones totales de CH<sub>4</sub>, consiguiendo reducciones importantes. Los resultados obtenidos también sugieren que el carácter residual de ingesta, RFI, puede ser preferible a DMI en un índice de selección y se puede conseguir una reducción de la ingesta. Además, resulta útil incorporar la microbiota ya que complementa al resto de caracteres.

El análisis de sensibilidad teniendo en cuenta la variación en el valor económico de MeC y en el precio de la UFL mostró que las respuestas genéticas son obtenidas son robustas ante los cambios en el precio del carbón y en el coste de alimentación.

Este trabajo sugiere que existe un potencial para mitigar las emisiones de CH<sub>4</sub> y aumentar eficiencia mediante la selección genética a través de la inclusión de CH<sub>4</sub> en los objetivos de selección del ganado lechero mientras se mantiene su rentabilidad. Su inclusión en los índices de selección permitirá seleccionar vacas de bajas emisiones y más eficientes.

**Palabras clave:** Holstein, metano, ingesta, microbiota, índice de selección, sostenibilidad, eficiencia.

## RESUM

---

El canvi climàtic s'ha convertit en una de les preocupacions internacionals principals i se sap que el principal contribuent és l'alliberament de gasos d'efecte hivernacle (GEH). El diòxid de carboni ( $\text{CO}_2$ ) i el metà ( $\text{CH}_4$ ) encapçalen el rànquing de GEH en més concentració a l'atmosfera. Les darreres estimacions de la FAO indiquen que l'activitat ramadera pot suposar fins a un 12.1% de les emissions globals de GEH, i el  $\text{CH}_4$  és el principal gas emès. El metà es produeix com un subproducte natural de la digestió dels rumugants i és indesitjable per dos motius, en primer lloc, contribueix a l'escalfament global, però a més representa una pèrdua l'energia consumida entre el 2 i el 12% de la ingesta d'energia neta. La reducció de les emissions de  $\text{CH}_4$  no només és beneficiosa per al medi ambient, sinó que també donaria com a resultat animals més eficients per al ramader. L'objectiu d'aquest treball va ser, doncs, proposar possibles subíndexs de selecció que incloguin les emissions de metà (MeP) i l'eficiència alimentària (DMI o RFI) en boví lleter a Espanya.

Els valors econòmics de producció, tipus i funcionalitat van ser proporcionades per CONAFE (ICO), el valor econòmic de MeP es va calcular a partir del preu del carboni al mercat voluntari, que estableix 14 €/g  $\text{CH}_4$ /dia per al 2050, resultant en -0.14 €/any. Per DMI es va estimar com el cost d'una unitat farratgera (0.31 €/kg).

Tots els subíndexs estudiats van donar com a resultat una resposta favorable a les emissions totals de  $\text{CH}_4$ , aconseguint reduccions importants. Els resultats obtinguts també suggereixen que el caràcter residual d'ingesta, RFI, pot ser preferible a DMI en un índex de selecció i se'n pot aconseguir una reducció de la ingesta. A més, és útil incorporar la microbiota ja que complementa la resta de caràcters.

L'anàlisi de sensibilitat tenint en compte la variació del valor econòmic de MeC i del preu de la UFL va mostrar que les respostes genètiques són poc sensibles als canvis.

Aquest treball suggereix que hi ha un potencial per mitigar les emissions de  $\text{CH}_4$  i augmentar eficiència mitjançant la selecció genètica a través de la inclusió de  $\text{CH}_4$  en els objectius de selecció del bestiar lleter mentre se'n manté la rendibilitat. La seva inclusió als índexs de selecció permetrà seleccionar vaques de baixes emissions i més eficients.

**Paraules clau:** Holstein, metà, ingesta, microbiota, índex de selecció, sostenibilitat, eficiència.

## ABSTRACT

---

Climate change has become one of the main international concerns, and it is known that the principal contributor is the greenhouse gases (GHGs) emissions. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>) top the ranking of GHGs in the highest concentration in the atmosphere. The latest FAO estimations indicate that livestock activity can account for up to 12.1% of global GHG emissions, with CH<sub>4</sub> being the main gas emitted. Methane is produced as a natural byproduct of ruminant digestion and is undesirable for two reasons: 1) it contributes to global warming, 2) it represents a loss of dietary energy between 2 and 12% of net energy intake. Reducing CH<sub>4</sub> emissions is not only beneficial for the environment but would also result in more efficient animals for the livestock industry. Therefore, the objective of this thesis was to propose possible selection sub-indices that include methane emissions (MeP) and feed efficiency (DMI or RFI) in dairy cattle in Spain.

The economic values of production, type, and functionality were provided by CONAFE (ICO), and the economic value of MeP was calculated based on the carbon price in the voluntary market, which sets €14/tCO<sub>2</sub> for 2050, resulting in -€0.14/g CH<sub>4</sub>/day. For DMI, the economic value was estimated as the cost of a forage unit (-€0.31/kg).

All the studied sub-indices resulted in a favorable response in total CH<sub>4</sub> emissions, achieving significant reductions. The results also suggest that RFI may be preferable to DMI in a selection index and that a reduction in intake can be achieved. Additionally, incorporating the microbiota is useful as it complements the rest of the traits.

The sensitivity analysis, considering the variation in the economic value of MeP and the price of UFL, showed that genetic responses obtained are robust to changes in carbon Price and feed cost.

This work suggests that there is a potential to mitigate CH<sub>4</sub> emissions and increase efficiency through genetic selection by including CH<sub>4</sub> in the selection objectives for dairy cattle while maintaining profitability. Including methane in selection indices will allow for the selection of low-emission and more efficient cows.

**Keywords:** Holstein, methane, feed intake, microbiota, selection index, sustainability, efficiency.

## ABREVIATURAS

---

GEI	Gases de efecto invernadero
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CO <sub>2</sub> eq	Dióxido de carbono equivalente
SF <sub>6</sub>	Hexafluoruro de azufre
3-NOP	3-nitrooxipropanol
Mt	Millones de toneladas
MeY	Rendimiento de metano
MeI	Intensidad de metano
MeP	Producción de metano
MeC	Concentración de metano
RMP	Producción de metano residual (por sus siglas en inglés residual methane production)
DMI	Consumo de materia seca (por sus siglas en inglés dry matter intake)
RFI	Consumo residual (por sus siglas en inglés residual feed intake)
CONAFE	Asociación española de Holstein
ICO	Índice de mérito genético total oficial de CONAFE
EBVs	Valor genético estimado (por sus siglas en inglés Estimated Breeding Values)
NDIR	Sensor de infrarrojo no dispersivo (por sus siglas en inglés, Non Dispersive Infrared Detector)
DA	Días abiertos
PV	Peso vivo
Long	Longevidad
ICAP	Índice de capacidad corporal
RCS	Recuento de células somáticas
BCS	Conformación corporal
UFL	Unidad forrajera de leche
MS	Materia seca

## INDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Características incluidas en el actual índice ICO.....	20
<b>Tabla 2.</b> Fenotipos de metano con sus definiciones, beneficios y desventajas (Haas et al., 2017). .....	22
<b>Tabla 3.</b> Proxies. ....	26
<b>Tabla 4.</b> Caracteres con sus unidades.....	36
<b>Tabla 5.</b> Valores económicos de los caracteres para el escenario de referencia y los escenarios de sostenibilidad.....	38
<b>Tabla 6.</b> Correlaciones genéticas entre los caracteres. ....	40
<b>Tabla 7.</b> Importancia económica relativa (%) de las características de producción, funcionalidad, tipo, emisiones de metano, ingesta y composición de la microbiota incluidas en el índice para el escenario de referencia y para los seis escenarios propuestos.....	42
<b>Tabla 8.</b> Respuesta genética a la selección en unidades de desviación genética estándar de las características de producción, funcionalidad, emisiones de metano, ingesta y microbiota incluidas en el índice para el escenario de referencia y para los seis escenarios de sostenibilidad.....	44
<b>Tabla 9.</b> Cambios en la respuesta genética cuando se aumenta/disminuye un 50% el valor económico del metano en los seis escenarios.....	52
<b>Tabla 10.</b> Cambios en la respuesta genética cuando se aumenta/disminuye un 50% el precio de la UFL en los seis escenarios. ....	53

## INDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Emisión bruta total (Mt $CO_2eq$ ) en 2021, desagregada por sectores, actividades y gases. Extraído de la edición 2023 del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. ( <i>Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, 2023</i> ).....	13
<b>Figura 2.</b> Principales países que emiten mayor cantidad gases de efecto invernadero procedentes de la fermentación entérica en 2018 (FAO, 2018).....	17
<b>Figura 3.</b> Pesos económicos relativos en el índice nacional ICO 2019 extraído de <i>Programa de difusión de la mejora de la raza bovina Frisona, (2021)</i> para raza bovina Holstein de España .....	20
<b>Figura 4.</b> Cámara de respiración .....	23
<b>Figura 5.</b> Técnica de hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ ) para medir las emisiones es $CH_4$ (Hill et al., 2016).....	24
<b>Figura 6.</b> Sistema GreenFeed (Hristov et al., 2015) .....	25
<b>Figura 7.</b> Dispositivo sniffer.....	25
<b>Figura 8.</b> Respuesta genética a la selección esperada de las características de producción, funcionalidad y de metano e ingesta incluidas en el índice para el escenario de referencia y para los seis escenarios de sostenibilidad.....	50

## INTRODUCCIÓN

---

El cambio climático se ha convertido en una de las principales preocupaciones internacionales y se sabe que el principal contribuyente es la liberación de gases de efecto invernadero (GEI) (Gerber et al., 2010).

El incremento en la concentración de GEI se debe a la actividad humana, y está provocando que se intensifique el efecto invernadero, con el consecuente aumento de la temperatura de la Tierra. El efecto invernadero es un proceso que ocurre de forma natural, la Tierra retiene parte de la energía emitida por el sol, manteniendo así una temperatura adecuada para la vida. Parte de la radiación solar que llega a la Tierra es absorbida por la superficie y otra parte es reflejada de nuevo. La radiación solar absorbida por la superficie terrestre es re-emitida en forma de radiación infrarroja, los GEI absorben y emiten parte de esta radiación infrarroja, lo que contribuye a retener calor en la atmósfera. Hay muchos tipos de GEI responsables de este efecto, pero los más importantes por su gran capacidad de retener calor y por ser los que más emiten las actividades humanas son: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ) (IPCC, 2022).

La huella de carbono mide la totalidad de GEI que son liberados a la atmósfera. El  $\text{CO}_2$  es el gas que se encuentra en mayor concentración en la atmósfera, y es por ello que el resto de gases se miden en función de éste. La unidad estándar es el  $\text{CO}_2$  equivalente ( $\text{CO}_2\text{eq}$ ), que permite comparar y sumar las emisiones de los diferentes GEI, e indica el potencial de calentamiento global de cada uno de ellos.

El  $\text{CH}_4$  es el segundo mayor contribuyente al calentamiento global, después del  $\text{CO}_2$ . Un kilogramo de metano tiene un poder de calentamiento de entre 28 y 32 veces más que un kilogramo de  $\text{CO}_2$  en un periodo de 100 años (Forster et al., 2007; Myhre et al., 2013). Sin embargo, el  $\text{CH}_4$  tiene una vida útil estimada de 10 años en la atmósfera; mientras que la vida útil del  $\text{CO}_2$  es de más de 100 años, incluso miles. Por lo tanto, reducir el  $\text{CH}_4$  representa una oportunidad interesante para reducir la contribución de este gas al calentamiento global en un período corto de tiempo (IPCC, 2013).

Los datos de temperatura de la superficie terrestre y oceánica muestran un calentamiento de  $0.85^\circ\text{C}$  durante el período 1880-2012 (Stocker et al., 2013; IPCC, 2013). En la política climática internacional ya existen tratados sobre el cambio climático, como el Protocolo de Kioto (1997) o Acuerdo de París (2015), para frenar el aumento de la temperatura media mundial. En el CMNUCC (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático) de 2015 se acordó limitar el calentamiento mundial a  $1.5^\circ\text{C}$  en comparación con los niveles preindustriales, esto implicaría reducir las emisiones de GEI entre un 30 y un 40% para 2030 con respecto a 1990.

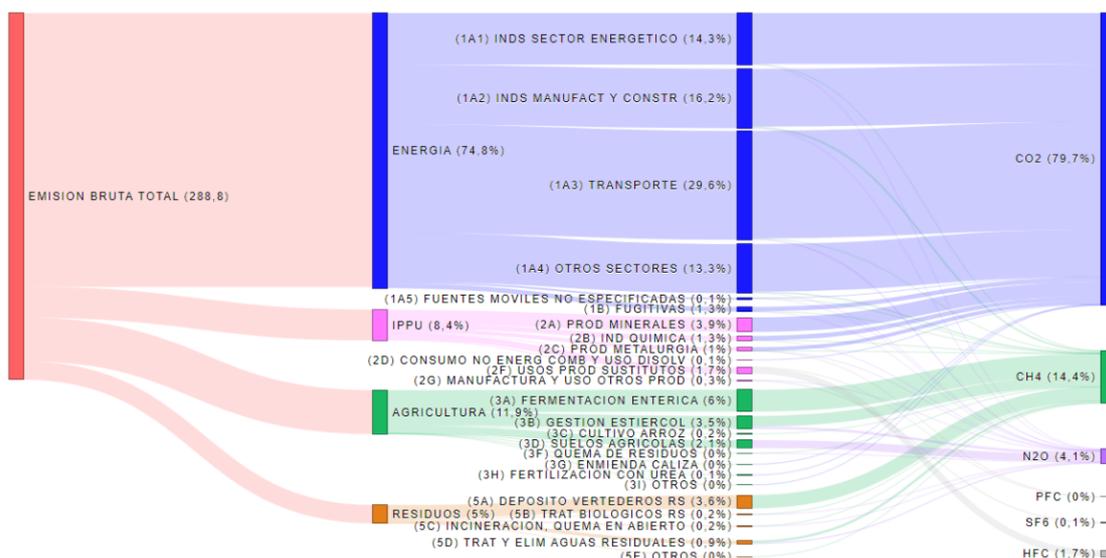
En el punto en el que nos encontramos, es de vital importancia buscar vías para mitigar las emisiones y limitar su impacto. Para ello, los científicos de diferentes campos intentan identificar las actividades humanas responsables de las emisiones de GEI para modernizarlas y hacerlas más sostenibles. Entre las actividades humanas que contribuyen a la acumulación de GEI y aumentan el calentamiento global se encuentran la quema de combustibles fósiles y residuos sólidos; actividades agrícolas e industriales; el uso del suelo y el tratamiento de aguas residuales (*Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector* | Parlamento Europeo, 2018).

## **1. Ganadería como fuente de emisiones de GEI**

En 2021, la mayoría de las emisiones de metano procedieron de la agricultura y ganadería, la silvicultura y la pesca (*Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector* | Parlamento Europeo, 2018). Las últimas estimaciones de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) indican que la actividad ganadera puede suponer hasta un 12.1% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (FAO, 2023). Estas cifras son más bajas en España, en la Figura 1 se pueden ver las emisiones brutas totales en 2021 según el sector, la agricultura supuso un 11.9% del total de GEI, correspondiendo el 6% del total a las emisiones de metano procedentes de la fermentación entérica de los rumiantes.

Los rumiantes desempeñan un papel importante en el suministro de alimento para la población, proporcionan el 51% de toda la proteína del sector ganadero (67% leche y 33% carne) (Gerber et al., 2013). Pero, al igual que cualquier sistema de producción ganadera, la producción bovina de leche y carne se enfrenta a un gran reto: ser sostenible desde el punto de vista medioambiental. Es deseable mejorar la productividad animal a la vez que se proporcionan a los consumidores productos de alta calidad y favorables con el medio ambiente.

A pesar de que un alto porcentaje de GEI es emitido por los rumiantes, éstos presentan una ventaja respecto al resto de animales, ya que son capaces de digerir material fibroso (forrajes, subproductos de la industria agroalimentaria y residuos de cultivos) y convertirlo en productos que sí pueden servir de alimento para los seres humanos (carne, leche). De este modo, los rumiantes son capaces de “reciclar” recursos que de otro modo se desperdiciarían.



**Figura 1.** Emisión bruta total (Mt CO<sub>2</sub>eq) en 2021, desagregada por sectores, actividades y gases. Extraído de la edición 2023 del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. (*Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, 2023*).

El metano se produce como un subproducto natural de la digestión de los rumiantes y es el principal GEI generado en la ganadería. Murray et al., (1976) publicaron que casi la totalidad del CH<sub>4</sub> exhalado se origina en el rumen (~90%) debido a la fermentación entérica, y solo una pequeña parte es generado en el intestino grueso (~10%) (Ellis et al., 2008). En el rumen, las arqueas anaerobias convierten el hidrógeno y el dióxido de carbono en CH<sub>4</sub> (de Haas et al., 2017) mediante un proceso denominado metanogénesis, que proporciona energía a los microorganismos (Knapp et al., 2014). El 90-95% del CH<sub>4</sub> producido se emite a través de la respiración y la eructación y una cantidad muy pequeña (1-5%) se libera por el recto.

El CH<sub>4</sub> que producen los rumiantes es indeseable por dos motivos, en primer lugar contribuye al calentamiento global como ya se ha mencionado, pero además representa una pérdida de la energía consumida de entre el 2 y el 12% de la ingesta de energía neta (Johnson & Johnson, 1995). La reducción de las emisiones de CH<sub>4</sub> no sólo sería beneficiosa para el medio ambiente, sino que también daría como resultado unos animales más eficientes para el ganadero (Haque, 2018; Yan et al., 2010).

Dentro de los rumiantes, el ganado bovino produce aproximadamente 7 y 9 veces más CH<sub>4</sub> que el ganado ovino y caprino, respectivamente, según la revisión realizada por Broucek, (2014). Esto es así porque las vacas tienen un sistema digestivo más grande y complejo en comparación con las ovejas y las cabras. Además, su alimentación tiende a ser más rica en fibras vegetales y más baja en carbohidratos fácilmente digeribles; lo que genera un entorno ideal para la proliferación de microorganismos productores de metano en su rumen.

Stackhouse et al., (2011) evaluaron las emisiones de CH<sub>4</sub> según la etapa de vida y lactancia en la que se encontraba el animal y vieron que variaban. Las vacas lactantes emiten entre 85 y 131.2 g/d más CH<sub>4</sub> en comparación con las vacas que se encuentran en secado y las novillas, respectivamente. La etapa de la lactancia también influye en la cantidad de emisiones de CH<sub>4</sub>. El pico de lactación es el periodo en el que las vacas de leche emiten más cantidad de CH<sub>4</sub> al día, llegando a emitir alrededor de 430 g/d. Esta cifra baja hasta 250 g/d a medida que avanza la lactación y disminuye la producción de leche.

El nivel de emisión de CH<sub>4</sub> depende del peso corporal, la composición de la dieta, la cantidad de alimento consumido, la producción de leche (Hardan et al., 2023; Starsmore et al., 2023) y la microbiota ruminal (López-García et al., 2022). Sin embargo, sigue habiendo variación en la emisión de CH<sub>4</sub> entre vacas con la misma dieta y nivel de ingesta, lo que sugiere un efecto genético y animales con una predisposición genética para menores emisiones de CH<sub>4</sub>.

## **2. Estrategias para la mitigación de las emisiones de metano en rumiantes**

Uno de los retos actuales al que se enfrenta la ganadería es disminuir las emisiones de metano de los rumiantes sin alterar la producción (de Haas et al., 2017; Martin et al., 2010). En este ámbito se han propuesto ideas innovadoras para reducir las emisiones de diversas formas y según Johnson & Johnson, (1995) es posible reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> sin afectar negativamente a la productividad.

En Australia se publicó el *National Livestock Methane Program*, (2015) en el que se evaluaron diversas estrategias para reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> en ganadería. Estas estrategias se basan en el uso de suplementos en la alimentación, manejo del tipo de dieta adecuado y la mejora genética mediante la selección de animales con bajas emisiones. Beauchemin et al., (2022) y Knapp et al., (2014), también recogen opciones similares para la mitigación de las emisiones de metano entérico. Algunas de ellas se comentan a continuación:

### **Dieta**

Ajustar la calidad de la dieta es una estrategia clave para reducir las emisiones, ya que la composición del alimento ingerido por los rumiantes juega un papel fundamental en la producción de metano. Por ello, se están desarrollando dietas sostenibles y estrategias de manejo que minimicen el impacto ambiental de la ganadería, por ejemplo:

**Forrajes.** Los forrajes son una parte importante de la alimentación del vacuno, pueden representar entre el 50 y el 90% de la dieta. Además, son importantes para la salud digestiva y suministran energía y proteínas para la síntesis de leche (Benchaar, 2023). La cantidad de fibra de la dieta está asociada con

las emisiones de metano, los forrajes con mayores cantidades de fibra suelen estar asociadas con mayores emisiones de  $\text{CH}_4$ , en comparación con los de mayor contenido en almidón. Los forrajes procedentes de cereales (por ejemplo, maíz o cebada) contienen altas concentraciones de almidón, lo que favorece la producción de propionato sobre la de acetato y reduce la producción de  $\text{CH}_4$  en el rumen. Hassanat et al., (2013) publicaron en su estudio que hay un menor rendimiento y una menor intensidad de  $\text{CH}_4$  en vacas alimentadas con dietas a base de ensilado de maíz frente a dietas a base de ensilado de alfalfa.

En el *National Livestock Methane Program*, (2015) publicaron que, cuando la dieta contiene grano de trigo, la producción de metano por kg de DMI se reduce entre un 30% y un 50%, en comparación con dietas a base de pasto o con dietas que proporcionan grano de maíz (Moate et al., 2012). Además, la producción de leche aumenta en un 21% comparado con dietas basadas en pasto. Las dietas basadas en cereales y grano presentan dos problemas principalmente; por un lado, aumentan el riesgo de sufrir acidosis ruminal en el ganado, y además estos alimentos son usados por los humanos para su consumo. Por lo tanto, se debe ajustar la cantidad de trigo que se puede suministrar para no causar problemas de salud en los animales ni generar competencia con los alimentos que consumimos las personas.

En general, los estudios previos sugieren que se necesita una alimentación que aporte trigo con alto contenido en almidón y que permanezca poco tiempo en el rumen, para reducir considerablemente las emisiones de metano.

**Suplementos - Orujos.** Los rumiantes también presentan una ventaja para utilizar los subproductos de la elaboración de alimentos y además reducir emisiones de metano. Por ejemplo, el orujo de uva, que es un subproducto de la elaboración de vino y está formado por los residuos que quedan después de prensar las uvas. En la actualidad, es utilizado como complemento alimenticio por las industrias láctea y cárnica. Moate et al., (2014) demostraron que alimentar al vacuno de leche con orujo de uva reduce las emisiones de metano aproximadamente un 20%, gracias a su contenido en taninos de distintas composiciones y altas concentraciones de aceites y ácido tartárico, todos estos compuestos tienen el potencial de reducir las emisiones de metano en rumiantes.

**3-nitrooxipropanol.** El 3-nitrooxipropanol (3-NOP) es un compuesto orgánico sintetizado químicamente que inhibe el paso catalítico final de la metanogénesis en las arqueas del rumen, lo que impide la formación de  $\text{CH}_4$ . Estudios recientes han demostrado que este inhibidor de  $\text{CH}_4$  es uno de los métodos más eficaces para la reducción del  $\text{CH}_4$  entérico (Alemu et al., 2023; Yu et al., 2021). Se ha comprobado que el suministro de 3-NOP al ganado lechero y de carne puede disminuir la producción de  $\text{CH}_4$  entérico en un 30% de media. Se han realizado numerosos estudios que indica que el 3-NOP es efectivo y seguro cuando se incorpora a raciones en las dosis adecuadas (Honan et al., 2021; Hristov et al., 2015; Duin et al., 2016).

**Algas.** El alga marina roja, *Asparagopsis taxiformis*, produce metabolitos con actividad antimicrobiana que interrumpen la ruta de la metanogénesis de las arqueas del rumen de forma similar al 3-NOP (Mata et al., 2017). Recientemente se ha llevado a cabo un experimento con ovejas adultas alimentadas con *Asparagopsis* y se observó una reducción del 84% en las emisiones de metano por unidad de consumo de alimento (*National Livestock Methane Program*, 2015).

Las algas rojas tienen un gran potencial para ser empleadas como complemento en la dieta de los rumiantes para reducir las emisiones de GEI. Sin embargo, tienden a acumular metales pesados, yodo y otros minerales, por lo que es necesario un control de los minerales en las algas para evitar los riesgos (Makkar et al., 2016).

La barrera clave para su uso generalizado es su costo relativamente alto y su baja disponibilidad. Si se consiguen reducir los costes de producción de las algas rojas, esta estrategia sería rentable para muchos productores.

Todas las estrategias descritas anteriormente requieren una dieta específica o el uso de un complemento alimentario, por lo que es necesario su uso continuado. Además, el microbioma ruminal puede adaptarse y pueden llegar a no tener efecto.

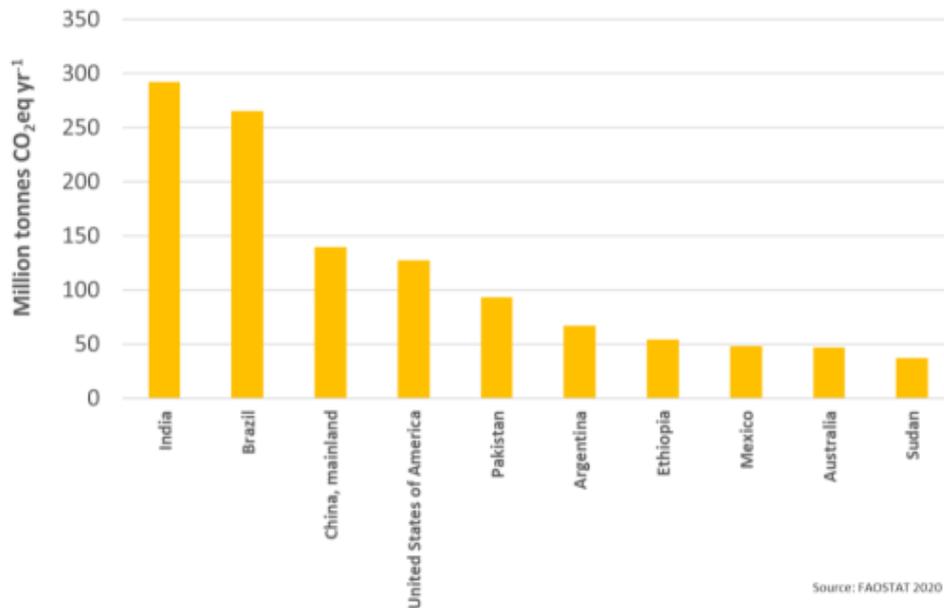
### **Selección genética**

La selección genética es una solución permanente y acumulativa para mejorar la sostenibilidad de la ganadería y con un coste de mano de obra mínimo para los ganaderos, en comparación con el uso de aditivos alimentarios y formulación de dietas específicas. Varios estudios han demostrado que es posible reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> mediante la selección genética de vacas más eficientes (Basarab et al., 2013; de Haas et al., 2011; González-Recio et al., 2020; Hegarty et al., 2007).

Numerosos países están intentando incorporar las emisiones de GEI en los objetivos de selección en el ganado lechero utilizando diferentes estrategias. Entre los objetivos actuales, se encuentran aumentar la longevidad y la fertilidad en los sistemas lecheros, lo que disminuye la tasa de reposición, por lo que habrá menos terneros en recría, se reduce tanto el coste de alimentación (menos animales a los que alimentar) como el número de cabezas de ganado, y consecuentemente se reducen las emisiones netas. Por otro lado, aumentar el contenido de grasa y proteína aumenta los ingresos netos por animal, lo que puede conllevar una disminución de la intensidad de emisiones (kg metano/producto) (Bell et al., 2013; Quinton et al., 2018; Özkan Gülzari et al., 2018). Las nuevas estrategias persiguen la selección directa de las emisiones, midiendo CH<sub>4</sub> o un carácter directamente correlacionado con él. En este trabajo nos vamos a centrar en esta última: la selección genética para reducir las emisiones de metano.

### 3. Estado del arte de la selección genética para bajas emisiones de metano

En 2018, el país con mayores emisiones anuales debido a la fermentación entérica fue India (292 Mt de CO<sub>2</sub>eq, principalmente de ganado vacuno), seguido de Brasil (265 Mt de CO<sub>2</sub>eq, principalmente de ganado vacuno), China (140 Mt de CO<sub>2</sub>eq), Estados Unidos (127 Mt de CO<sub>2</sub>eq) y Pakistán (93 Mt de CO<sub>2</sub>eq) (Figura 2) (FAO, 2018).



**Figura 2.** Principales países que emiten mayor cantidad gases de efecto invernadero procedentes de la fermentación entérica en 2018 (FAO, 2018).

A pesar de la preocupación mundial por el cambio climático y la concienciación en la reducción de las emisiones de GEI, las políticas mundiales no penalizan las emisiones ni compensan su reducción, por lo que no hay incentivos para incluir las emisiones de CH<sub>4</sub> en los objetivos de cría. A pesar de ello, la incorporación de las emisiones de metano en los índices de selección es un área de investigación en desarrollo. Distintos países están explorando estrategias para identificar y seleccionar animales con una menor producción de metano, con el objetivo de mitigar el impacto ambiental de la agricultura y la ganadería.

En algunas regiones, existe un impuesto al carbono sobre la agricultura, por lo que se puede utilizar el valor de mercado del carbono para determinar el valor económico del metano. Sin embargo, hay países en los que no existe ningún impuesto de este tipo, por ejemplo, en España o Australia, por lo que este enfoque no se puede aplicar para estimar un valor directo.

En el estudio australiano de Richardson et al., (2021) se estimaron unos coeficientes que describen el cambio en CH<sub>4</sub> atribuido a cada carácter del índice de

selección australiano descrito en metano bruto e intensidad de metano, que pueden aplicarse como ponderaciones en un índice de selección para tener en cuenta el impacto ambiental.

En Irlanda, el ICBF, a través del Tully Progeny Performance Test Centre, ha iniciado un programa de registro de emisiones a gran escala, utilizando los sistemas GreenFeed. ICBF, DAFM y Teagasc han colaborado para publicar las primeras evaluaciones de metano entérico en toros de inseminación artificial con progenie comercial fenotipada. Sus evaluaciones de emisiones de metano se basan en registros de metano individuales de más de 1.500 animales de 19 razas diferentes. Actualmente, están desarrollando métodos para determinar la mejor manera de incluir el carácter de metano en los sectores lácteo (EBI), lácteo-cárnico (DBI) y cárnico. Para la ganadería irlandesa, el carácter objetivo de selección es la producción total de emisiones, y no la intensidad de emisiones como ocurre en Australia. Han desarrollado un subíndice de carbono para incluirlo en el actual índice económico EBI. Brevemente, se basa en aumentar el valor económico de las características que reducen las emisiones y reducir el valor económico de los caracteres que aumentan las emisiones (Kennedy, 2022).

En España, los objetivos de cría de la raza Holstein combinan la calidad y cantidad de leche con características funcionales como longevidad, fertilidad, caracteres morfológicos y recuento de células somáticas en su índice de selección ICO (Charfeddine y Pérez-Cabal, 2014). Se están realizando diversos trabajos para incluir las emisiones de CH<sub>4</sub> y la eficiencia alimentaria como objetivo de selección, así como la composición de la microbiota. En junio de 2023, CONAFE publicó por primera vez evaluaciones genéticas de emisiones de metano (CONAFE, 2023), utilizando información de emisiones de metano recogidas desde el año 2018. El carácter evaluado es la concentración de metano residual. También se ha definido un posible modelo bio-económico del que se podrían derivar los valores económicos para usar en el índice de selección (González-Recio et al., 2020; López-Paredes et al., 2020).

#### **4. Implementación de la selección genética para menores emisiones**

Para hacer selección genética es necesario implementar un programa correcto de mejora, en general, los programas de mejoran constan de las siguientes fases:

- Definir los objetivos de selección
- Control de rendimientos
- Realizar las evaluaciones genéticas, estimar los EBVs
- Difusión de genes mediante apareamiento selectivo

El presente trabajo pretende describir, de forma resumida, los principales pasos a seguir para implementar la selección genética de las emisiones de metano con el propósito de conseguir una ganadería más sostenible y eficiente. Para poder seleccionar genéticamente animales con menores emisiones de metano es necesario definir los objetivos de selección, medir directa o indirectamente las emisiones de los animales y realizar las evaluaciones genéticas. Para realizar los apareamientos entre aquellos animales con la combinación de caracteres más óptima económicamente a la vez que sostenible y eficiente, la herramienta que se propone son los índices de selección, que resumen el mérito genético de un individuo en un único valor.

#### **4.1. Definir los objetivos de selección**

Definir los objetivos de selección es el primer paso en el diseño de un programa de mejora. Los objetivos de selección son las características fenotípicas que queremos mejorar en nuestra población.

En la actualidad, los objetivos de selección en ganado lechero se centran en mejorar la rentabilidad, la conformación y el bienestar animal (Miglior et al., 2017). Aunque se han logrado avances en la selección para mejorar la rentabilidad y el bienestar animal, los objetivos de selección para caracteres relacionados con la sostenibilidad están en su inicio. Si bien es cierto que la selección genética ha reducido el impacto ambiental del ganado lechero de forma indirecta a través de la reducción del tiempo de recría, como resultado de mejoras en la fertilidad y la longevidad (Knapp et al., 2014). En los últimos años, el aumento de la sostenibilidad en la producción láctea, reduciendo las emisiones de metano sin afectar negativamente a las características económicamente importantes, ha cobrado mayor importancia.

En España se usa el índice de mérito genético total oficial de CONAFE (ICO) (*Programa de difusión de la mejora de la raza bovina Frisona*, 2021). El ICO sitúa en las primeras posiciones del ranking aquellos animales con potencial genético superior para los caracteres del objetivo de selección. Algunos caracteres del objetivo de selección no se miden por su dificultad y son seleccionados indirectamente a través de los criterios de selección. Los caracteres que se incluyen en el objetivo de selección dependen de factores económicos, de mercado, de salud y bienestar animal, de eficiencia de la producción y de adaptación al entorno, entre otros. En la Tabla 1 se muestran los caracteres que se incluyen en el actual índice de selección en España, los caracteres se agrupan en producción, tipo y funcionalidad, dentro de cada grupo hay caracteres específicos.

Cada carácter incluido en el índice tiene un peso económico relativo asociado. En la Figura 3 se muestran los caracteres del actual ICO con sus pesos relativos. Los kg de leche, grasa y proteína son los caracteres con mayor peso en el

índice ya que la producción tiene un gran impacto económico. La meta final es obtener mayores beneficios en la producción de leche, una vida productiva más prolongada y una menor incidencia de mastitis y días abiertos más cortos.

Caracteres	
<b>Producción</b>	Kg de leche Kg de grasa Kg de proteína
<b>Tipo</b>	Índice de patas y pies (IPP) Índice compuesto de ubre (ICU)
<b>Funcionalidad</b>	Días abiertos Recuento de células somáticas Longevidad Índice de salud podal (ISP)

Tabla 1. Características incluidas en el actual índice ICO.

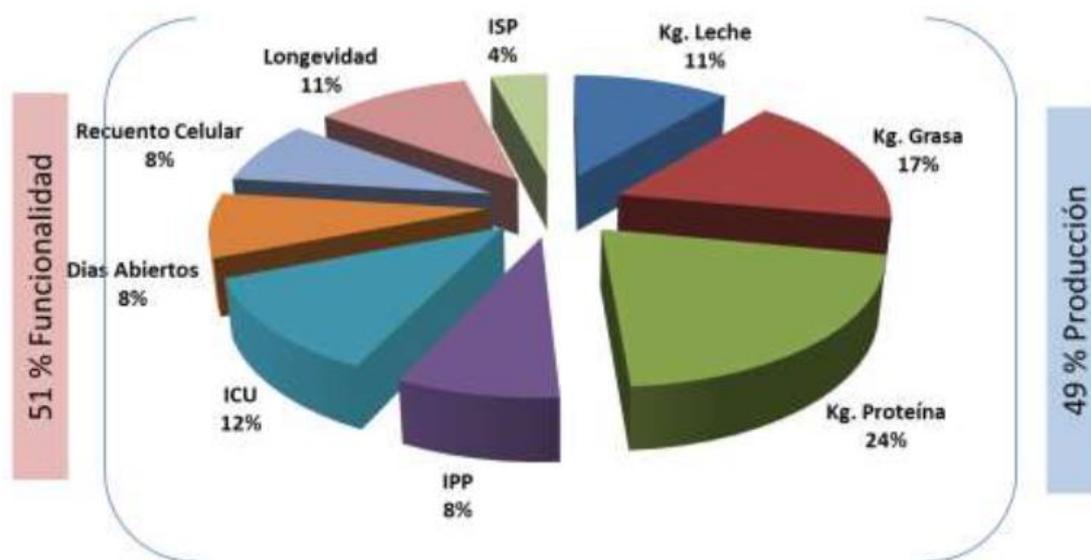


Figura 3. Pesos económicos relativos en el índice nacional ICO 2019 extraído de *Programa de difusión de la mejora de la raza bovina Frisona*, (2021) para raza bovina Holstein de España.

### 4.1.1. Caracteres de metano

Para poder realizar evaluaciones genéticas y posteriormente llevar a cabo la selección de animales con bajas emisiones, se necesita definir el fenotipo de emisiones de metano.

Se han sugerido varios fenotipos para representar las emisiones de metano (Tabla 2). El carácter más simple es la producción de metano (MeP) que es la cantidad de metano producido al día, y se expresa en g/día. Sin embargo, han estimado correlaciones positivas entre MeP y el consumo de alimento y los caracteres de producción (leche y carne). Por ello se han propuesto otros caracteres como la intensidad de metano (MeI), definido como cantidad de CH<sub>4</sub> dividido entre la cantidad de producto, por ejemplo, kg de leche o carne producida, o rendimiento de metano (MeY), que se define como cantidad de CH<sub>4</sub> relacionado con el consumo de alimento, por ejemplo, kg de DMI. Aunque al ser caracteres en forma de ratio se suelen desaconsejar en general en mejora. También se ha sugerido el uso de la producción de metano residual (RMP), definida como la producción de CH<sub>4</sub> observada menos la predicha (Manzanilla-Pech et al., 2016). En la RMP, se relaciona el fenotipo con otros caracteres, para el CH<sub>4</sub>, podría ser, producción de leche, peso corporal o ingesta de alimento.

Aun no hay un consenso sobre qué fenotipo de metano usar, pero si es necesario conocer la correlación entre el fenotipo que se usa y los demás caracteres de interés, como producción, fertilidad, longevidad, etc. en la selección, para ponderar correctamente y mejorar todos de forma simultánea.

En ganado vacuno, se han calculado las correlaciones genéticas entre peso vivo (PV) y algunos fenotipos de metano, siendo 0.79 con MeP, 0.18 con MeY y -0.23 con MeI (Donoghue et al., 2013). Y entre fenotipos de metano y producción de leche fueron 0,43 para MeP y 0,15 para MeY (Lassen & Løvendahl, 2016). Las correlaciones calculadas sugieren que dependiendo del fenotipo de metano seleccionado habrá diferente respuesta en otros caracteres.

También es importante saber la heredabilidad del fenotipo a usar, numerosos estudios han calculado la heredabilidad con valores que oscilan entre 0,10 y 0,42 en ganado lechero, dependiendo del carácter de metano que se esté investigando (de Haas et al., 2011; Lassen & Løvendahl, 2016; López-Paredes et al., 2020; Pickering et al., 2015).

En la Tabla 2 se resumen los principales beneficios y desventajas de cada fenotipo de metano (de Haas et al., 2017).

Fenotipo	Definición	Beneficios	Desventajas
<b>Producción de metano (MeP)</b>	Producción de metano por día (L/d o g/d).	Principal fenotipo que queremos mejorar. Fácil de entender. Heredable.	Altamente correlacionado con alimento ingerido y producción.
<b>Intensidad de metano (MeI)</b>	Producción de metano dividido entre producción (ej. Por kg de leche, peso vivo, carne).	Fenotipo de interés para el usuario.	Unidades no estandarizadas (camadas, energía, energía corregida...). Ratio trait, la selección puede ser difícil de incorporar adecuadamente. Se requiere un consenso para considerarlo como un fenotipo a seleccionar.
<b>Rendimiento de metano (MeY)</b>	Producción de metano dividido entre consumo de alimento (ej. kg de DMI).	Fenotipo de interés para el usuario.	Depende de la composición de la dieta. Difícil seleccionar en animales con diferentes dietas. No muy utilizado Ratio trait, la selección puede ser difícil de incorporar adecuadamente.
<b>Producción de metano residual (RMP)</b>	Producción de metano observado menos producción de metano predicho.	Buenas propiedades estadísticas. Apropiado para fenotipos que afectan a la producción de metano.	La correlación entre la producción de CH <sub>4</sub> observada y esperada puede ser baja, ya que los indicadores y los predictores no siempre son precisos Puede ser difícil de explicar a los ganaderos.

Tabla 2. Fenotipos de metano con sus definiciones, beneficios y desventajas (Haas et al., 2017).

## 4.2. Mediciones de las emisiones de metano en ganado

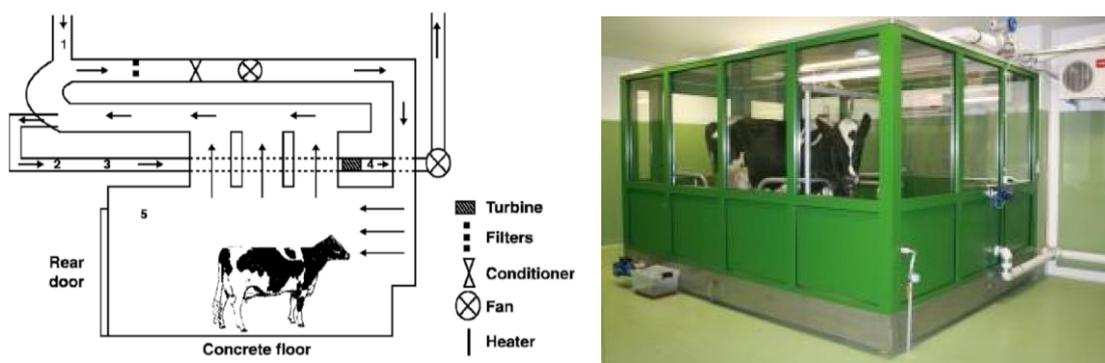
El segundo paso de un programa de mejora es esencial y consiste en el control de rendimientos. La medición del carácter en la población determina que podamos incluirlo como criterio de selección. Es necesario que las mediciones puedan realizarse a gran escala y que tengan una precisión suficientemente alta. Estas medidas que se usan como criterios de selección tienen que estar correlacionadas con el objetivo de selección.

Se puede realizar la medición directa o indirecta (proxies) de los caracteres.

#### 4.2.1. Mediciones directas

Medir individualmente la emisión de  $\text{CH}_4$  a nivel de la explotación no es una tarea fácil, pero con la llegada de la selección genómica, incluir la emisión de  $\text{CH}_4$  como un carácter objetivo de selección es alcanzable, incluso con un número limitado de registros (de Haas et al., 2017). Hay varias técnicas disponibles para medir el metano directamente en las granjas, usar una u otra técnica depende del coste, el nivel de precisión o el número de animales que se quieren estudiar. Cada una de las técnicas tiene ventajas y desventajas. A continuación, se describen brevemente las principales técnicas disponibles (Hammond et al., 2016).

**Cámaras de respiración.** Esta técnica se basa en recoger todo el aire exhalado del animal y medir la concentración de  $\text{CH}_4$ . Los animales se mantienen en cámaras cerradas durante 2 o 4 días con ventilación para la entrada y salida de aire (Figura 4), y se miden las emisiones continuamente en ese periodo de tiempo. Uno de los principales problemas que presenta esta técnica es que el animal no experimenta condiciones naturales dentro de la cámara y esto podría tener consecuencias desfavorables en su comportamiento; además, esta técnica tiene un elevado coste, requiere mucha mano de obra y no está diseñada para medir un gran número de animales simultáneamente, lo que impide su uso en granjas comerciales. Su uso se destina principalmente para experimentación con un pequeño número de animales. La ventaja del uso de la cámara de respiración es que es la técnica con mayor precisión y bajo coeficiente de variación en comparación con otros métodos (Grainger et al., 2007).

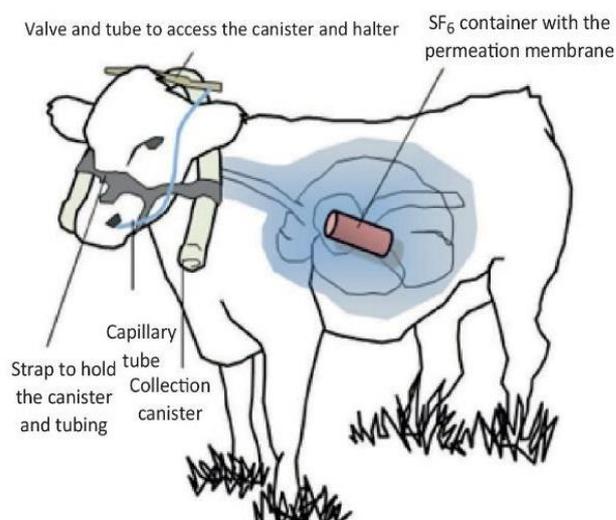


**Figura 4.** Cámara de respiración.

A) Diagrama esquemático de la cámara de respiración de circuito abierto que muestra los flujos de aire (Grainger et al., 2007).

B) Instalaciones de investigación de la Universidad de Ciencias de la Vida de Poznan, Polonia (Fuente: <http://globalresearchalliance.org/country/Polonia/> Consultado: 22 de marzo de 2024).

**Técnica SF<sub>6</sub>.** Está basada en la utilización del gas trazador hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), fue desarrollada originalmente por Johnson & Johnson (1995). Un gas trazador es un gas que se utiliza para rastrear y estudiar la dispersión y el movimiento de sustancias, aprovechando su capacidad para mezclarse y propagarse en el medio. El SF<sub>6</sub> es fácilmente medible y rastreable en bajas concentraciones, es de origen sintético y no se produce como parte de ningún proceso biológico. En esta técnica, el SF<sub>6</sub> se administra a través de un tubo de permeación (bolo), que se coloca en el rumen y se mide la proporción de SF<sub>6</sub> en el aliento del animal, tal y como se muestra en la Figura 5. Conociendo la concentración del trazador, se puede calcular la tasa de producción de CH<sub>4</sub>. Esta técnica permite la cuantificación diaria de CH<sub>4</sub> de cada animal, y es apropiada para medir las emisiones de metano en sistemas de pastoreo. Los equipos se instalan sobre el animal sin impedir ni limitar sus movimientos ni sus hábitos. Este método ha demostrado dar resultados razonables, pero con una gran variabilidad (Pinares-Patiño & Clark, 2008). Además, el SF<sub>6</sub> es un gas de efecto invernadero y su uso ha sido prohibido en varios países (Grainger et al., 2007; Moate et al., 2021).



**Figura 5.** Técnica de hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) para medir las emisiones es CH<sub>4</sub> (Hill et al., 2016).

**GreenFeed.** El dispositivo GreenFeed (Figura 6) es un sistema que monitoriza la composición de gases metabólicos de los animales de forma no intrusiva. Consiste en un extractor de aire al que el animal se acerca en busca de alimento, el sistema registra los flujos de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> del aire exhalado mientras come. El sistema está optimizado para capturar cuantitativamente el aliento del ganado y analizar los gases emitidos. La precisión de la concentración de emisiones por el dispositivo GreenFeed depende en gran medida de la frecuencia y la duración de las visitas de los animales al día. Un mayor número de visitas al dispositivo aumenta la repetibilidad y la certeza en la estimación de las emisiones diarias de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> (Hristov et al., 2015).

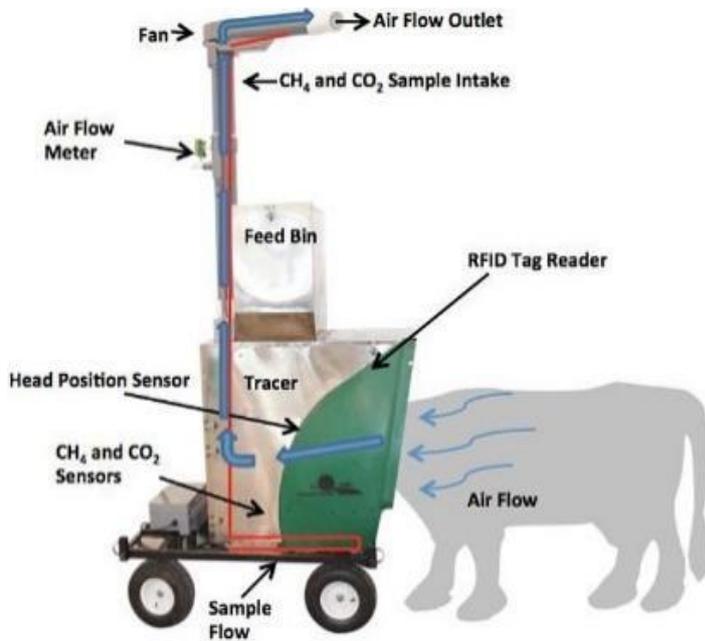


Figura 6. Sistema GreenFeed (Hristov et al., 2015).

**Sensor de infrarrojo no dispersivo (NDIR).** El NDIR se conoce comúnmente como sniffer. Los sniffers (Figura 7) son dispositivos que se colocan en la tolva de alimentación de las estaciones robóticas de ordeño y registran los gases emitidos durante el ordeño individual. Funciona midiendo la absorción de luz infrarroja por parte del gas en una muestra de aire, proporcionan mediciones en tiempo real de las concentraciones de metano en el rango de partes por millón (ppm). Se hace una estimación de la tasa media individual de emisión de  $\text{CH}_4$  utilizando la información sobre la frecuencia de eructación y el  $\text{CH}_4$  liberado por eructación (Garnsworthy et al., 2012a;b). La tasa de emisiones de  $\text{CH}_4$  por animal se convierte luego en producción diaria de  $\text{CH}_4$  (MeP) mediante calibraciones (Madsen et al., 2010; Storm et al., 2012). La facilidad de uso de esta técnica y su bajo costo ha permitido que se haya utilizado ampliamente para medir las emisiones de  $\text{CH}_4$  en un gran número de animales en condiciones de granja. Sin embargo, los dispositivos sniffer dependen en gran medida de la posición del hocico del animal, lo que aumenta la variación y disminuye la fiabilidad, afectando asimismo a su repetibilidad y precisión (van Breukelen et al., 2023).



Figura 7. Dispositivo sniffer.

Sin embargo, en el estudio de van Breukelen et al., (2023) se demostró que la correlación genética entre las emisiones de metano medida por GreenFeed y las medidas por sniffer es alta ( $0,71 \pm 0,13$  para medias diarias y  $0,76 \pm 0,15$  para medias semanales). Además, la heredabilidad para medidas de GreenFeed es moderada y similar a la heredabilidad estimada para sniffers,  $0,19 \pm 0,02$  y  $0,33 \pm 0,04$  para medias diarias y semanales para GreenFeed, y  $0,18 \pm 0,01$  y  $0,32 \pm 0,02$  para las medias diarias y semanales de los sniffers, respectivamente.

#### 4.2.2. Mediciones indirectas

Los proxies (mediciones indirectas) se han desarrollado con el fin de complementar a las mediciones directas, que son costosas y difíciles de obtener a gran escala.

Proxy	Simplicidad(1)	Coste(2)	Rendimiento (3)	Precisión(4)
Ingesta de materia seca (DMI)	M	A	B	M
Consumo energético bruto (GEI)	M	A	B	A
Microbiota ruminal	B	A	M	B/M
Tiempo de rumia	A	M	A	B/M
Volumen ruminal	B	A	B	M
Producción de leche	A	B	A	M/A
Contenido grasa	A	B	A	B/M
Contenido proteínas	A	B	A	B/M
Espectroscopia infrarroja de la leche (MIR)	A	B	A	A
Etapas de lactancia	A	B	A	-
Peso corporal	A	M	A	M

**Tabla 3.** Proxies. (1) La simplicidad es la facilidad con la que se puede realizar la medición de un proxy (2) El costo son todos los costos asociados con la medición del carácter (3) El rendimiento es la cantidad de datos o fenotipos del proxy que se pueden medir o generar en un tiempo determinado (por animal) (4) La precisión se refiere a la precisión del indicador del carácter metano. **A** se refiere a Alto/a, **M** con Medio/a y **B** corresponde con Bajo/a.

El proxy ideal debe estar altamente correlacionado fenotípica y genéticamente con las emisiones de CH<sub>4</sub>, no ser muy costoso económicamente, y poder medirse fácil y repetidamente en un gran número de animales. Los proxies pueden ser menos precisos que la medida directa, pero si pueden medirse repetidamente se reduce el ruido aleatorio; es conveniente emplear una combinación de varios proxies, con lo que se consigue describir fuentes independientes de variación en las emisiones de CH<sub>4</sub>. Los proxies se basan principalmente en el consumo de alimento, la función del rumen y sus comunidades microbianas y la composición de la leche. La Tabla 3 ha sido adaptada del estudio de Negussie et al., (2017) y recoge los principales proxies utilizados.

### **4.3. Evaluaciones genéticas**

Una vez definidos los objetivos de selección y realizado el control de rendimientos, el siguiente paso de un programa de mejora es realizar las evaluaciones genéticas para estimar los valores genéticos aditivos (EBVs) de cada animal para los criterios de selección.

Se utilizan modelos estadísticos para estimar el valor genético de cada animal en función de sus datos de control rendimientos y de su relación genética con otros individuos en la población. Los modelos tienen en cuenta factores como el parentesco, la variabilidad ambiental y otros efectos no genéticos que pueden influir en las características evaluadas, como los efectos ambientales.

En España, CONAFE realiza las evaluaciones genéticas nacionales del ganado vacuno frisón de toda la población que se encuentra en la Base de Datos, a partir del control sistemático de las producciones obtenido a través del Control Lechero Oficial, de otra información de caracteres funcionales (salud), de las aptitudes funcionales de la calificación morfológica y de genealogías. Se utiliza el método BLUP Modelo Animal, que garantiza la máxima probabilidad de evaluar y ordenar los toros de forma correcta (CONAFE, 2023). En CONAFE también se realizan evaluaciones genéticas de las emisiones de metano, a partir de medidas directas de las emisiones realizadas con sniffer. El carácter evaluado es la concentración de emisiones de metano que produce una vaca en cada evento de eructación expresada en ppm y el fenotipo por el que se evalúa es la media semanal para cada vaca.

### **4.4. Apareamientos: selección de los mejores individuos**

Los programas de mejora genética se diseñan con el objetivo de mejorar la eficiencia de las nuevas generaciones en comparación con la generación actual, de forma que sea más rentable bajo condiciones económicas y sociales. De modo que el

último paso de un programa de mejora es realizar los apareamientos para que los “mejores” animales sean los padres de la siguiente generación. La herramienta que empleamos para ellos son los índices de selección. Se necesita definir el modelo económico y la función de beneficios, para estimar los coeficientes de regresión del índice.

#### **4.4.1. Definir la función de beneficio**

Los modelos económicos y las funciones de beneficio permiten definir los ingresos y gastos en el sistema de producción, y estimar la importancia económica de los caracteres incluidos y su valor económico.

La función de beneficio es decisiva en dos de las fases más importantes de un programa de mejora genética: el cálculo de los valores económicos y la elección de los criterios de selección (Groen, 1989a, 1989b; Groen et al., 1997).

Harris (1970) sugirió tres posibilidades para definir la función de beneficio:

- Maximizar beneficios (= ingresos - costes)
- Minimizar los costes por unidad de producto
- Maximizar ingresos/costes

Los programas de mejora genética buscan mejorar la rentabilidad económica del propio ganadero, por lo que se busca preferentemente el primer punto, (Smith et al., 1986; Gibson, 1989):

$$B = I - C$$

Donde B son los beneficios, I son los ingresos y C son los costes. I y C son funciones de características de los animales.

#### **4.4.2. Estimación de los valores económicos**

Las características se ponderan por un valor económico para ejercer una presión de selección en función de los beneficios que queremos obtener. El valor económico representa el ingreso extra obtenido al incrementar en una unidad una característica con respecto a la media actual de la población, manteniendo las otras constantes y restando los costes por aumentar esa unidad. Los valores económicos calculados son corregidos por la variabilidad genética del carácter. Los valores económicos se obtienen a partir de las derivadas parciales de la función de beneficio con respecto a la característica considerada según se muestra en la Ec. 1 (Moav, 1973; Brascamp et al., 1985).

$$w_i = \frac{\partial(B)}{\partial i} = \frac{\partial(I)}{\partial i} - \frac{\partial(C)}{\partial i} \quad \text{Ec.1}$$

Donde  $w_i$  es el valor económico de la característica  $i$ .

Los valores económicos deben recalcularse cada cierto tiempo, en el caso de monogástricos cada dos o tres generaciones y cada cuatro o cinco años en programas con largos intervalos generacionales como vacuno de leche. Esto es porque las aproximaciones del modelo económico funcionan bien alrededor del punto al cual se aproximan, en este caso las medias de los caracteres, pero estas medias cambian con la selección. Además, las circunstancias del mercado pueden cambiar y un carácter importante, como puede ser el porcentaje de grasa en la leche, puede disminuir en valor económico debido a cambios de preferencias de los consumidores (Blasco, 2021).

#### 4.4.3. Índice de selección y valor aditivo económico

Los índices de selección son una herramienta que resume el mérito genético de un individuo en un único valor, combinando los valores aditivos de varios caracteres de forma económicamente óptima. Es la mejor herramienta de selección cuando el objetivo es maximizar la ganancia genética (Blasco, 2021).

El valor aditivo económico (también llamado genotipo agregado, traducido de la terminología inglesa “aggregate genotype”) de cada animal expresa la eficiencia económica del mérito genético global en función de unos caracteres que determinan dicha eficiencia (Charffeddine & Alenda, 1998). El valor aditivo económico involucra todos los caracteres que tienen una importancia económica decisiva en la producción animal de la especie ganadera.

El índice de selección puede contener datos de caracteres que no están incluido en el valor aditivo económico, y a su vez, el valor aditivo económico puede incluir valores aditivos de caracteres que no se miden, por ejemplo, la velocidad de crecimiento (criterio de selección) y el índice de conversión (objetivo de selección). A los caracteres incluido en el valor aditivo económico se les denomina objetivos de selección y a los caracteres medidos criterios de selección. Algunos caracteres son objetivos y criterios de selección, como los kg de leche (Blasco, 2021).

El valor aditivo económico ( $a_E$ ) se define como una ecuación que combina los valores genéticos aditivos de los caracteres de interés ponderados según su importancia económica relativa (Hazel, 1943), se mide en unidades monetarias:

$$a_E = w_1a_1 + w_2a_2 + \dots + w_na_n \quad \text{Ec.2}$$

Donde  $w_i$  es el valor económico del carácter  $i$  y  $a_i$  es el valor genético aditivo para la característica  $i$ .

El índice de selección ( $I$ ) es la predicción del valor aditivo económico para cada individuo:

$$I = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m \quad \text{Ec.3}$$

Donde  $b_j$  es el coeficiente de regresión del carácter  $j$  y  $x_j$  representa el valor genético predicho para el carácter  $j$ .

Los índices de selección son insesgados y minimizan la varianza del error de predicción; además maximizan la precisión y por tanto la fiabilidad de la predicción. También maximizan la respuesta a la selección. Las ventajas de los índices son mayores cuando las heredabilidades son bajas, ya que, si la heredabilidad es alta, el valor individual sería una buena predicción del valor aditivo. Es por ello que para este trabajo se emplean los índices de selección como herramienta para seleccionar individuos con menores emisiones de metano.

# OBJETIVOS

---

## **Objetivo principal**

El objetivo principal fue proponer posibles subíndices de selección que incluyan las emisiones de metano y la eficiencia alimentaria en el vacuno lechero en España; utilizando para ello datos del control lechero, tipo y funcionalidad procedentes de CONAFE, datos de emisiones de metano obtenidas con detector infrarrojo no dispersivo de metano y datos de microbiota procedentes del proyecto METALGEN, datos de ingesta del proyecto RDGP.

## **Objetivos específicos**

- Evaluar si es posible reducir las emisiones de metano con la incorporación del carácter MeP en el objetivo de selección.
- Comparar las respuestas genéticas estimadas de los caracteres obtenidas cuando se incluye DMI o RFI en el índice de selección.
- Evaluar las consecuencias de la inclusión de los caracteres de microbiota en el índice de selección.
- Evaluar cómo afecta la inclusión de los caracteres de ingesta, emisiones de metano y microbiota a los caracteres de producción.
- Realizar un análisis de sensibilidad para evaluar la solidez de los resultados.

# MATERIALES Y MÉTODOS

Todos los datos que se usan en el estudio proceden de proyectos previos del grupo y de CONAFE:

- Emisiones de metano de 1501 vacas de 14 granjas comerciales de regiones del norte de España, recogidos durante el ordeño en sistemas automáticos (AMS) medidos con detector infrarrojo no dispersivo del proyecto METALGEN.
- Datos de ingesta de 667 vacas de 5 granjas del norte de España del proyecto RDGP.
- Datos de microbioma ruminal de 422 vacas con datos de emisiones de metano.
- Datos de control lechero de CONAFE de todas las vacas con datos de emisiones de metano, ingesta y microbioma.

## 1. Teoría de los índices de selección

Gracias a la teoría de los índices de selección se pueden seleccionar individuos en base a múltiples características de interés de manera simultánea, maximizando el progreso genético. Los índices de selección son una combinación lineal de varios caracteres de importancia económica o biológica. Cada carácter tiene un peso (coeficiente del índice o coeficiente de regresión) asignado en función de su importancia relativa y su relación genética con otros caracteres (Hazel, 1943; Hazel et al., 1994).

Los coeficientes de regresión de los caracteres del índice se obtuvieron con la ec. 4 (Groen et al., 1997):

$$\mathbf{b} * \mathbf{P} = \mathbf{w}' * \mathbf{C}'$$
$$\mathbf{b} = \mathbf{w}' * \mathbf{C}' * \mathbf{P}^{-1} \quad \text{Ec.4}$$

Donde  $\mathbf{b}$  es el vector de coeficientes de regresión,  $\mathbf{P}$  es la matriz de varianzas-covarianzas entre los caracteres fenotípicos del índice,  $\mathbf{C}$  es la matriz de varianzas-covarianzas aditivas entre los caracteres objetivo de selección y los caracteres del índice y  $\mathbf{w}$  es el vector de valores económicos.

## 1.1. Importancia económica de los caracteres en el índice de selección

Dado que los valores económicos se expresan en unidades diferentes para cada carácter, es difícil comparar directamente la importancia económica entre los caracteres. Por ello, la importancia relativa de los caracteres en el índice de selección se expresa en porcentaje para poder compararlos.

La importancia relativa de un carácter es el resultado del producto del coeficiente de regresión por la desviación estándar genética del carácter, y dividido entre el total de todos los caracteres, expresado en porcentaje.

## 1.2. Respuesta a la selección

La respuesta genética esperada a la selección bajo los diferentes escenarios fue evaluada utilizando un índice de selección multi-carácter que incluye caracteres del ICO, emisiones de CH<sub>4</sub>, DMI o RFI y la composición de la microbiota.

La respuesta económica del índice (R) se calculó siguiendo la teoría de los índices de selección, según la siguiente ecuación:

$$R = r_{A_E, I} \sigma_{A_E} \quad \text{Ec.5}$$

Donde  $r_{A_E, I}$  es la correlación entre el genotipo agregado y el índice de selección y  $\sigma_{A_E}$  es la desviación típica del genotipo agregado.

Se predijo la respuesta a la selección de cada carácter para cada escenario utilizando la siguiente ecuación (Blasco, 2021):

$$R_i = \frac{\text{cov}(a_i, I)}{\sigma_{A_i} \sigma_I} i \sigma_{A_i} = \mathbf{w}' \mathbf{C}' \mathbf{P}^{-1} \text{cov}(a_i, y) \frac{i}{\sigma_I} \quad \text{Ec.6}$$

Donde  $\text{cov}(a_i, I)$  es la covarianza entre el valor aditivo del carácter  $i$  y la matriz del índice de selección,  $\sigma_{A_i}$  es la desviación estándar del carácter  $i$ ,  $\sigma_I$  es la desviación estándar del índice,  $i$  es la intensidad de selección ( $i=1.5$ ),  $\mathbf{w}$  es el vector de valores económicos,  $\mathbf{C}$  es la matriz de varianzas-covarianzas aditivas entre los caracteres objetivo de selección y los caracteres del índice,  $\mathbf{P}$  es la matriz de varianzas-covarianzas entre los caracteres fenotípicos del índice,  $\text{cov}(a_i, y)$  es la covarianza entre el valor aditivo del carácter y el valor fenotípico del carácter.

La ganancia genética esperada es mayor cuando se utiliza un índice de selección, en comparación con la selección basada en un sólo carácter o en varios caracteres de manera independiente. Esto se debe a que el índice considera las correlaciones genéticas entre los caracteres y optimiza la selección de manera conjunta.

## 2. Caracteres del objetivo de selección

El objetivo de selección de la raza frisona española (ICO) combina la calidad y la cantidad de leche con caracteres funcionales como son la longevidad, la fertilidad, los caracteres morfológicos, y el recuento celular.

Los caracteres incluidos en el objetivo de selección para el escenario de referencia fueron: kg de leche, grasa y proteína como caracteres de producción; días abiertos, longevidad y recuento de células somáticas como caracteres de funcionalidad y peso vivo como carácter de tipo. Se utilizaron los caracteres disponibles actualmente en CONAFE, cuyo objetivo es obtener mayores beneficios en producción de leche, aumentar la vida productiva, reducir la incidencia de mastitis y mejorar la fertilidad. Se puede encontrar más información sobre el índice ICO en Charfeddine, (2022).

En los escenarios propuestos como subíndices de sostenibilidad y eficiencia, los caracteres incluidos en el objetivo de selección fueron kg de grasa como carácter de producción; longevidad y recuento de células somáticas como caracteres de funcionalidad; peso vivo como carácter de tipo; producción de metano como carácter de emisiones; ingesta residual como carácter de eficiencia. La finalidad es reducir las emisiones y aumentar la eficiencia alimentaria sin penalizar la producción.

## 3. Caracteres del índice de selección

Se utilizaron los caracteres disponibles actualmente en CONAFE. Además, se incorporaron caracteres de metano, ingesta y composición de la microbiota para elaborar el subíndice de sostenibilidad.

**Caracteres de producción, tipo y funcionalidad.** Los caracteres que se tuvieron en cuenta para el estudio fueron kg de leche (kg), proteína (kg) y grasa (kg) ajustado a 305 días; índice de capacidad corporal (ICAP); fertilidad expresada en días abiertos (DA, días); longevidad (Long, días); condición corporal (BCS) en la primera lactación.

**Metano.** El carácter de emisiones de metano incluido fue la concentración de metano (MeC, ppm), que es la medida que se obtiene directamente de los sniffers.

**Ingesta.** El alimento es un componente importante de los costes variables asociados con los sistemas lecheros y, por lo tanto, debe tenerse en cuenta en los programas de mejora. Los caracteres de ingesta utilizados en este trabajo como proxys de eficiencia alimentaria son la ingesta de materia seca diaria (DMI, kg de MS/día) y la ingesta de alimento residual (RFI, kg de MS/día). DMI es el consumo

diario por animal, expresado en kg de materia seca. RFI se calcula como la diferencia entre la ingesta real de un animal y la ingesta esperada para un peso corporal y un nivel de producción dados. El ganado con valores de RFI más bajos es más eficiente que el ganado con valores de RFI más altos. RFI se considera independiente de la producción, el crecimiento y el tamaño corporal (Koch et al., 1963), lo que lo convierte en un rasgo ideal para seleccionar por eficiencia alimentaria ya que no compromete otros rasgos económicamente importantes.

**Composición del microbioma.** En estudios previos del grupo, se realizaron análisis de componentes principales (PCA) para reducir la complejidad de la composición del microbioma ruminal en unas pocas variables, tanto a nivel taxonómico como funcional (Saborío-Montero et al., 2021). Así se obtuvieron variables sintéticas agregadas (Componentes Principales, PC) que permiten condensar la información del metagenoma completo. En la publicación de Saborío-Montero et al., (2021) se propuso que se podían usar las variables agregadas (PC) como fenotipos de la composición de la microbiota ruminal en los programas de mejora, siendo un método indirecto para reducir las emisiones de metano, debido a sus correlaciones. Por ello, para este estudio se utilizaron los dos primeros componentes principales de la aproximación PCA transformada en taxonomía (T) o funcional (F), siendo finalmente los caracteres de microbiota: PC1T y PC1F, PC2T y PC2F. El primer PC muestra una relación inversa con la proporción de eucariotas, asociando mayores valores de PC1 con una menor proporción de eucariotas. El segundo PC muestra cierta correlación con el ratio de proteobacterias (firmicutes y bacteroidetes), que está asociado con acidosis ruminal.

En estudios previos del grupo también se analizó la relación entre las comunidades microbianas del rumen y las emisiones de metano (López-García et al., 2022), mostrando que, en general, un mayor nivel de emisiones de metano se asocia con mayor número de eucariotas en el rumen, mientras que los asociados con emisiones más bajas tienen mayor proporción de bacterias.

Por tanto, las vacas con valores altos de PC1 fomentan una composición de microbiota ruminal con menor proporción de eucariotas y menos emisiones de metano. Valores altos de PC2 implica una mayor abundancia relativa de proteobacterias. Se deben evitar valores altos de PC2 porque compromete la salud del rumen, haciendo a la microbiota más susceptible de sufrir acidosis.

En este trabajo se han evaluado seis escenarios que se podrían incorporar como posibles subíndices de sostenibilidad y eficiencia al actual índice ICO, para tener en cuenta las emisiones de metano y la ingesta en el objetivo de selección. Estos escenarios han sido comparados con un escenario de referencia que incluye los caracteres más destacados del ICO.

Escenario de referencia: Leche + Prot + Grasa + ICAP + Long + DA + BCS

Escenario 1: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI

Escenario 2: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI

Escenario 3: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI + PC1T + PC2T

Escenario 4: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI + PC1F + PC2F

Escenario 5: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI + PC1T + PC2T

Escenario 6: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI + PC1F + PC2F

Caracteres		Unidades
<b>Producción</b>	Kg de leche	kg
	Kg de grasa	kg
	Kg de proteína	kg
<b>Tipo</b>	Índice de capacidad corporal (ICAP)	-
	Peso vivo estimado (PV)	kg
	Condición corporal (BCS)	-
<b>Funcionalidad</b>	Días abiertos (DA)	días
	Longevidad (Long)	días
	Recuento de células somáticas (RCS)	100cel/mL
<b>Metano</b>	Concentración de metano (MeC)	ppm
	Producción de metano (MeP)	g/día
<b>Ingesta</b>	Consumo de materia seca (DMI)	kg de MS/día
	Consumo de alimento residual (RFI)	kg de MS/día
<b>Microbiota</b>	PC1 y PC2 Taxonomía	-
	PC1 y PC2 Funcionalidad	-

Tabla 4. Caracteres con sus unidades.

Los kg de grasa es el carácter de producción que se decidió incluir en todos los escenarios de sostenibilidad ya que la cantidad de ácidos grasos de la leche está directamente relacionada con las emisiones de metano (Chilliard et al., 2009; Dijkstra et al., 2011; Montoya et al., 2011). Es deseable reducir las emisiones de metano, pero sin comprometer excesivamente la cantidad de grasa de la leche, ya que es una fuente importante de beneficio económico para los ganaderos.

La longevidad y el ICAP también se incluyeron en los escenarios. Por su parte, la longevidad se tiene en cuenta porque es un carácter que ayuda a mejorar la sostenibilidad: si los animales tienen una vida útil mayor, la tasa de reposición se disminuye, por tanto, habrá menor número de animales, lo cual disminuye la ingesta y las emisiones totales del sistema productivo. El índice de capacidad corporal (ICAP) es interesante tenerlo en cuenta en los índices de eficiencia y sostenibilidad porque al seleccionar vacas que emitan menos metano y con valor negativo para la ingesta y peso vivo, se van a seleccionar animales de menor tamaño, que usan menores recursos para su propio mantenimiento.

Los principales caracteres de eficiencia y sostenibilidad son la ingesta y las emisiones de metano. A igualdad de producción, los animales que menos ingieren son los más eficientes porque necesitan menos alimento para generar la misma cantidad de producto. En cuanto a emisiones, si producen menos metano es que han hecho una mejor transformación de la energía ingerida en producto. Se diseñaron los escenarios tanto con DMI como con RFI para comparar cuál de los dos caracteres es preferible a la hora de incorporarlo al índice.

Los escenarios 3 a 6 incorporaron caracteres de composición de la microbiota ruminal. La composición microbiana es un carácter importante de investigar e incluir en la selección, se necesita fomentar un ecosistema ruminal saludable, limitando la comunidad de microorganismos que producen metano. Los caracteres de microbiota que se incluyen son PC 1 y 2 de taxonomía y funcionalidad. Es deseable tener una respuesta mayor de PC1 y valores más bajos de PC2 para reducir las emisiones sin poner en riesgo la salud del animal. El problema es que PC1 y PC2 están muy correlacionados, por lo que es difícil aumentar uno y disminuir el otro (Saborío-Montero et al., 2021).

#### **4. Valores económicos**

Los valores económicos utilizados de los caracteres de producción tipo y funcionalidad fueron proporcionados por CONAFE. Los valores económicos de RFI y MeP han sido calculados a partir del precio de UFL y el precio del carbono en el mercado voluntario, respectivamente (Tabla 5).

	Unidades	Escenario de referencia	Escenario sostenible
<b>Leche</b>	€/kg	0.27	0
<b>Prot</b>	€/kg	3.19	0
<b>Grasa</b>	€/kg	1.77	0.2
<b>DA</b>	€/días	-6.1	0
<b>PV</b>	€/kg	-0.7	-0.7
<b>BCS</b>	-	0	0
<b>RCS</b>	-	-15.82	-15.82
<b>LONG</b>	€/días	2.06	2.06
<b>MeP</b>	€/g/día	0	-0.143
<b>RFI</b>	€/kg	0	-0.32
<b>PC1T</b>	-	0	0
<b>PC2T</b>	-	0	0

**Tabla 5.** Valores económicos de los caracteres para el escenario de referencia y los escenarios de sostenibilidad. Prot: Proteína, DA: días abiertos, PV: peso vivo, BCS: conformación corporal, RCS: recuento de células somáticas, Long: longevidad, MeP: producción de metano, RFI: ingesta residual, PC1T y PC2T: componentes 1 y 2 de taxonomía.

El valor económico de MeP se calculó a partir del precio del carbono en el mercado voluntario, que establece 14€/tCO<sub>2</sub> para 2050 («Carbon Credits Face Biggest Test Yet, Could Reach \$238/Ton in 2050, According to BloombergNEF Report», 2024) ya que no hay una penalización oficial en España para las emisiones. Se multiplicó por 28 ya que el metano tiene un potencial calorífico 28 veces superior al dióxido de carbono, se transformó de toneladas/año a gramos/día:

$$ev \text{ CH}_4 = 28 * 14\text{€/tCO}_2 * 10^{-6}\text{g} * 365\text{días} = 0.143 \text{ €/g/día}$$

El valor económico para RFI se estimó como el coste de una unidad forrajera (0.32€/kg, precio medio del kg en España de los últimos cuatro años, MAPA (2022)).

La producción es una fuente importante de beneficios, con la intención de no disminuir ni penalizar la producción, el valor económico de grasa en los índices de sostenibilidad se pondera como un 10% de su valor económico.

## 5. Parámetros genéticos

**Matriz de (co)varianzas.** La matriz de (co)varianzas entre los caracteres del índice ICO fue proporcionada por CONAFE y la matriz de (co)varianzas entre los caracteres de metano y eficiencia alimentaria con los caracteres del producción, funcionalidad y tipo fue obtenido de estudios previos del grupo.

**Correlaciones genéticas y fenotípicas.** Las correlaciones genéticas y fenotípicas entre los caracteres del índice ICO fueron proporcionada por CONAFE utilizando datos de 1435 toros con evaluación genética oficial nacional en 2023 y fiabilidad

superior a 80%. Las correlaciones entre los caracteres de metano y eficiencia alimentaria con los caracteres de producción, funcionalidad y tipo se aproximaron utilizando los valores genéticos y la fiabilidad de los mismos, según la ecuación de Blanchard et al., (1983):

$$\hat{r}_g = \frac{\sqrt{\sum(\mathbf{f}_i)\sum(\mathbf{f}_i')}}{\sum(\mathbf{f}_i\mathbf{f}_i')} r_{(EBV,EBV')} \quad \text{Ec.7}$$

Donde  $\hat{r}_g$  es la estimación de la correlación genética entre dos caracteres, EBV es el valor genético estimado de un carácter, EBV' es el valor genético estimado del otro carácter,  $r_{(EBV,EBV')}$  es la correlación de Pearson entre los conjuntos de valores genéticos de los dos caracteres analizados,  $f_i$  y  $f_i'$  es la fiabilidad del EBV para la característica  $i$  y  $i'$  respectivamente.

En la Tabla 6 se muestran las correlaciones entre los caracteres.

## 6. Análisis de sensibilidad

La solidez de los resultados ante posibles variaciones se evaluó mediante análisis de sensibilidad para comprender la incertidumbre en el precio de carbono y en el coste de alimentación. Se consideraron diferentes situaciones con el fin de comprender las consecuencias:

- Variando un 50% el valor económico del MeC en el índice de selección.
- Variando un 50% el precio de la UFL

Las respuestas bajo estas estimaciones modificadas se compararon con las respuestas genéticas originales de cada escenario para evaluar la importancia de esta incertidumbre.

	Leche	Prot	Grasa	DA	PV	ICAP	BCS	LONG	RCS	MeC	MeP	DMI	RFI	PC1T	PC1F	PC2T	PC2F
Leche	1	0.94	0.74	0.51	0.25	0.32	-0.42	-0.04	0.12	-0.02	0.26	0.67	0.43	0.03	0.02	0.07	0.07
Prot	0.94	1	0.85	0.46	0.21	0.32	-0.37	0.01	0.15	-0.02	0.36	0.56	0.17	0.03	0.026	0.05	0.145
Grasa	0.74	0.85	1	0.41	0.18	0.32	-0.35	0.12	0.21	0.1	0.52	0.62	0.38	0.014	0.013	0.04	0.17
DA	0.51	0.46	0.41	1	0.02	0.3	-0.32	-0.3	-0.32	-0.11	-0.01	0.13	0.33	0.04	0.04	-0.08	0.3
PV	0.25	0.21	0.18	0.02	1	0.54	-0.05	-0.09	-0.01	0.35	0.66	0.34	0.26	-0.15	-0.06	-0.16	-0.38
ICAP	0.32	0.32	0.32	0.3	0.54	1	-0.03	-0.19	-0.04	0.02	-0.04	0.34	0.26	-0.003	-0.004	0.05	0.1
BCS	-0.42	-0.37	-0.35	-0.32	-0.05	-0.03	1	0.08	0.05	0.35	0.32	0.22	0.03	-0.22	-0.18	-0.2	-0.1
LONG	-0.04	0.01	0.12	-0.3	-0.09	-0.19	0.08	1	0.56	-0.08	-0.02	0	0	0.047	0.05	0.048	0.39
RCS	0.12	0.15	0.21	-0.32	-0.01	-0.04	0.05	0.56	1	-0.03	0.01	0	0	0.02	0.02	-0.005	0.31
MeC	-0.02	-0.02	0.1	-0.11	0.35	0.02	0.35	-0.08	-0.03	1	0.97	0.3	0.02	-0.7	-0.57	-0.13	-0.23
MeP	0.26	0.36	0.52	-0.01	0.66	-0.04	0.32	-0.02	0.01	0.97	1	0.16	0.25	-0.67	-0.53	-0.34	-0.36
DMI	0.67	0.56	0.62	0.13	0.34	0.34	0.22	0	0	0.3	0.16	1	0.94	-0.44	-0.23	-0.46	-0.18
RFI	0.43	0.17	0.38	0.33	0.26	0.26	0.03	0	0	0.02	0.25	0.94	1	-0.54	-0.36	-0.38	-0.29
PC1T	0.03	0.03	0.014	0.04	-0.15	-0.003	-0.22	0.047	0.02	-0.7	-0.67	-0.44	-0.54	1	0.97	-0.02	0.61
PC1F	0.02	0.026	0.013	0.04	-0.06	-0.004	-0.18	0.05	0.02	-0.57	-0.53	-0.23	-0.36	0.97	1	0.16	0.19
PC2T	0.07	0.05	0.04	-0.08	-0.16	0.05	-0.2	0.048	-0.005	-0.13	-0.34	-0.46	-0.38	-0.02	0.16	1	0.4
PC2F	0.07	0.145	0.17	0.3	-0.38	0.1	-0.1	0.39	0.31	-0.23	-0.36	-0.18	-0.29	0.61	0.19	0.4	1

**Tabla 6.** Correlaciones genéticas entre los caracteres. Prot: proteína, DA: días abiertos, PV: peso vivo, ICAP: índice de capacidad corporal, BCS: conformación corporal, Long: longevidad, RCS: recuento de células somáticas, MeC: concentración de metano, MeP: producción de metano, DMI: ingesta de materia seca, RFI: ingesta residual, PC1T y PC2T: componentes 1 y 2 de taxonomía, PC1F y PC2F: componentes 1 y 2 de funcionalidad.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

El manejo y la genética han conseguido un aumento sustancial en la producción de leche y han mejorado la eficiencia alimentaria, disminuyendo los costes por unidad de producto. Sin embargo, hay que tener en cuenta los costes ambientales, se debe dar importancia a las emisiones de metano entérico, el cual contribuye considerablemente a las emisiones globales de gases de efecto invernadero y supone una pérdida de energía dietética para los rumiantes.

Wall et al., (2010) propusieron tres vías para reducir las emisiones de metano mediante la selección genética: (i) mejorar la productividad y la eficiencia (por ejemplo, disminuyendo el consumo de alimento residual, aumentando la longevidad), (ii) reducir el desperdicio en el sistema agrícola, y (iii) seleccionar directamente las emisiones. Este estudio se centra en la última estrategia, que es la selección directa de vacas que emiten menos CH<sub>4</sub>.

Los principales desafíos al incorporar los caracteres ambientales en los índices de selección son: 1) identificar los criterios de selección apropiados, que estén disponibles en un gran número de candidatos a la selección, 2) evaluar las consecuencias de la selección directamente en los caracteres del índice y en otros caracteres correlacionados. En este estudio se evalúan seis escenarios que se podrían incorporar como posibles subíndices de sostenibilidad y eficiencia al actual índice ICO, en los que se incluyen las emisiones de metano, la ingesta y la composición de la microbiota ruminal. Estos escenarios han sido comparados con un escenario de referencia que incluye los caracteres del índice ICO.

A continuación, se evalúan y discuten los resultados obtenidos en este estudio.

### **1. Importancia económica relativa**

En la Tabla 7 se muestra la importancia económica relativa (%) de cada carácter en cada escenario.

El escenario de referencia (Escenario 0) representa un índice sin selección directa de eficiencia alimentaria ni metano; el valor económico para RFI y MeP en este caso fue 0. Este escenario pondera positivamente la producción, dándole prácticamente la totalidad del peso (86%). Esto es así porque los caracteres de producción son los que generan un mayor beneficio económico. El carácter ICAP tiene importancia económica relativa negativa (-5.2%), ya que, el valor económico para peso vivo es negativo y está positivamente correlacionado con ICAP. Una selección negativa para peso vivo conlleva una selección negativa para ICAP. El

carácter Días Abiertos tiene una importancia económica relativa de -4.3%, interesa reducir los días que transcurren desde que la vaca tiene un parto hasta que vuelve a quedar preñada, para así mejorar la fertilidad. Por último, a la conformación corporal se le asigna una importancia de 1.8%, lo cual es interesante para tener animales con buenas condiciones corporales y la longevidad también se pondera positivamente (3.1%) para mejorar la supervivencia del ganado.

### Importancia económica relativa (%)

	Escenario de referencia	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
Leche	48.4	-	-	-	-	-	-
Prot	8	-	-	-	-	-	-
Grasa	29.2	12	13.3	-1.9	4.6	-7	9.7
ICAP	-5.2	-19.2	-16.9	-17.4	-19.5	-9.7	-17.3
DA	-4.3	-	-	-	-	-	-
BCS	1.8	-	-	-	-	-	-
Long	3.1	49.7	46.1	36.6	32.2	16.3	32.6
MeC	-	-18.8	-17.6	-10.5	-16.5	-12.8	-16.8
DMI	-	-0.4	-	14.8	5.7	-	-
RFI	-	-	-6.2	-	-	20	-3.1
PC1T	-	-	-	6.9	-	21.9	-
PC2T	-	-	-	12.1	-	12.3	-
PC1F	-	-	-	-	-6	-	-7.9
PC2F	-	-	-	-	15.5	-	12.5

**Tabla 7.** Importancia económica relativa (%) de las características de producción, funcionalidad, tipo, emisiones de metano, ingesta y composición de la microbiota incluidas en el índice para el escenario de referencia y para los seis escenarios propuestos.

Prot: proteína, ICAP: índice de capacidad corporal, DA: días abiertos, BCS: conformación corporal, Long: longevidad, MeC: concentración de metano, DMI: ingesta de materia seca, RFI: ingesta residual, PC1T y PC2T: componentes principales 1 y 2 de taxonomía de la microbiota, PC1F y PC2F: componentes principales 1 y 2 de funcionalidad de la microbiota.

Escenario de referencia: Leche + Prot + Grasa + ICAP + Long + DA + BCS

Escenario 1: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI

Escenario 2: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI

Escenario 3: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI + PC1T + PC2T

Escenario 4: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI + PC1F + PC2F

Escenario 5: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI + PC1T + PC2T

Escenario 6: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI + PC1F + PC2F

En los escenarios 1 y 2 se comparan los dos fenotipos de ingesta que se pueden incorporar como caracteres del índice: DMI o RFI. En ambos escenarios, la MeC tiene una importancia relativa negativa y similar (18.8% en el 1 y 17.6% en el 2). La principal diferencia entre estos dos escenarios reside en la importancia relativa que se le da a DMI o RFI, siendo casi 0 el porcentaje para DMI y adquiriendo

una mayor importancia cuando se trata de RFI (-6.2%). En cuanto al resto de caracteres, la importancia económica es similar en ambos escenarios. La grasa se pondera positivamente, pero con una reducción considerable con respecto al escenario de referencia. Esta reducción se debe principalmente a la disminución en el valor económico de grasa, que es un 10% del valor que se usa en el escenario de referencia. El carácter ICAP tiene importancia negativa en ambos escenarios debido a su correlación positiva con peso vivo e ingesta, ambos caracteres con valor económico negativo. La longevidad tiene una importancia de casi el 50%, esto es interesante desde el punto de vista de eficiencia y sostenibilidad: si aumenta la vida media del ganado, disminuye la tasa de reposición, esto provoca a su vez que haya menor número de animales, disminuyendo las emisiones totales. Asimismo, se reducirían los costes de alimentación.

En los escenarios 3 a 6 se incluyen los caracteres de composición de la microbiota, PC1T y PC2T; PC1F y PC2F. El objetivo de estos escenarios es evaluar cómo afecta la incorporación de los caracteres de microbiota en el índice de selección y comparar las diferencias entre los PC de taxonomía y funcionalidad. La incorporación de la composición del microbioma, ya sea PC de taxonomía o funcionalidad, provoca cambios significativos en los porcentajes de grasa, DMI y RFI, con respecto a los escenarios 1 y 2. Las importancias relativas de ICAP, Long y MeC se ven menos afectadas por su inclusión. La importancia relativa del carácter de grasa sufre una gran reducción (con porcentaje negativo) en los escenarios en los que se incluye PC de taxonomía. La importancia relativa que se le da a DMI y RFI en los escenarios 3 a 5 es positiva. Estos cambios se deben a las correlaciones altas entre los componentes principales de microbiota con una gran cantidad de caracteres económicamente relevantes.

## **2. Respuesta genética esperada**

Se calculó la respuesta genética esperada de cada carácter a la selección en unidades del carácter/vaca/año, asimismo, se calculó el beneficio total del índice. Estos resultados se muestran en la Tabla 8 y gráficamente en la Figura 8.

### **2.1. Escenario de Referencia**

El escenario de referencia implica las respuestas más altas en los caracteres de producción: 380.9, 4.05, 12.40 kg/vaca/año para leche, proteína y grasa, respectivamente. Este incremento de la producción implica un aumento en la producción de metano de 4.68g diarios, y en la ingesta residual de 68.86

kg/vaca/año, lo cual no es deseable desde el punto de vista medioambiental ni para la eficiencia alimentaria. Además, estas respuestas en productividad también tienen un impacto negativo en la fertilidad, esto se refleja en un aumento de 2.2 días en los días abiertos (DA).

Carácter	Unidades	Escenario de referencia	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
<b>Leche</b>	kg/vaca/año	380.9	4.24	-1.34	35.40	12.49	50.05	0.14
<b>Prot</b>	kg/vaca/año	4.05	0.90	1.13	1.00	1.05	2.26	1.13
<b>Grasa</b>	kg/vaca/año	12.40	2.07	2.06	2.04	1.97	2.15	1.97
<b>PV</b>	kg/vaca/año	2.19	-3.28	-3.40	-3.26	-4.59	-1.79	-4.61
<b>LONG</b>	días/vaca/año	0.26	4.53	4.51	4.47	4.32	4.71	4.32
<b>DA</b>	días/vaca/año	2.22	-1.10	-1.18	-1.53	-0.53	-1.29	-0.60
<b>RCS</b>	100cel/mL/año	-0.13	-2.24	-2.25	-2.07	-1.15	-2.10	-1.37
<b>BCS</b>	-	-0.11	-0.03	-0.04	-0.01	-0.02	0.01	-0.03
<b>MeP</b>	g/día/vaca/año	4.68	-2.60	-2.74	-4.83	-3.72	-3.89	-3.17
<b>RFI</b>	kg de MS/vaca/año	68.86	-3.53	-19.22	0.24	-1.70	-20.08	-18.49
<b>PC1T</b>	-	0.07	0.86	1.05	0.71	0.96	0.74	1.01
<b>PC2T</b>	-	0.05	0.05	0.08	0.13	0.08	0.14	0.12
<b>Beneficio total anual</b>		97.83	8.10	8.15	8.21	8.51	7.79	8.59

**Tabla 8.** Respuesta genética esperada a la selección por vaca y año para el escenario de referencia y los seis escenarios propuestos como subíndices de sostenibilidad y eficiencia.

Prot: proteína, PV: peso vivo, Long: longevidad, DA: días abiertos, RCS: recuento de células somáticas, BCS: conformación corporal, MeP: producción de metano, RFI: ingesta residual, PC1T y PC2T: componentes principales 1 y 2 de taxonomía de la microbiota.

Escenario de referencia: Leche + Prot + Grasa + ICAP + Long + DA + BCS

Escenario 1: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI

Escenario 2: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI

Escenario 3: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI + PC1T + PC2T

Escenario 4: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI + PC1F + PC2F

Escenario 5: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI + PC1T + PC2T

Escenario 6: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI + PC1F + PC2F

Numerosos estudios han señalado que, debido al incremento en la producción de leche por vaca, se necesitan menos vacas para producir la misma cantidad de leche que hace unos años. Esto implica una reducción de las emisiones

totales de metano, pero un aumento del metano emitido por vaca (González-Recio et al., 2020; Manzanilla-Pech et al., 2021; Richardson et al., 2022). La reducción de las emisiones por vaca es posible si se incluyen en los objetivos de mejora tal y como muestran nuestros resultados.

## **2.2. Emisiones de metano**

En la Tabla 8 se muestra la respuesta genética estimada de la producción de metano. Las respuestas de MeP en los escenarios 1 a 6 varían entre -2.60 y -4.83 g/día, mientras que en el escenario de referencia la respuesta obtenida es 4.68g/día. Esto quiere decir que, en un índice de selección sin penalización para las emisiones, el metano emitido en g/día aumenta anualmente. Sin embargo, es posible conseguir una reducción del metano producido por vaca si se desarrollan subíndices cuyo objetivo sea mejorar la sostenibilidad.

La mayor disminución de las emisiones se consigue en el escenario 3, donde se incluye DMI y los componentes principales de taxonomía, consiguiendo una reducción de -4.83 g/día anuales por vaca. Los resultados obtenidos indican que sería posible reducir las emisiones de metano por vaca y año.

El valor económico utilizado para MeP ha sido calculado a partir del precio del carbono en el mercado voluntario (14€/tCO<sub>2</sub> para 2050). En publicaciones previas, se han desarrollado modelos bioeconómicos que incluyen las emisiones de metano. En González-Recio et al., (2020) se calculó el valor económico para las emisiones de metano 1) como una penalización de las emisiones mediante un impuesto al carbono, basado en el precio sombra del carbono, obteniendo un valor económico de -1.21€/kg; 2) como una pérdida neta de energía para el animal, siendo el valor económico de -0.32€/kg. En Bell et al., (2016) desarrollaron un modelo bioeconómico para derivar los valores económicos para caracteres de producción, salud, fertilidad y metano, obteniendo para el metano entérico un valor económico de -1,68£/kg de metano por lactancia, similar al obtenido por González-Recio et al., (2020). En el presente trabajo, el valor económico estimado de metano (-0.143€/kg) es más bajo que los empleados en estos estudios. Hasta que no se implemente impuestos específicos para las emisiones, no hay un consenso sobre qué valor económico imponer a las emisiones de metano.

En el trabajo de González-Recio et al., (2020) se analizó el impacto de la incorporación de las emisiones de metano en el objetivo genético del ganado lechero en España. En la publicación se muestra que, incluir el metano en los objetivos de selección puede disminuir el incremento de las emisiones totales, pero las emisiones por vaca/año seguirían aumentando. Esto se debe a que la correlación genética

entre el carácter de metano y los caracteres de producción es positiva y los ingresos de la industria láctea provienen principalmente de las ventas de leche.

En la publicación de Richardson et al., (2021) proponen una metodología novedosa para calcular los coeficientes del índice de selección teniendo en cuenta el impacto ambiental. Se sabe que los caracteres de producción, fertilidad, supervivencia, salud y eficiencia alimentaria tienen un efecto sobre las emisiones. En este estudio estimaron y compararon el efecto independiente de cada carácter sobre las emisiones brutas producidas por animal debido a la mejora genética, y calcularon unos coeficientes que se pueden emplear para ponderar los caracteres del índice de selección según su relación con las emisiones de metano. En este caso, no incorporan un carácter de metano, sino que cada carácter está ponderado según su influencia sobre las emisiones. Los resultados indicaron que, un subíndice de emisiones de GEI, es una herramienta efectiva que los ganaderos pueden usar para la reducción de las emisiones manteniendo la productividad. Los subíndices de sostenibilidad son efectivos tanto incluyendo el carácter directo de metano como ponderando los caracteres según su efecto sobre las emisiones.

Uno de los principales desafíos al incorporar las emisiones de CH<sub>4</sub> en los índices de selección es identificar los criterios de selección, que deben estar medidos en un gran número de animales. Como alternativa a los métodos directos de medición de las emisiones de CH<sub>4</sub>, que son costosos y difíciles de aplicar a grandes poblaciones, Shadpour et al., (2022) propusieron las mediciones MIR (espectroscopia de infrarrojo medio) como un método de medición indirecta para estimar las emisiones. Las mediciones MIR recopilan datos de los componentes específicos de la leche de forma rutinaria en las granjas. A través de los datos obtenidos, se predicen de forma indirecta los ácidos grasos de la leche y las emisiones. Este método se basa en que la proporción de los ácidos grasos de la leche están relacionados con la fermentación ruminal y las emisiones de metano. Las predicciones de emisiones de metano usando datos de MIR se podrían usar para tener datos de un mayor número de individuos.

### **2.3. Fenotipos de ingesta**

En este estudio se comparan las respuestas de los caracteres cuando se incluye DMI o RFI en los índices de selección.

El valor económico para RFI se estimó como el coste de una unidad forrajera (-0.32€/kg). En Stephansen et al., (2021) utilizaron coeficientes de regresión fenotípica para obtener el valor económico del consumo de alimento residual. El

valor económico de RFI obtenido en este estudio correspondió con el precio de la UFL en ese país (0,18 €/UFL).

La incorporación de RFI en el objetivo de selección permitió reducir la ingesta residual por vaca y año, según se muestra en la Tabla 8. Las respuestas genéticas estimadas de RFI oscilan entre 0.24 y -20.08 kg de MS por vaca y año, dependiendo de la combinación de caracteres del índice de selección. Se consigue una gran reducción de la ingesta comparado con en el escenario de referencia, en el que se obtuvo un incremento de 68.86 kg de MS anuales, lo que supone un mayor gasto en pienso. Cuando se incorpora RFI en el índice, se consigue una mayor reducción de la ingesta que cuando se incluye DMI. El escenario con una mayor reducción de la ingesta residual es el 5, en el que se incluyen RFI y los PC de taxonomía, con una reducción de -20.08kg de MS por vaca y año.

La respuesta de MeP no se ve excesivamente afectada por el carácter de ingesta que se incluya. Los caracteres de producción sufren una fuerte reducción en todos estos escenarios, la respuesta en el carácter de leche se ve más reducida cuando se incluye RFI en el índice de selección que cuando se incluye DMI; mientras que las respuestas de grasa y proteína prácticamente no varían entre los escenarios 1 a 6. El peso vivo tiene una respuesta negativa en todos los escenarios, esto es esperable debido a su valor económico (negativo) y a su correlación con los caracteres de ingesta. Los caracteres de funcionalidad (Long y DA) se mejoran en todos los escenarios, consiguiendo un aumento en la longevidad y en la fertilidad.

Estos resultados sugieren que el carácter residual de ingesta, RFI, puede ser preferible en un índice de selección ya que, a pesar de una disminución en la respuesta de los caracteres de producción, es el que consigue una mayor reducción en la respuesta de RFI y MeP. En el estudio de Bell et al., (2013) en el que se incluye DMI y un impuesto a la tasa de carbono generado por las emisiones de metano, también se obtuvieron respuestas muy bajas para el carácter DMI (-0.05kg/día). En el estudio de Gonzalez-Recio et al., (2014) se estimó la respuesta cuando se incluye RFI en el índice de selección, obteniendo 0.85kg/año.

Recientemente, Manzanilla-Pech et al., (2021) y Richardson et al., (2021) también sugirieron que los caracteres residuales son los más apropiados en un programa de mejora que incluya caracteres de eficiencia alimentaria debido a que son independientes de los caracteres de producción.

## **2.4. Efecto de la inclusión de los Componentes Principales de composición de la microbiota**

En los escenarios 3 a 6 se compara la respuesta entre incluir los fenotipos de la composición de la microbiota (PC de taxonomía y funcionalidad).

Cuando se incluyeron los caracteres de microbiota en el índice, se obtuvo una menor disminución de la respuesta de los caracteres de producción, esta disminución es más evidente en la respuesta de leche cuando se incluye PC de taxonomía. Además, observa una mayor reducción en las respuestas esperadas de emisiones.

Una respuesta alta de PC1 está relacionado con menor proporción de eucariotas, lo cual se relaciona con una mayor producción, menos kg de grasa, menos emisiones de metano y menor ingesta. En los escenarios 1 a 6, las respuestas esperadas de PC1T oscilan entre 1 y 0.7, mientras que en el escenario de referencia la respuesta es 0.071. Por su parte, el PC2 conlleva un mayor ratio de protobacterias, lo cual se relaciona con mayor riesgo de sufrir acidosis. Los valores obtenidos para PC2T no superan el 0.15. Es deseable tener una respuesta mayor de PC1 y valores más bajos de PC2, el problema es que PC1 y PC2 están muy correlacionados, por lo que es difícil aumentar uno y disminuir el otro (Saborío-Montero et al., 2021).

La incorporación de los componentes principales de taxonomía y funcionalidad en los programas de mejora genética animal provoca cambios directos de la composición de la microbiota y afecta indirectamente a las emisiones de metano, además de reducir el impacto negativo que la inclusión de los caracteres de sostenibilidad y eficiencia sobre la producción.

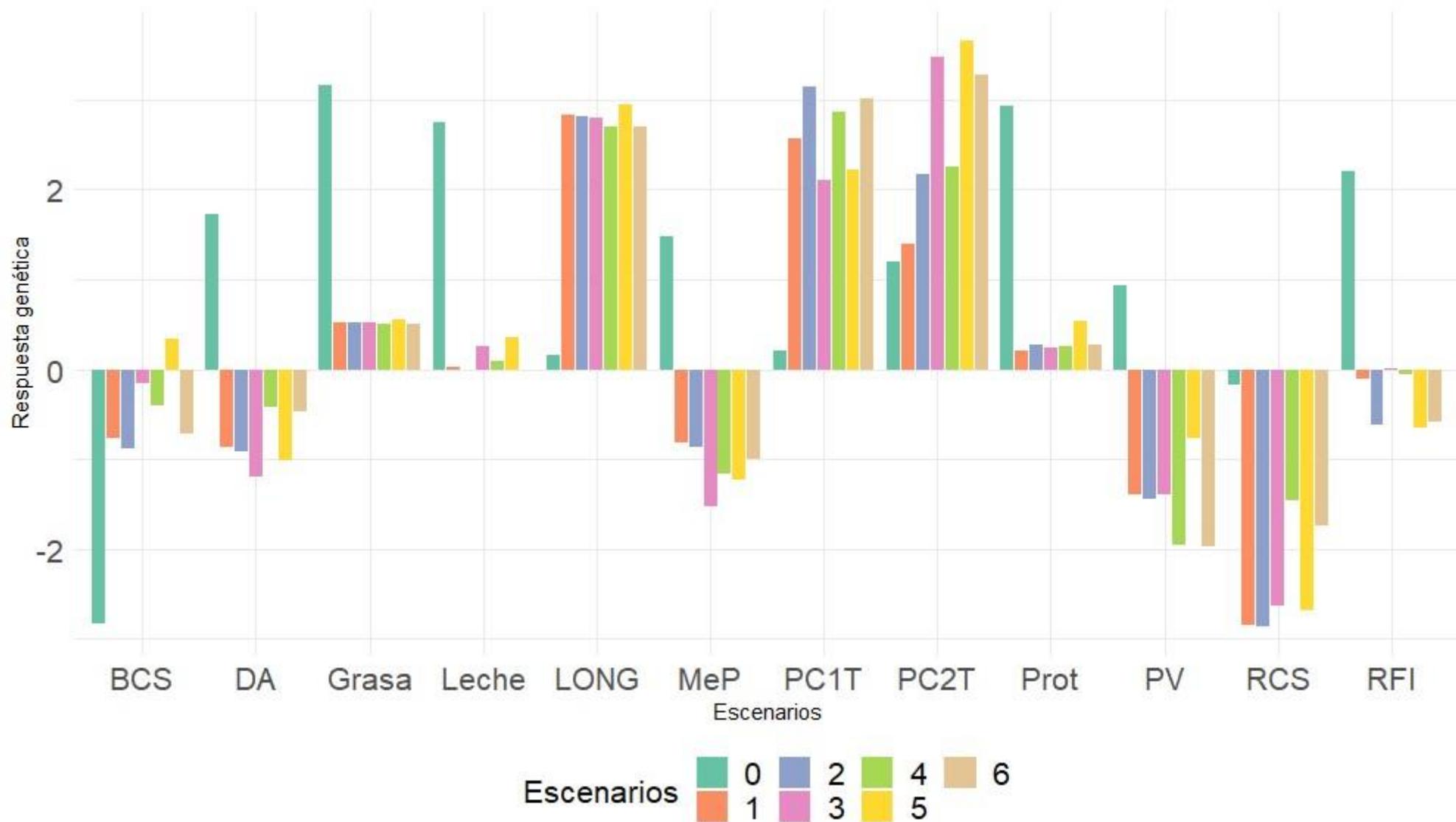
La inclusión de las variables del microbioma en los programas de mejora puede ayudar a realizar una selección más eficiente tanto con menores emisiones como con una mayor eficiencia alimentaria, según fue reportado por Lopez-Paredes et al., (2021), a través de la modulación del Metagenoma ruminal. Se usan los Componentes Principales, que son conjuntos de microorganismos, ya que es preferible fijarse en un conjunto de microbiota y no en microorganismos aislados. El aumento o disminución de un único microorganismo acabaría afectando a la composición global (Lopez-Paredes et al., 2021).

La implementación de los fenotipos de microbiota en los programas de mejora es difícil, ya que, a día de hoy, obtener información del microbioma ruminal es costoso y requiere mucha mano de obra, lo que implica una técnica invasiva (con un posible impacto en el bienestar del animal). Sin embargo, la microbiota oral se está estudiando como sustituto de la microbiota ruminal porque es más fácil de obtener y menos invasiva. Por otro lado, es necesario evaluar los efectos colaterales

que podrían afectar de forma adversa al metabolismo del animal. Es importante tener en cuenta que el rumen es un biorreactor complejo y la producción de metano es esencial para mantener la homeostasis ruminal. El límite biológico para la reducción de metano aún no se conoce, por lo que es crucial asegurar que una selección más estricta del metano no afecte negativamente la digestión de los alimentos y el bienestar animal en el futuro.

## **2.5. Rentabilidad**

En el escenario de referencia, la respuesta genética esperada de leche, grasa y proteína es muy superior a la respuesta que se obtuvo en los escenarios propuestos como índices de sostenibilidad y eficiencia. Hay que asumir que la inclusión de las emisiones en los objetivos de selección conllevaría una reducción en la ganancia genética de los caracteres de producción y un aumento más lento en los beneficios totales de las granjas, aunque siguen siendo positivos (González-Recio et al., 2020; Richardson et al., 2022). Aunque se espera que el efecto sobre la producción sea menor si además de los caracteres de emisiones de metano e ingesta se incorporan caracteres de microbiota.



**Figura 8.** Respuesta genética a la selección en unidades de desviación genética estándar de las características de producción, funcionalidad, emisiones de metano, ingesta y microbiota incluidas en el índice para el escenario de referencia y para los seis escenarios de sostenibilidad.

### **3. Análisis de sensibilidad**

La mejora genética animal intenta anticiparse a las condiciones futuras para conseguir el mejor tipo de animal para ese momento. Esto es un reto ya que la evolución de las condiciones ambientales, los sistemas de producción y las políticas son inciertas. Bekman & van Arendonk, (1993) mostraron que los valores económicos actuales pueden cambiar en función de precios y circunstancias futuras. Por ello, en este estudio se evaluó mediante análisis de sensibilidad la incertidumbre en el precio del carbono, que determina el valor económico de metano, y en el precio de la UFL, que determina el valor económico de la ingesta. En la Tabla 9, se muestran las respuestas esperadas a la selección cuando el valor económico de metano se aumenta o se disminuye en un 50% de su valor. En la Tabla 10, se muestran las respuestas esperadas a la selección cuando el precio de la UFL aumenta o disminuye un 50% del precio actual.

Los resultados mostraron que los caracteres son robustos antes los cambios. Cuando se aumenta o disminuye un 50% el valor económico de la producción de metano, no se observa una variación significativa en ninguno de los caracteres. La respuesta esperada para producción de metano es negativa y similar en todos los escenarios, por lo que a pesar de las variaciones en el precio del carbono, la respuesta de MeP se mantiene negativa.

Car.	Escenario de referencia	Variación	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
Leche	308.9	+50%	29.08	7.80	131.45	40.00	130.08	9.47
		-50%	52.47	47.90	66.42	58.21	262.42	42.05
Prot	4.05	+50%	1.15	1.59	1.28	1.29	-6.06	1.40
		-50%	2.61	3.15	2.72	2.48	-7.98	2.72
Grasa	12.40	+50%	0.42	0.41	0.37	0.34	0.50	0.34
		-50%	2.92	2.84	2.81	2.34	4.34	2.34
PV	2.19	+50%	-5.73	-5.96	-4.78	-7.43	-3.22	-7.59
		-50%	-5.80	-5.90	-6.02	-7.52	-2.38	-7.56
LONG	0.26	+50%	0.91	0.89	0.80	0.73	1.07	0.75
		-50%	1.02	1.00	0.99	0.82	1.52	0.82
DA	2.22	+50%	0.20	0.06	-1.41	1.15	-0.07	1.08
		-50%	0.45	0.18	0.31	1.35	0.08	1.20
RCS	-0.13	+50%	0.20	0.12	0.65	2.10	0.73	1.62
		-50%	0.09	0.08	0.15	1.94	1.03	1.61
BCS	-0.11	+50%	-0.10	-0.12	0.00	-0.06	-0.03	-0.09
		-50%	-0.12	-0.12	-0.12	-0.08	0.00	-0.09
MeP	4.68	+50%	-7.44	-7.21	-14.35	-8.46	-11.24	-7.12
		-50%	-3.32	-4.02	-4.20	-5.00	-9.83	-4.39
RFI	68.86	+50%	0.12	-46.23	3.65	1.22	-55.97	-38.93
		-50%	-17.03	-40.15	-3.65	-8.52	-60.83	-32.85
PC1T	0.071	+50%	1.78	2.25	1.37	1.76	1.86	1.92
		-50%	1.59	1.90	1.08	1.48	1.67	1.54
PC2T	0.045	+50%	0.03	0.13	0.22	0.10	0.30	0.19
		-50%	0.08	0.11	0.21	0.13	0.33	0.18

**Tabla 9.** Cambios en la respuesta genética cuando se aumenta/disminuye un 50% el valor económico del metano en los seis escenarios.

Car: características, Prot: proteína, PV: peso vivo, Long: longevidad, DA: días abiertos, RCS: recuento de células somáticas, BCS: conformación corporal, MeP: producción de metano, RFI: ingesta residual, PC1T y PC2T: componentes principales 1 y 2 de taxonomía de la microbiota.

Escenario de referencia: Leche + Prot + Grasa + ICAP + Long + DA + BCS

Escenario 1: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI

Escenario 2: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI

Escenario 3: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI + PC1T + PC2T

Escenario 4: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI + PC1F + PC2F

Escenario 5: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI + PC1T + PC2T

Escenario 6: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI + PC1F + PC2F

Cuando la modificación se hace en el precio de la UFL, los caracteres se muestran insensibles a los cambios, como se observa en la Tabla 10.

Car.	Variación	Escenario de referencia	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
<b>Leche</b>	+50%	391.08	50.08	33.86	114.24	56.46	197.52	30.85
	-50%	385.26	43.67	29.02	108.93	51.42	189.12	26.88
<b>Prot</b>	+50%	12.15	2.06	2.45	2.17	2.03	-6.88	2.12
	-50%	12.26	1.92	2.38	2.04	1.91	-6.88	2.06
<b>Grasa</b>	+50%	10.75	1.82	1.78	1.69	1.45	2.40	1.48
	-50%	11.38	1.67	1.63	1.56	1.34	2.18	1.35
<b>PV</b>	+50%	2.11	-5.75	-5.95	-5.43	-7.48	-2.80	-7.59
	-50%	2.48	-5.82	-5.98	-5.48	-7.52	-2.87	-7.62
<b>LONG</b>	+50%	0.27	0.98	0.96	0.91	0.78	1.29	0.79
	-50%	0.27	0.98	0.95	0.91	0.78	1.27	0.79
<b>DA</b>	+50%	2.68	0.33	0.19	-0.65	1.26	0.08	1.21
	-50%	1.92	0.32	0.14	-0.67	1.26	0.02	1.16
<b>RCS</b>	+50%	0.50	0.16	0.11	0.45	2.04	0.88	1.64
	-50%	0.95	0.15	0.11	0.45	2.04	0.87	1.63
<b>BCS</b>	+50%	-0.13	-0.11	-0.12	-0.05	-0.06	-0.02	-0.09
	-50%	-0.12	-0.11	-0.12	-0.05	-0.06	-0.02	-0.09
<b>MeP</b>	+50%	2.91	-5.76	-5.74	-10.27	-7.01	-10.76	-5.83
	-50%	3.68	-5.66	-5.78	-10.23	-6.95	-10.74	-5.87
<b>RFI</b>	+50%	68.13	0.00	-36.50	8.52	3.65	-49.88	-30.42
	-50%	68.13	-4.87	-41.37	3.65	-1.22	-55.97	-34.07
<b>PC1T</b>	+50%	0.15	1.67	2.06	1.22	1.59	1.73	1.71
	-50%	0.13	1.70	2.10	1.26	1.63	1.77	1.74
<b>PC2T</b>	+50%	0.05	0.04	0.11	0.22	0.10	0.31	0.18
	-50%	0.06	0.05	0.12	0.22	0.11	0.31	0.19

**Tabla 10.** Cambios en la respuesta genética cuando se aumenta/disminuye un 50% el precio de la UFL en los seis escenarios.

Prot: proteína, PV: peso vivo, Long: longevidad, DA: días abiertos, RCS: recuento de células somáticas, BCS: conformación corporal, MeP: producción de metano, RFI: ingesta residual, PC1T y PC2T: componentes principales 1 y 2 de taxonomía de la microbiota.

Escenario de referencia: Leche + Prot + Grasa + ICAP + Long + DA + BCS

Escenario 1: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI

Escenario 2: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI

Escenario 3: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI + PC1T + PC2T

Escenario 4: Grasa + ICAP + Long + MeC + DMI + PC1F + PC2F

Escenario 5: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI + PC1T + PC2T

Escenario 6: Grasa + ICAP + Long + MeC + RFI + PC1F + PC2F

Todos los sectores, incluido el agrícola, están avanzando hacia la reducción de su huella de carbono. Es de gran importancia que el sector no se quede atrás en un tema tan importante, de ahí la necesidad de desarrollar índices de selección en los que se tengan en cuenta las emisiones de metano, para avanzar en este sentido. Si se consiguen disminuir las emisiones de metano de los rumiantes sin alterar la producción, el sector no solo contribuirá a reducir las emisiones globales de GEI, sino que, además, mejorará la eficiencia de conversión de alimentos y, en consecuencia, la rentabilidad de las explotaciones agrícolas (de Haas et al., 2017; Martin et al., 2010). Este estudio muestra el potencial de incluir caracteres ambientales y de eficiencia en los índices de selección sin afectar a la rentabilidad para los ganaderos.

La selección para vacas más eficientes y una ganadería más sostenible es posible usando los caracteres propuestos (MeP, RFI y las variables de microbioma) como proxis. Además, es posible seleccionar para reducir las emisiones de metano sin reducir la cantidad de leche.

## CONCLUSIONES

---

- 1) La inclusión de MeP (g/día) en el objetivo de selección en los distintos escenarios propuestos conseguiría una reducción de las emisiones de metano de entre -2.60 y -4.83 g/día por vaca y año.
- 2) La incorporación de RFI en los objetivos de selección conseguiría una reducción de la ingesta residual. Si RFI se añade al índice de selección esta reducción sería de -19.22 kg por vaca y por año; mayor que la esperada con la inclusión de DMI (-3.53 kg por vaca y año). Esto es debido a que los caracteres residuales son independientes de los caracteres de producción.
- 3) La inclusión de las emisiones y la ingesta en los objetivos de selección conllevaría una reducción en la ganancia genética de los caracteres de producción y un aumento más lento en los beneficios totales de las granjas, aunque estos siguen siendo positivos.
- 4) La inclusión de los caracteres de microbiota reduce el efecto negativo que tienen los caracteres de ingesta y metano sobre la producción.
- 5) La inclusión de RFI combinada con las variables agregadas del microbioma (PC 1 y 2 de taxonomía) conseguiría una mayor reducción de la producción de metano (-3.89 g/día por vaca y año) y de la ingesta (-20.08 kg/vaca/año) que cuando no se incluye microbiota. Y con una mejor respuesta para producción.
- 6) Los resultados del análisis de sensibilidad mostraron que los índices de selección son bastante robustos a los posibles cambios en el precio del carbono y de la alimentación.

## BIBLIOGRAFÍA

---

Alemu, A. W., Gruninger, R. J., Zhang, X. M., O'Hara, E., Kindermann, M., & Beauchemin, K. A. (2023). 3-Nitrooxypropanol supplementation of a forage diet decreased enteric methane emissions from beef cattle without affecting feed intake and apparent total-tract digestibility. *Journal of Animal Science*, *101*, skad001. <https://doi.org/10.1093/jas/skad001>

Basarab, J. A., Beauchemin, K. A., Baron, V. S., Ominski, K. H., Guan, L. L., Miller, S. P., & Crowley, J. J. (2013). Reducing GHG emissions through genetic improvement for feed efficiency: Effects on economically important traits and enteric methane production. *Animal*, *7*, 303-315. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000888>

Beauchemin, K. A., Ungerfeld, E. M., Abdalla, A. L., Alvarez, C., Arndt, C., Becquet, P., Benchaar, C., Berndt, A., Mauricio, R. M., McAllister, T. A., Oyhantçabal, W., Salami, S. A., Shalloo, L., Sun, Y., Tricarico, J., Uwizeye, A., Camillis, C. D., Bernoux, M., Robinson, T., & Kebreab, E. (2022). Invited review: Current enteric methane mitigation options. *Journal of Dairy Science*, *105*(12), 9297-9326. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22091>

Bekman, H., & van Arendonk, J. A. M. (1993). Derivation of economic values for veal, beef and milk production traits using profit equations. *Livestock Production Science*, *34*(1), 35-56. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(93\)90034-F](https://doi.org/10.1016/0301-6226(93)90034-F)

Bell, M. J., Eckard, R. J., Haile-Mariam, M., & Pryce, J. E. (2013). The effect of changing cow production and fitness traits on net income and greenhouse gas emissions from Australian dairy systems. *Journal of Dairy Science*, *96*(12), 7918-7931. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6289>

Bell, M., Pryce, J., & Wilson, P. (2016). A comparison of the economic value for enteric methane emissions with other biological traits associated with dairy cows. *American Research Journal of Agriculture*, *2*.

Benchaar, C. (2023). *Nutritional Strategies to Mitigate Enteric Methane Emissions from Dairy Cows: State of Knowledge and New Perspectives*. Engormix. [https://en.engormix.com/dairy-cattle/dairy-industry/nutritional-strategies-mitigate-enteric\\_a52244/](https://en.engormix.com/dairy-cattle/dairy-industry/nutritional-strategies-mitigate-enteric_a52244/)

Blanchard, P. J., Everett, R. W., & Searle, S. R. (1983). Estimation of Genetic Trends and Correlations for Jersey Cattle. *Journal of Dairy Science*, *66*(9), 1947-1954. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(83\)82033-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(83)82033-5)

Blasco, A. (2021). *Mejora Genética Animal*. Editorial SINTESIS.

Broucek, J. (2014). Production of Methane Emissions from Ruminant Husbandry: A Review. *Journal of Environmental Protection*, *5*(15), Article 15. <https://doi.org/10.4236/jep.2014.515141>

Carbon Credits Face Biggest Test Yet, Could Reach \$238/Ton in 2050, According to BloombergNEF Report. (2024). *BloombergNEF*. <https://about.bnef.com/blog/carbon-credits-face-biggest-test-yet-could-reach-238-ton-in-2050-according-to-bloombergnef-report/>

Charfeddine, N. (2022). Programa de crianza de la raza Frisona.

Charfeddine, N., & Alenda, R. (1998). Conceptos económicos en un programa de mejora genética en vacuno de leche.

Chilliard, Y., Martin, C., Rouel, J., & Doreau, M. (2009). Milk fatty acids in dairy cows fed whole crude linseed, extruded linseed, or linseed oil, and their relationship with methane output. *Journal of Dairy Science*, 92(10), 5199-5211. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2375>

CMNUCC. (2015). <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>

CONAFE. (2023). Evaluación genética nacional de vacuno frisón español. [http://213.0.29.171/IndicesGen/Docs/evaluaciones\\_Metodologia\\_y\\_requisitos.pdf](http://213.0.29.171/IndicesGen/Docs/evaluaciones_Metodologia_y_requisitos.pdf)

de Haas, Y., Pszczola, M., Soyeurt, H., Wall, E., & Lassen, J. (2017). Invited review: Phenotypes to genetically reduce greenhouse gas emissions in dairying. *Journal of Dairy Science*, 100(2), 855-870. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11246>

de Haas, Y., Windig, J. J., Calus, M. P. L., Dijkstra, J., de Haan, M., Bannink, A., & Veerkamp, R. F. (2011). Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. *Journal of Dairy Science*, 94(12), 6122-6134. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4439>

Dijkstra, J., van Zijderveld, S. M., Apajalahti, J. A., Bannink, A., Gerrits, W. J. J., Newbold, J. R., Perdok, H. B., & Berends, H. (2011). Relationships between methane production and milk fatty acid profiles in dairy cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 590-595. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.042>

Donoghue, K. A., Herd, R. M., Bird, S. H., Arthur, P. F., & Hegarty, R. F. (2013). *Preliminary genetic parameters for methane production in Australian beef cattle*.

Duin, E. C., Wagner, T., Shima, S., Prakash, D., Cronin, B., Yáñez-Ruiz, D. R., Duval, S., Rumbeli, R., Stemmler, R. T., Thauer, R. K., & Kindermann, M. (2016). Mode of action uncovered for the specific reduction of methane emissions from ruminants by the small molecule 3-nitrooxypropanol. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(22), 6172-6177. <https://doi.org/10.1073/pnas.1600298113>

Ellis, J. L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Bannink, A., Odongo, N. E., McBRIDE, B. W., & France, J. (2008). Aspects of rumen microbiology central to mechanistic modelling of methane production in cattle. *The Journal of Agricultural Science*, 146(2), 213-233. <https://doi.org/10.1017/S0021859608007752>

*Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector | Noticias | Parlamento Europeo*. (2018).

<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia>

FAO. (2018). *Livestock and environment statistics: Manure and greenhouse gas emissions*.

FAO. (2023). *Seguimiento de los progresos relativos a los indicadores de los ODS relacionados con la alimentación y la agricultura 2023*. FAO ; <https://doi.org/10.4060/cc7088es>

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Raga, G., Schulz, M., Dorland, R. V., Bodeker, G., Etheridge, D., Foukal, P., Fraser, P., Geller, M., Joos, F., Keeling, C. D., Dorland, R. V. (2007). *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*.

Garnsworthy, P. C., Craigon, J., Hernandez-Medrano, J. H., & Saunders, N. (2012a). On-farm methane measurements during milking correlate with total methane production by individual dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *95*(6), 3166-3180. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4605>

Garnsworthy, P. C., Craigon, J., Hernandez-Medrano, J. H., & Saunders, N. (2012b). Variation among individual dairy cows in methane measurements made on farm during milking. *Journal of Dairy Science*, *95*(6), 3181-3189. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4606>

Gerber, P. J., & Food and Agriculture Organization of the United Nations (Eds.). (2013). *Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Gerber, P., Key, N., Portet, F., & Steinfeld, H. (2010). Policy options in addressing livestock's contribution to climate change. *Animal*, *4*(3), 393-406. <https://doi.org/10.1017/S1751731110000133>

González-Recio, O., López-Paredes, J., Ouatahar, L., Charfeddine, N., Ugarte, E., Alenda, R., & Jiménez-Montero, J. A. (2020). Mitigation of greenhouse gases in dairy cattle via genetic selection: 2. Incorporating methane emissions into the breeding goal. *Journal of Dairy Science*, *103*(8), 7210-7221. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17598>

Gonzalez-Recio, O., Pryce, J. E., Haile-Mariam, M., & Hayes, B. J. (2014). Incorporating heifer feed efficiency in the Australian selection index using genomic selection. *Journal of Dairy Science*, *97*(6), 3883-3893. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7515>

Grainger, C., Clarke, T., McGinn, S. M., Auld, M. J., Beauchemin, K. A., Hannah, M. C., Waghorn, G. C., Clark, H., & Eckard, R. J. (2007). Methane Emissions from Dairy Cows Measured Using the Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) Tracer and Chamber Techniques. *Journal of Dairy Science*, *90*(6), 2755-2766. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-697>

Groen, A. F. (1989a). Economic values in cattle breeding. I. Influences of production circumstances in situations without output limitations. *Livestock Production Science*, *22*(1), 1-16. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(89\)90121-8](https://doi.org/10.1016/0301-6226(89)90121-8)

Groen, A. F. (1989b). Economic values in cattle breeding. II. Influences of production circumstances in situations with output limitations. *Livestock Production Science*, *22*(1), 17-30. Scopus. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(89\)90122-X](https://doi.org/10.1016/0301-6226(89)90122-X)

Groen, A. F., Steine, T., Colleau, J.-J., Pedersen, J., Pribyl, J., & Reinsch, N. (1997). Economic values in dairy cattle breeding, with special reference to functional traits. Report of an EAAP-working group. *Livestock Production Science*, *49*(1), 1-21. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(97\)00041-9](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(97)00041-9)

Hammond, K. J., Crompton, L. A., Bannink, A., Dijkstra, J., Yáñez-Ruiz, D. R., O'Kiely, P., Kebreab, E., Eugène, M. A., Yu, Z., Shingfield, K. J., Schwarm, A., Hristov, A. N., & Reynolds, C. K. (2016).

Review of current *in vivo* measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 219, 13-30. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.05.018>

Haque, M. N. (2018). Dietary manipulation: A sustainable way to mitigate methane emissions from ruminants. *Journal of Animal Science and Technology*, 60(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40781-018-0175-7>

Hardan, A., Garnsworthy, P. C., & Bell, M. J. (2023). Variability in Enteric Methane Emissions among Dairy Cows during Lactation. *Animals*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/ani13010157>

Hassanat, F., Gervais, R., Julien, C., Massé, D. I., Lettat, A., Chouinard, P. Y., Petit, H. V., & Benchaar, C. (2013). Replacing alfalfa silage with corn silage in dairy cow diets: Effects on enteric methane production, ruminal fermentation, digestion, N balance, and milk production. *Journal of Dairy Science*, 96(7), 4553-4567. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6480>

Hazel, L. N. (1943). The genetic basis for constructing selection indexes. *Genetics*, 28(6), 476-490. <https://doi.org/10.1093/genetics/28.6.476>

Hazel, L. N., Dickerson, G. E., & Freeman, A. E. (1994). The selection index—Then, now, and for the future. *Journal of Dairy Science*, 77(10), 3236-3251. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77265-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77265-9)

Hegarty, R. S., Goopy, J. P., Herd, R. M., & McCorkell, B. (2007). Cattle selected for lower residual feed intake have reduced daily methane production. *Journal of Animal Science*, 85(6), 1479-1486. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-236>

Hill, J., McSweeney, C., Wright, A.-D. G., Bishop-Hurley, G., & Kalantar-zadeh, K. (2016). Measuring Methane Production from Ruminants. *Trends in Biotechnology*, 34(1), 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.10.004>

Honan, M., Feng, X., Tricarico, J. M., & Kebreab, E. (2021). Feed additives as a strategic approach to reduce enteric methane production in cattle: Modes of action, effectiveness and safety. *Animal Production Science*. <https://doi.org/10.1071/AN20295>

Hristov, A. N., Oh, J., Giallongo, F., Frederick, T. W., Harper, M. T., Weeks, H. L., Branco, A. F., Moate, P. J., Deighton, M. H., Williams, S. R. O., Kindermann, M., & Duval, S. (2015). An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(34), 10663-10668. <https://doi.org/10.1073/pnas.1504124112>

Hristov, A. N., Oh, J., Giallongo, F., Frederick, T., Weeks, H., Zimmerman, P. R., Harper, M. T., Hristova, R. A., Zimmerman, R. S., & Branco, A. F. (2015). The Use of an Automated System (GreenFeed) to Monitor Enteric Methane and Carbon Dioxide Emissions from Ruminant Animals. *Journal of Visualized Experiments : JoVE*, 103, 52904. <https://doi.org/10.3791/52904>

*Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI)*. (2023). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion->

ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/inventario-gases-efecto-invernadero.html

IPCC. (2013). *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>

Ippc. (2022). *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty* (1.<sup>a</sup> ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>

Johnson, K. A., & Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, 73(8), 2483-2492. <https://doi.org/10.2527/1995.7382483x>

Kennedy, E. (2022). *Launch of the Carbon Sub-Index and Updates to the EBI at Corrin Mart*. ICBF. <https://www.icbf.com/launch-of-the-carbon-sub-index-and-updates-to-the-ebi-at-corrin-mart/>

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. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>

Koch, R. M., Swiger, L. A., Chambers, D., & Gregory, K. E. (1963). Efficiency of Feed Use in Beef Cattle. *Journal of Animal Science*, 22(2), 486-494. <https://doi.org/10.2527/jas1963.222486x>

Lassen, J., & Løvendahl, P. (2016). Heritability estimates for enteric methane emissions from Holstein cattle measured using noninvasive methods. *Journal of Dairy Science*, 99(3), 1959-1967. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10012>

López-García, A., Saborío-Montero, A., Gutiérrez-Rivas, M., Atxaerandio, R., Goiri, I., García-Rodríguez, A., Jiménez-Montero, J. A., González, C., Tamames, J., Puente-Sánchez, F., Serrano, M., Carrasco, R., Óvilo, C., & González-Recio, O. (2022). Fungal and ciliate protozoa are the main rumen microbes associated with methane emissions in dairy cattle. *GigaScience*, 11, giab088. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giab088>

López-Paredes, J., Goiri, I., Atxaerandio, R., García-Rodríguez, A., Ugarte, E., Jiménez-Montero, J. A., Alenda, R., & González-Recio, O. (2020). Mitigation of greenhouse gases in dairy cattle via genetic selection: 1. Genetic parameters of direct methane using noninvasive methods and proxies of methane. *Journal of Dairy Science*, 103(8), 7199-7209. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17597>

Lopez-Paredes, J., Saborio-Montero, A., Charfeddine, N., Jimenez-Montero, J. A., & Gonzalez-Recio, O. (2021). Dry matter intake, methane emissions and microbiome profiles as new traits for feed efficiency. *Interbull Bulletin*, 56, Article 56.

Madsen, J., Bjerg, B. S., Hvelplund, T., Weisbjerg, M. R., & Lund, P. (2010). Methane and carbon dioxide ratio in excreted air for quantification of the methane production from ruminants. *Livestock Science*, 129(1), 223-227. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.01.001>

- Makkar, H. P. S., Tran, G., Heuzé, V., Giger-Reverdin, S., Lessire, M., Lebas, F., & Ankers, P. (2016). Seaweeds for livestock diets: A review. *Animal Feed Science and Technology*, *212*, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.018>
- Manzanilla-Pech, C. I. V., De Haas, Y., Hayes, B. J., Veerkamp, R. F., Khansefid, M., Donoghue, K. A., Arthur, P. F., & Pryce, J. E. (2016). Genomewide association study of methane emissions in Angus beef cattle with validation in dairy cattle. *Journal of Animal Science*, *94*(10), 4151-4166. <https://doi.org/10.2527/jas.2016-0431>
- Manzanilla-Pech, C. I. V., Løvendahl, P., Mansan Gordo, D., Difford, G. F., Pryce, J. E., Schenkel, F., Wegmann, S., Miglior, F., Chud, T. C., Moate, P. J., Williams, S. R. O., Richardson, C. M., Stothard, P., & Lassen, J. (2021). Breeding for reduced methane emission and feed-efficient Holstein cows: An international response. *Journal of Dairy Science*, *104*(8), 8983-9001. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19889>
- Martin, C., Morgavi, D. P., & Doreau, M. (2010). Methane mitigation in ruminants: From microbe to the farm scale. *Animal: An International Journal of Animal Bioscience*, *4*(3), 351-365. <https://doi.org/10.1017/S1751731109990620>
- Mata, L., Lawton, R. J., Magnusson, M., Andreakis, N., de Nys, R., & Paul, N. A. (2017). Within-species and temperature-related variation in the growth and natural products of the red alga *Asparagopsis taxiformis*. *Journal of Applied Phycology*, *29*(3), 1437-1447. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-1017-y>
- Miglior, F., Fleming, A., Malchiodi, F., Brito, L. F., Martin, P., & Baes, C. F. (2017). A 100-Year Review: Identification and genetic selection of economically important traits in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, *100*(12), 10251-10271. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12968>
- Moate, P. J., Pryce, J. E., Marett, L. C., Garner, J. B., Deighton, M. H., Ribaux, B. E., Hannah, M. C., Wales, W. J., & Williams, S. R. O. (2021). Measurement of Enteric Methane Emissions by the SF6 Technique Is Not Affected by Ambient Weather Conditions. *Animals: an Open Access Journal from MDPI*, *11*(2), 528. <https://doi.org/10.3390/ani11020528>
- Moate, P. J., Williams, S. R. O., Torok, V. A., Hannah, M. C., Ribaux, B. E., Tavendale, M. H., Eckard, R. J., Jacobs, J. L., Auld, M. J., & Wales, W. J. (2014). Grape marc reduces methane emissions when fed to dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *97*(8), 5073-5087. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7588>
- Moate, P., Williams, S. R. O., Deighton, M., & Wales, B. (2012). A comparison between wheat or maize grain fed as a high proportion of the diet on milk production and methane emissions from dairy cows.
- Montoya, J. C., Bhagwat, A. M., Peiren, N., De Campeneere, S., De Baets, B., & Fievez, V. (2011). Relationships between odd- and branched-chain fatty acid profiles in milk and calculated enteric methane proportion for lactating dairy cattle. *Animal Feed Science and Technology*, *166-167*, 596-602. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.080>
- Murray, R. M., Bryant, A. M., & Leng, R. A. (1976). Rates of production of methane in the rumen and large intestine of sheep. *The British Journal of Nutrition*, *36*(1), 1-14. <https://doi.org/10.1079/bjn19760053>

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Zhang, H., Aamaas, B., Boucher, O., Dalsøren, S. B., Daniel, J. S., Forster, P., ... Shine, K. (2013). *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

*National Livestock Methane Program.* (2015). MLA Corporate. <https://www.mla.com.au/research-and-development/reports/2015/national-livestock-methane-program/>

*Nuevas pruebas CONAFE Junio 2023 de vacuno de leche, primera evaluación genética a nivel mundial que usa medidas directas de emisiones de metano.* (2023). CONAFE. <https://www.conafe.com/Noticia/TabId/139/ArtMID/656/ArticleID/1107/Nuevas-pruebas-CONAFE-Junio-2023-de-vacuno-de-leche-primera-evaluaci243n-gen233tica-a-nivel-mundial-que-usa-medidas-directas-de-emisiones-de-metano.aspx>

Özkan Gülzari, Ş., Vosough Ahmadi, B., & Stott, A. W. (2018). Impact of subclinical mastitis on greenhouse gas emissions intensity and profitability of dairy cows in Norway. *Preventive Veterinary Medicine, 150*, 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2017.11.021>

Pinares-Patiño, C. S., & Clark, H. (2008). Reliability of the sulfur hexafluoride tracer technique for methane emission measurement from individual animals: An overview. *Australian Journal of Experimental Agriculture, 48*(2), 223-229. <https://doi.org/10.1071/EA07297>

*Programa de difusión de la mejora de la raza bovina Frisona.* (2019). [https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/zootecnia/programadecriadelarazabovinafrisona\\_conafe\\_2019\\_version2\\_abril2021\\_tridion\\_tcm30-563175.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/zootecnia/programadecriadelarazabovinafrisona_conafe_2019_version2_abril2021_tridion_tcm30-563175.pdf)

Quinton, C. D., Hely, F. S., Amer, P. R., Byrne, T. J., & Cromie, A. R. (2018). Prediction of effects of beef selection indexes on greenhouse gas emissions. *Animal: An International Journal of Animal Bioscience, 12*(5), 889-897. <https://doi.org/10.1017/S1751731117002373>

Richardson, C. M., Amer, P. R., Hely, F. S., van den Berg, I., & Pryce, J. E. (2021). Estimating methane coefficients to predict the environmental impact of traits in the Australian dairy breeding program. *Journal of Dairy Science, 104*(10), 10979-10990. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20348>

Richardson, C. M., Amer, P. R., Quinton, C., Crowley, J., Hely, F. S., van den Berg, I., & Pryce, J. E. (2022). Reducing greenhouse gas emissions through genetic selection in the Australian dairy industry. *Journal of Dairy Science, 105*(5), 4272-4288. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21277>

Richardson, C. M., Sunduimijid, B., Amer, P., Van Den Berg, I., & Pryce, J. E. (2021). A method for implementing methane breeding values in Australian dairy cattle. *Animal Production Science, 61*(18), 1781-1787. <https://doi.org/10.1071/AN21055>

Saborío-Montero, A., López-García, A., Gutiérrez-Rivas, M., Atxaerandio, R., Goiri, I., García-Rodríguez, A., Jiménez-Montero, J. A., González, C., Tamames, J., Puente-Sánchez, F., Varona, L., Serrano, M., Ovilo, C., & González-Recio, O. (2021). A dimensional reduction approach to modulate the core ruminal microbiome associated with methane emissions via selective breeding. *Journal of Dairy Science, 104*(7), 8135-8151. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-20005>

- Shadpour, S., Chud, T. C. S., Hailemariam, D., Plastow, G., Oliveira, H. R., Stothard, P., Lassen, J., Miglior, F., Baes, C. F., Tulpan, D., & Schenkel, F. S. (2022). Predicting methane emission in Canadian Holstein dairy cattle using milk mid-infrared reflectance spectroscopy and other commonly available predictors via artificial neural networks. *Journal of Dairy Science*, *105*(10), 8272-8285. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21176>
- Stackhouse, K. R., Pan, Y., Zhao, Y., & Mitloehner, F. M. (2011). Greenhouse gas and alcohol emissions from feedlot steers and calves. *Journal of Environmental Quality*, *40*(3), 899-906. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0354>
- Starsmore, K., Lopez-Villalobos, N., Shalloo, L., Egan, M., Burke, J., & Lahart, B. (2023). Animal factors that affect enteric methane production measured using the GreenFeed monitoring system in grazing dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *S0022-0302(23)00805-6*. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23915>
- Stephansen, R. B., Lassen, J., Ettema, J. F., Sørensen, L. P., & Kargo, M. (2021). Economic value of residual feed intake in dairy cattle breeding goals. *Livestock Science*, *253*(104696). <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104696>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (2013). *Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Storm, I. M. L. D., Hellwing, A. L. F., Nielsen, N. I., & Madsen, J. (2012). Methods for Measuring and Estimating Methane Emission from Ruminants. *Animals: an Open Access Journal from MDPI*, *2*(2), 160-183. <https://doi.org/10.3390/ani2020160>
- van Breukelen, A. E., Aldridge, M. N., Veerkamp, R. F., Koning, L., Sebek, L. B., & de Haas, Y. (2023). Heritability and genetic correlations between enteric methane production and concentration recorded by GreenFeed and sniffers on dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *106*(6), 4121-4132. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22735>
- Wall, E., Simm, G., & Moran, D. (2010). Developing breeding schemes to assist mitigation of greenhouse gas emissions. *Animal*, *4*(3), 366-376.
- Yan, T., Mayne, C. S., Gordon, F. G., Porter, M. G., Agnew, R. E., Patterson, D. C., Ferris, C. P., & Kilpatrick, D. J. (2010). Mitigation of enteric methane emissions through improving efficiency of energy utilization and productivity in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *93*(6), 2630-2638. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2929>
- Yu, G., Beauchemin, K. A., & Dong, R. (2021). A Review of 3-Nitrooxypropanol for Enteric Methane Mitigation from Ruminant Livestock. *Animals*, *11*(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/ani11123540>