



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

**Asociación de eficiencia de  
conversión del alimento con otras  
características de importancia  
económica y ambiental en la producción  
de carne**

María Belén Silveira Arburúas

Maestría en Ciencias Agrarias  
Opción Ciencias Animales

Julio 2023

**Asociación de eficiencia de  
conversión del alimento con otras  
características de importancia  
económica y ambiental en la producción  
de carne**

María Belén Silveira Arburúas

Maestría en Ciencias Agrarias  
Opción Ciencias Animales

Julio 2023

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. (Dra.) Ana Espasandín (presidenta), Ing. Agr. (M. Sc.) Juan Clariget (vocal) y Lic. Biol. (Dra.) Claudia Faverin (vocal) el 12 de setiembre de 2023. Autora: Ing. Agr. María Belén Silveira Arburúas. Directora: Ing. Agr. (Ph. D.) Elly Navajas. Codirectora: Ing. Agr. (Ph. D.) Verónica Ciganda.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a María Isabel Pravia y Liliana del Pino de INIA Las Brujas y a Julieta Mariotta de INIA La Estanzuela, que me enseñaron, acompañaron y colaboraron en el trabajo para la realización de esta tesis. Agradezco a mi directora de tesis, Elly, y a la codirectora, Verónica, que me guiaron, y sus enseñanzas, sugerencias y correcciones que me permitieron mejorar mi trabajo. Agradezco también a INIA por brindarme la posibilidad de realizar la maestría y la tesis. Finalmente agradezco a mi familia, especialmente a mi esposo, por el apoyo y ayuda para poder llevar a cabo la maestría y en particular esta tesis.

## RESUMEN

La mejora de la eficiencia de conversión, utilizando el consumo residual del alimento (*residual feed intake*, RFI) medido en la recría como criterio de selección, tiene impacto económico en la producción por resultar en menores consumos manteniendo el desempeño productivo. Además, ha sido sugerido como una forma de mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero por estar asociado a menores emisiones de metano entérico (EM), lo que podría contribuir al compromiso de Uruguay de reducción de la intensidad de las emisiones. Sin embargo, se conoce poco sobre su relación con otras características en el engorde. Los objetivos de este estudio fueron evaluar las posibles mejoras en la estimación del RFI en el engorde de novillos hereford, analizar la relación entre RFI en la recría (RFI-R) y en el engorde (RFI-E), caracterizar su desempeño productivo en ambas etapas y cuantificar la asociación entre el RFI y la EM de los novillos. Se evaluaron 95 novillos hereford en la recría y el engorde en confinamiento en la Central de Pruebas de Kiyú, Uruguay. Se midieron el consumo diario individual de materia seca (CMS), la ganancia diaria de peso, el peso metabólico medio, el área del ojo de bife, el espesor de grasa dorsal (EGD) y el espesor de grasa de cadera al inicio, mitad y final de los períodos de evaluación. A partir de estos se calcularon RFI-R y RFI-E. Al completar la evaluación del RFI-E se midieron las EM con la técnica del SF<sub>6</sub> en 21 novillos con RFI-E contrastante (RFI-E alto y bajo). La inclusión de EGD al modelo original de estimación de RFI aumentó el ajuste del modelo de RFI-E. La correlación entre RFI-R y RFI-E fue 0,71. El RFI-R tuvo correlaciones de 0,79 y 0,49 con el CMS de la recría y engorde, respectivamente, mientras que para RFI-E fueron 0,56 y 0,63, respectivamente. Tanto RFI-R como RFI-E fueron independientes de las variables de desempeño productivo. Los novillos más eficientes en el engorde (RFI-E bajo) habían sido también más eficientes en la recría. No se encontraron diferencias significativas entre las EM de novillos de alto y bajo RFI-E ( $P > 0,05$ ).

Palabras clave: consumo residual de alimento, novillos, recría, engorde, emisiones de metano

## SUMMARY

### **Association of feed efficiency with other characteristics of economic and environmental importance for beef production**

Improving feed efficiency through residual feed intake (RFI) measured during the growing phase as a selection criterion has an economic impact on production because of the lower intake at the same level of performance. Moreover, the improvement of RFI has been suggested as a way to mitigate greenhouse gases emissions due to its association with lower methane emissions (ME) in ruminants, which could contribute to Uruguay's commitment of reducing emission intensity. However, there is less information on its association with other characteristics at fattening. The aims of this study were to evaluate possible improvements to the estimation of RFI at fattening in hereford steers, to analyze the association between RFI at growing (G-RFI) and fattening (F-RFI), to characterize the performances in both phases, and to quantify the association between RFI and ME in steers during fattening. Ninety-five hereford steers were evaluated at growing and fattening in confinement conditions, at the Kiyú Test Center, Uruguay. Individual daily dry matter intake (DMI), average daily gain, average metabolic body weight, eye muscle area, rib fat depth (RFD) and P8 fat depth at the beginning, middle and end of each evaluation period were recorded and used for the calculation of G-RFI and F-RFI. After completing the F-RFI evaluation, ME of 21 steers with contrasting F-RFI (high and low F-RFI) were measured using the SF<sub>6</sub> method. Including RFD to the original model improved the F-RFI model adjustment. The correlation between G-RFI and F-RFI was 0.71. The correlations between G-RFI and DMI in the growing and fattening phases were 0.79 and 0.49, respectively, whereas for F-RFI were 0.56 and 0.63, respectively. Both G-RFI and F-RFI were independent of productive performance variables. The most efficient steers in the fattening phase (low F-RFI) were also more efficient in the growing phase. No significant difference was found in ME between high and low F-RFI steers ( $P > 0.05$ ).

Keywords: residual feed intake, steers, growing, fattening, methane emissions

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.....	V
SUMMARY.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	2
1.1.1. <u>Consumo residual del alimento</u> .....	2
1.1.1.1. Indicadores de la eficiencia de conversión del alimento.....	2
1.1.1.2. Definición, interpretación y cálculo de RFI.....	4
1.1.2. <u>Asociación entre RFI y características productivas relevantes</u> .....	5
1.1.2.1. Asociación entre RFI y consumo de alimento y desempeño productivo.....	6
1.1.2.2. Asociación entre RFI en recría y engorde.....	11
1.1.2.3. Medición de la eficiencia de conversión.....	13
1.1.2.4. Factores que inciden en el RFI.....	15
1.1.3. <u>Emisiones de metano entérico y asociación con RFI</u> .....	22
1.1.3.1. Emisiones de metano.....	22
1.1.3.2. Metodologías de medición de metano.....	27
1.1.3.3. Asociación entre RFI y metano.....	29
1.3. HIPÓTESIS.....	35
1.4. OBJETIVO GENERAL.....	35
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	35
2. <u>ESTUDIO DE LA ASOCIACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CONVERSIÓN Y DESEMPEÑO PRODUCTIVO EN LA RECRÍA Y EL ENGORDE DE NOVILLOS HEREFORD</u> .....	36
2.1. RESUMEN.....	36
2.2. SUMMARY.....	37

2.3. INTRODUCCIÓN.....	38
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
2.4.1. <u>Evaluación de la eficiencia de conversión</u> .....	39
2.4.1.1. Recría.....	40
2.4.1.2. Engorde.....	41
2.4.2. <u>Variables medidas</u> .....	42
2.4.3. <u>Análisis estadístico</u> .....	44
2.4.3.1. Estimación de RFI.....	44
2.4.3.2. Caracterización del desempeño de crecimiento y composición...	45
2.4.3.3. Asociación entre la eficiencia de conversión en diferentes fases	46
2.4.3.4. Caracterización del comportamiento ingestivo de los novillos en recría y engorde.....	46
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
2.5.1. <u>Evaluación del modelo de RFI en engorde</u> .....	48
2.5.1.1. Comparación de modelos de estimación de RFI de engorde.....	50
2.5.2. <u>Asociación entre la eficiencia de conversión de diferentes fases</u> ....	55
2.5.3. <u>Caracterización del desempeño de crecimiento y composición</u> .....	59
2.5.4. <u>Caracterización del comportamiento ingestivo de los novillos en recría y engorde</u> .....	62
2.6. CONCLUSIONES.....	64
2.7. BIBLIOGRAFÍA.....	65
3. <u>COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE METANO ENTÉRICO DE NOVILLOS DE ALTO Y BAJO CONSUMO RESIDUAL DE ALIMENTOS</u> .....	70
3.1. RESUMEN.....	70
3.2. SUMMARY.....	71
3.3. INTRODUCCIÓN.....	72
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	73
3.4.1. <u>Evaluación de la eficiencia de conversión</u> .....	74
3.4.2. Mediciones de metano.....	76

3.4.3. <u>Variables medidas</u> .....	79
3.4.4. <u>Análisis estadístico</u> .....	80
3.4.4.1. Asociación entre RFI y emisiones de metano.....	80
3.4.4.2. Asociación entre emisiones de metano y peso de rumen.....	80
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	81
3.5.1. <u>Desempeño productivo de los novillos</u> .....	82
3.5.2. <u>Emisiones de metano entérico</u> .....	85
3.5.3. <u>Asociación entre RFI y emisiones de metano entérico</u> .....	86
3.5.4. <u>Asociación entre emisiones de metano entérico y peso de rumen</u>	90
3.6. CONCLUSIONES.....	92
3.7. BIBLIOGRAFÍA.....	92
4. <u>DISCUSIÓN GENERAL</u> .....	97
5. <u>BIBLIOGRAFÍA GENERAL</u> .....	101

## 1. INTRODUCCIÓN

Una forma de maximizar el beneficio económico en la producción de ganado de carne es minimizando los costos de los insumos. La alimentación es uno de los mayores costos de producción, por lo cual la mejora de la eficiencia de conversión de alimento tiene un impacto importante en la ecuación económica de la producción de carne. Estimaciones nacionales indican que representan entre 56 % y 88 % de los costos directos de sistemas CREA ganaderos criadores, de ciclo incompleto y completo e invernaderos (CREA Uruguay, 2017).

Por otro lado, las emisiones de metano entérico ( $\text{CH}_4$ ) por parte de los rumiantes constituyen una pérdida de la energía consumida que en bovinos representa entre un 2 y un 12 % de la energía bruta ingerida (Johnson y Johnson, 1995). Además, el  $\text{CH}_4$  es uno de los gases de efecto invernadero (GEI) más importantes que se emiten a la atmósfera por actividades antropogénicas, después del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Cambra-López et al., 2008). Según Gerber et al., (2013), el  $\text{CH}_4$  de la fermentación entérica de los rumiantes constituye un 5,7 % de las emisiones de  $\text{CH}_4$  de origen antropogénico en el mundo y un 39,1 % de las emisiones totales del sector agropecuario. En Uruguay, la fermentación entérica del sector agropecuario fue la responsable de aproximadamente el 41 % de las emisiones totales de GEI del año 2017 (MVOTMA, 2019).

Existe evidencia de que la eficiencia de conversión, medida como consumo residual del alimento (RFI, *residual feed intake*), permite reducir el consumo de materia seca (lo que disminuiría los costos de alimentación) sin afectar el desempeño productivo (Hegarty et al., 2007). Está también asociada con menor producción de heces (lo que disminuiría las emisiones de óxido nitroso) y menor producción de  $\text{CH}_4$  (Hegarty et al., 2007, Nkrumah et al., 2006).

Dada la complejidad en la medición del consumo individual para el cálculo del RFI, aún son escasos los programas de mejora genética que lo incluyen. El criterio de selección en estos casos es el RFI medido en el posdestete (RFI-PD) (Ravagnolo et

al., 2018). También son escasas aún las estimaciones de las asociaciones con otras características productivas de importancia económica y con características ambientales como las emisiones de CH<sub>4</sub> entérico. Estas asociaciones son relevantes al permitir proyectar el impacto de la selección genética por RFI-PD en la producción agropecuaria y su contribución a las estrategias de mitigación de las emisiones de GEI.

Este trabajo de tesis se organiza en este primer capítulo donde se presentan los antecedentes, hipótesis y objetivos, un segundo capítulo que incluye el estudio de la eficiencia de conversión del alimento medido como RFI en el engorde de novillos y su asociación con el RFI durante la recría, un tercer capítulo donde se presenta el estudio de la asociación entre el RFI y las emisiones de metano entérico en novillos durante el engorde y un cuarto capítulo de discusión general y donde se exponen las principales conclusiones y sus implicancias.

## 1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

### 1.1.1. Consumo residual del alimento

#### 1.1.1.1. Indicadores de la eficiencia de conversión del alimento

La eficiencia de conversión del alimento es una característica relevante a los sistemas de producción que relaciona la cantidad de alimento consumido y la producción obtenida. Se han desarrollado para esto varias formas de expresión de la eficiencia de conversión del alimento (Arthur et al., 1999), los cuales pueden clasificarse como 1) caracteres de relación o 2) caracteres de residuales y difieren entre animales en crecimiento y animales en lactación o adultos (Berry et al., 2014, Berry y Crowley, 2013).

Dentro del primer grupo, una de las más usadas es la tasa de conversión del alimento (*feed conversion rate*, FCR) que es la relación entre el consumo medio

diario de materia seca de alimento (CMS) y la ganancia media diaria de peso (GMD), donde los animales con menor FCR son considerados más eficientes. Con respecto a las expresiones de eficiencia de conversión como residuales, el RFI o eficiencia neta de alimentación es la que está siendo cada vez más usada (Berry et al., 2014, Berry y Crowley, 2013). El RFI se define como la diferencia entre el consumo real y el predicho, y cuanto menor sea su valor, más eficiente es el animal (Berry et al., 2014, Berry y Crowley, 2013, Koch et al., 1963).

Las correlaciones fenotípicas ( $r_p$ ) y genéticas ( $r_g$ ) entre la mayoría de las mediciones de eficiencia conversión del alimento son altas (rango 0,50 a 0,90) (Berry et al., 2014). Sin embargo, hay diferencias entre estas mediciones de la eficiencia en su relación con otras características, como las de crecimiento (Arthur et al., 2001b). La medición como FCR no es la deseada para usar en mejoramiento genético porque generalmente está correlacionada con sus componentes (Berry y Crowley, 2013), por lo que la selección resulta en animales con crecimiento más rápido, mayor tamaño adulto y mayores requerimientos de mantenimiento y de alimento, lo que no siempre es deseable (Kelly et al., 2010b, Herd y Bishop, 2000, Arthur et al., 1999). Por otro lado, los caracteres de eficiencia de conversión de tipo residual tienen la ventaja de no estar correlacionados fenotípicamente con las variables independientes de los modelos de regresión usados para estimarlos y, por lo tanto, aparentemente no tendrían asociación con el peso vivo del animal adulto. Con respecto a esto, Berry et al. (2014) señalan que la independencia genética con los caracteres regresores sólo existirá si la regresión se realiza en el ámbito genético. Esto ha sido confirmado por estimaciones de parámetros genéticos que indican baja o nula correlación entre el RFI y las características usadas para su predicción (Pravia et al., 2022, Arthur et al., 2014).

#### 1.1.1.2. Definición, interpretación y cálculo de RFI

El concepto de RFI fue usado por primera vez en ganado de carne por Koch et al. (1963). Ellos sugirieron que el consumo de alimento podría ajustarse por el peso corporal y la ganancia de peso o cualquier otra característica productiva o de gasto de energía identificado, dividiendo efectivamente el consumo de alimento en dos componentes: 1) el consumo de alimento esperado para el nivel de producción dado y 2) una porción residual. La porción residual del consumo de alimento puede utilizarse para identificar animales que se desvían de su consumo esperado, con los animales más eficientes presentando valores menores (negativos) de RFI. Por lo tanto, RFI se define como la diferencia entre el consumo real de un animal y el consumo esperado con base en su tamaño y crecimiento por un período de tiempo específico (Basarab et al., 2013, Arthur y Herd, 2008). Más recientemente se ha recomendado incluir alguna medición de composición corporal (mediciones por ultrasonido de los tejidos adiposo y muscular) en la estimación de RFI, para considerar también la demanda energética diferencial de la deposición y *turnover* de grasa o proteína (Basarab et al., 2013). También se podrían incluir otros costos energéticos en la estimación de RFI, como la actividad (Basarab et al., 2011).

El RFI es estimado como los residuales de la regresión de CMS en los diferentes costos energéticos (Berry et al., 2014, Berry y Crowley, 2013). El modelo de regresión puede desarrollarse usando el método de cuadrados mínimos. De forma alternativa, el RFI puede estimarse usando tablas de alimentación y requerimientos estándar u otras fuentes de información que asignen la demanda energética a cada uno de los costos de energía y reste el total del consumo de energía. Si se lo calcula usando el enfoque de cuadrados mínimos, el RFI promedio de la población en estudio será cero, de acuerdo a las propiedades matemáticas de la regresión de cuadrados mínimos, aunque este puede no ser el caso cuando se lo calcula utilizando tablas de alimentación y requerimientos (Berry y Crowley, 2013). Además, pueden existir correlaciones entre RFI y los costos de energía, excepto

cuando se calcula RFI mediante regresión de cuadrados mínimos (Berry y Crowley, 2013).

Existe variabilidad fenotípica y genética en la eficiencia de conversión de bovinos en crecimiento más allá de la explicada por diferencias en el peso corporal y el nivel de producción (Herd et al., 2003). Resultados nacionales de mediciones de RFI en toritos y novillos hereford muestran un desvío estándar de  $\pm 0,604$  kg/día (media de RFI= 0) (Ravagnolo et al., 2018), de magnitud similar a los reportados por Pravia et al. (2022) en toritos hereford de Uruguay y Canadá (0,57 y 0,56, respectivamente) y dentro del rango de lo reportado por otros estudios (de 0,35 a 0,89, Grion et al., 2014, Basarab et al., 2007, Nkrumah et al., 2007a). La heredabilidad de RFI estimadas por Pravia et al. (2022) en toros de Uruguay fue de 0,30, la cual está en concordancia con las estimaciones en la literatura (0,33, Berry et al., 2014). Diferentes trabajos han reportado heredabilidades moderadas de RFI para diferentes categorías y razas de bovinos, que se encuentran entre 0,13 y 0,45 (Grion et al., 2014, Crowley et al., 2010, Nkrumah et al., 2007a, Archer et al., 2002).

#### 1.1.2. Asociación entre RFI y características productivas relevantes

La oportunidad de mejorar la eficiencia del rodeo, a través del uso de la variación genética en RFI, depende de la existencia de variación genética de RFI-PD y de la magnitud de las correlaciones genéticas con otros caracteres, tales como crecimiento y consumo durante la terminación, calidad de canal y carne, y desempeño del rodeo de cría (Herd et al., 2003). Dado las dificultades y costos en la medición de RFI, son escasas las estimaciones de correlaciones genéticas. Alternativamente, se ha investigado el efecto de RFI en otras características a través de la comparación de grupos extremos para RFI.

#### 1.1.2.1. Asociación entre RFI y consumo de alimento y desempeño productivo

Tomando en cuenta que el RFI es calculado como el residual de una regresión lineal, por definición el RFI es independiente de las variables incluidas en la regresión y, por ende, la correlación con ellas es cero. En cuanto al CMS, existe una correlación positiva y media a alta con RFI ( $r_p = 0,50$  a  $0,72$ ;  $r_g = 0,33$  a  $0,73$ ) (Grion et al., 2014, Kelly et al., 2010b, Nkrumah et al., 2004, Arthur et al., 2001a) (cuadro 1.1).

Cuadro 1.1. Correlaciones genéticas y fenotípicas entre consumo residual de alimento (RFI) y consumo de materia seca (CMS) en bovinos.

Autor	Raza	Categoría	Alimentación	N.º de animales	Método de medición	Característica	Valor de correlación	Error estándar	Valor de P
Arthur et al. 2001a (Australia)	angus	toritos y vaquillonas en posdestete	Pelets (70 % heno alfalfa y 30 % trigo + monensina, vitaminas y minerales; 10,5 MJ EM/kgMS y 15-17 % PC) <i>ad libitum</i> y 0,5 kg/a/día de paja.	1180	Sistema automatizado	Correlación genética entre RFI y CMS	0,69	0,03	
						Correlación fenotípica entre RFI y CMS	0,72		
Nkrumah et al., 2004 (Canadá)	bovinos de carne cruza de angus, charolais y alberta hybrid* alberta hybrid	novillos	RTM (2,90-2,91 Mcal EM/kgMS y 12,5-14 % PC)	464	GrowSafe	Correlación genética entre RFI genotípico y CMS	0,65	0,16	
						Correlación genética entre RFI fenotípico y CMS	0,73	0,18	
						Correlación fenotípica entre RFI genotípico y CMS	0,52		
						Correlación fenotípica entre RFI fenotípico y CMS	0,64		
Kelly et al., 2010b (Irlanda)	limousin * friesian	vaquillonas (418 kg PV inicial)	RTM peleteada <i>ad libitum</i> (70 % concentrado y 30 % ensilaje de maíz; 10,7 MJ EM/kgMS y 17,1 % PC)	50	Estaciones de alimentación electrónicas	Correlación fenotípica entre RFI y CMS	0,58		< 0,001
Trujillo et al., 2013 (Uruguay)	aberdeen angus	vaquillonas	RTM <i>ad libitum</i> de heno picado de alfalfa y concentrado en confinamiento (16,2 % PC y 2,5 Mcal EM/kgMS)	24	Diferencia entre ofrecido y remanente en confinamiento	Correlación fenotípica entre RFI Y CMS	0,38		0,017
			Pastoreo continuo de una mezcla de festuca, <i>Lotus corniculatus</i> y trébol blanco (15,3 % PC y 2,76 Mcal EM/kgMS)		Técnica de n-alcanos en pastoreo	Correlación fenotípica entre RFI Y CMS	0,48		0,001
Grion et al., 2014 (Brasil)	nelore	machos y hembras en posdestete	RTM <i>ad libitum</i> (62 % NDT y 13 % PC)	785	698 en corrales individuales y 87 con GrowSafe	Correlación genética entre RFI y CMS	0,33	0,14	
						Correlación fenotípica entre RFI y CMS	0,50	0,03	

Estas estimaciones son coincidentes con la comparación del CMS de grupos de animales extremos para RFI que muestran niveles 15 % menores en promedio (Oliveira et al., 2016, McGee et al., 2014, Arthur et al., 2010, Nkrumah et al., 2004), aunque algunos estudios como Trujillo et al. (2013) y Oliveira et al. (2016) no encontraron diferencias significativas en pastoreo, lo cual podría estar influenciado por la menor precisión de las mediciones de CMS en dichas condiciones (Smith et al., 2021). Nkrumah et al. (2004), trabajando con 464 novillos cruza carniceros, encontraron que los animales de bajo RFI consumieron significativamente menos alimento que los de RFI medio, y estos, menos que los de alto RFI (CMS de  $9,53 \pm 0,13$  kg,  $10,56 \pm 0,12$  kg,  $11,63 \pm 0,14$  kg, respectivamente,  $P < 0,001$ ). McGee et al. (2014) también encontraron que los novillos y vaquillonas red angus de bajo RFI consumían significativamente menos MS que los de alto RFI en posdestete ( $10,1$  a  $10,7$  kg vs.  $11,9$  a  $12,3$  kg, respectivamente;  $P < 0,01$ ), y sucedió lo mismo en la terminación de novillos ( $12,6$  vs.  $15,0$  kg,  $P < 0,01$ ). En el mismo sentido, Oliveira et al. (2016) encontraron que novillos y vaquillonas nelore de bajo RFI consumían significativamente menos MS que los de RFI medio y estos, a su vez, menos que los de RFI alto ( $6,31$ ,  $7,12$  y  $7,86$  kg;  $P < 0,001$ ).

En relación con la asociación de RFI con caracteres de comportamiento ingestivo, en Australia (Robinson y Oddy, 2004), Canadá (Basarab et al., 2007, Nkrumah et al., 2007b) e Irlanda (Kelly et al., 2010b) se han reportado correlaciones mayoritariamente medias a altas, y positivas ( $r = 0,08$  a  $0,62$ ) de RFI y RFI ajustado por engrasamiento con la duración, frecuencia y tasa de comida.

Las asociaciones con características productivas señalan que la eficiencia medida como RFI tiene una asociación baja o nula con el crecimiento de los animales en la fase de engorde, la calidad de la canal y la calidad de carne (Arthur et al., 2014). Sin embargo, existe controversia respecto a la relación entre RFI y la deposición de la grasa, ya que algunos estudios han encontrado correlaciones fenotípicas y genéticas bajas a moderadas entre el RFI y deposición de grasa (Berry et al., 2014). En relación con la asociación con el desempeño reproductivo de

hembras, se encontraron resultados similares en preñez, tasa de parición y de destete, patrón de parición, peso vivo del ternero al nacimiento, nivel de distocia y kg de ternero destetado por servicio, aunque se encontró un retraso de 5 a 6 días en la fecha de parto de las vacas de bajo RFI (Arthur et al., 2014, Basarab et al., 2007).

Veerkamp et al. (1995) reportaron correlaciones genéticas positivas (0,26 a 0,36) entre RFI y condición corporal medida subjetivamente en animales en lactación. Nkrumah et al. (2007a) encontraron una correlación fenotípica ( $r_p$ ) baja a moderada entre RFI y engrasamiento de carcasa ( $r_p = 0,25$ ) y una correlación genética media entre RFI y engrasamiento de carcasa, grado de grasa intramuscular y área de ojo de bife ( $r_g = 0,35 \pm 0,30$ ,  $0,32 \pm 0,29$  y  $-0,52 \pm 0,32$ , respectivamente). Robinson y Oddy (2004) encontraron una correlación genética baja y positiva entre RFI y grasa intramuscular ( $r_g = 0,22 \pm 0,17$ ), al igual que Wolcott et al. (2009) ( $r_g = 0,19 \pm 0,17$ ) y una correlación genética alta y positiva ( $r_g = 0,72$ , desvío estándar = 0,17) entre RFI y espesor de grasa subcutánea medida por ultrasonido en cadera en animales vivos. Wolcott et al. (2009) reportaron en novillos una correlación genética positiva media a alta entre RFI y espesor de grasa en costilla ( $r_g = 0,49 \pm 0,19$ ) y una correlación genética negativa media a alta entre RFI y área de ojo de bife ( $r_g = -0,42 \pm 0,18$ ). En relación con la calidad de carne, Inoue et al. (2011) encontraron correlaciones genéticas cercanas a cero entre RFI y la composición de ácidos grasos de la carne en novillos *japanese black*. Wolcott et al. (2009) reportaron en novillos una correlación genética positiva baja entre RFI y fuerza de corte (medición de terneza de la carne) ( $r_g = 0,23 \pm 0,18$ ).

Al estudiar la relación de RFI con caracteres de fertilidad y productividad de vacas y vaquillonas de alto y bajo RFI se encontraron resultados similares en tasa de preñez, tasa de detección de celos y número de inseminaciones por vaquillona, tasa de parición y de destete, patrón de parición, peso vivo del ternero al nacimiento, nivel de distocia y kg de ternero destetado por servicio (Jones et al., 2017, Shaffer et al., 2011, Basarab et al., 2007). Arthur et al. (2005) tampoco

encontraron diferencias entre líneas de selección divergentes por alto y bajo RFI en la tasa de preñez, parición y destete de vacas, ni en su producción de leche. Sin embargo, se encontró que vaquillonas de RFI negativo (expresado en kg de NDT) (más eficientes) entraban a la pubertad 13 días después que las de RFI positivo (menos eficientes) ( $P = 0,03$ ) (Shaffer et al., 2011) y que las vacas de bajo RFI parían de 5 a 7 días más tarde en el año que las vacas de alto RFI, lo que sugiere que un atraso en el comienzo del primer estro podría haber retrasado la concepción durante el primer período del entore (Basarab et al., 2011, Shaffer et al., 2011, Arthur et al., 2005). Por el contrario, Jones et al. (2018) no encontraron diferencias en días al parto de vaquillonas de dos líneas divergentes seleccionadas por bajo y alto RFI. Cuando se ajustó RFI por grasa corporal (espesor de grasa dorsal final de la prueba) y por grasa y actividad, Basarab et al. (2011) no observaron diferencias en el porcentaje de vaquillonas de alto y bajo RFI en alcanzar la pubertad a los 10 a 15 meses de edad ni en el porcentaje de terneros nacidos hasta el día 28 de la estación de parición, así como tampoco encontraron diferencias en la dificultad de parto, edad al primer parto, peso del ternero al nacimiento, GMD del ternero predestete, peso vivo del ternero al destete y productividad de las vaquillonas, expresada en kg de ternero destetado por vaquillona entorada. Basarab et al. (2007) también reportaron que vacas y vaquillonas que produjeron progenie de bajo RFI tuvieron 2 a 3 mm más de espesor de grasa dorsal durante el ciclo productivo y perdieron 0,12 kg/día menos de peso durante la lactación temprana (desde el parto hasta antes del entore) que las madres de progenie de alto RFI.

En general, Hafla et al. (2012) y Wang et al. (2012) tampoco encontraron asociaciones entre RFI y fertilidad o desempeño reproductivo de toros medida como circunferencia escrotal, evaluación de aptitud para el entore y características de semen (como densidad), aunque sí encontraron que toros eficientes (RFI negativo) tuvieron una menor motilidad espermática (80 vs. 85 %,  $P = 0,04$ ) y que hubo una correlación fenotípica baja con morfología espermática ( $r_p = 0,13$ ;  $P < 0,1$ ). Además, Wang et al. (2012) encontró que toros eficientes (RFI negativo)

produjeron más terneros nacidos por padre ( $P < 0,01$ ) que toros ineficientes, por lo que la menor motilidad espermática no afectó la fertilidad de estos toros.

#### 1.1.2.2. Asociación entre RFI en recría y engorde

Estudios realizados sobre asociaciones entre valores de RFI medidos en diferentes momentos indican que estas son positivas y significativas (cuadro 1.2). Las correlaciones genéticas estimadas para RFI medidos en momentos diferentes pero próximos en la vida de toritos (al destete y al año) y sometidos a dietas similares fueron altas ( $r_g = 0,95$ ; error estándar = 0,03) (Arthur et al., 2001b), al igual que para RFI medido en vaquillonas (posdestete) y vacas adultas (4 años) con la misma dieta ( $r_g = 0,98$ ) (Archer et al., 2002).

En cuanto a asociaciones fenotípicas, las correlaciones son de moderadas a altas con valores entre 0,40 y 0,85 (Archer et al., 2002, Arthur et al., 2001b, Cassady et al., 2016, McGee et al., 2014, Trujillo et al., 2013). En el caso de mediciones realizadas con dietas similares en los diferentes momentos de la vida del animal, Arthur et al. (2001b) y Cassady et al. (2016) encontraron correlaciones fenotípicas de 0,85 y 0,63, respectivamente, en toritos y novillos. En el caso de modificaciones importantes en el tipo de alimentación, se ha observado cierto nivel de cambios en el ranking de los animales, lo cual ha sido reportado por Trujillo et al. (2013) ( $r_p = 0,50$ ;  $P = 0,012$ ), McGee et al. (2014) ( $r_p = 0,50$ ;  $P = 0,01$ ) y Cassady et al. (2016) ( $r_p = 0,40$ ;  $P < 0,01$ ), donde la dieta de las vaquillonas y novillos cambió su concentración energética y proporción de fibra/concentrado entre las mediciones de RFI en la recría y el engorde. Cuando se midió RFI en momentos distantes en el tiempo, con estados fisiológicos diferentes y con distintas dietas, no se encontró correlación fenotípica. Esto ocurrió en el caso de Black et al. (2013), que midieron RFI en el posdestete de vaquillonas y luego como vacas de 3 años y lactando ( $P = 0,3$ ), aunque encontraron una correlación fenotípica de 0,63 ( $P = 0,001$ ) entre los CMS medidos en ambas etapas.

Cuadro 1.2. Resultados de diferentes autores sobre la relación entre el RFI estimado en distintas etapas de la vida de bovinos.

Autor	Raza	Categoría	Alimentación	N.º de animales	Método de medición	Característica	Valor de correlación	Error estándar	Valor de P
Arthur et al., 2001b (Francia)	charolais	toritos	Pelets (57 % heno alfalfa y 37 % maíz, + urea, etc.), <i>ad libitum</i>	792		Correlación genética entre RFI al destete y RFI al año	0,95	0,03	0,03 <sup>1</sup>
						Correlación fenotípica entre RFI al destete y RFI al año	0,85		
Archer et al., 2002 (Australia)	angus	vaquillonas y vacas	RTM <i>ad libitum</i> (10 MJ EM/kgMS y 16 a 18 % PC)	751	Sistema automatizado	Correlación fenotípica entre RFI posdestete y RFI de vaca adulta	0,40		
						Correlación genética entre RFI posdestete y RFI de vaca adulta	0,98		
Kelly et al., 2010b (Irlanda)	limousin * friesland	vaquillonas (418 kg PV inicial)	RTM peleteada <i>ad libitum</i> (70 % concentrado y 30 % ensilaje de maíz; 10,7 MJ EM/kgMS y 17,1 % PC)	50	Estaciones de alimentación electrónicas	Repetibilidad de RFI entre etapas de crecimiento y terminación	0,62		< 0,0001
						Repetibilidad de CMS entre etapas de crecimiento y terminación	0,61		< 0,0001
Trujillo et al., 2013 (Uruguay)	aberdeen angus	vaquillonas	RTM <i>ad libitum</i> de heno picado de alfalfa (40 %) y concentrado (60 %) en confinamiento (16,2 % PC y 2,5 Mcal EM/kgMS) y luego pastoreo continuo de una mezcla de festuca, <i>Lotus corniculatus</i> y trébol blanco (15,3 % PC y 2,76 Mcal EM/kgMS)	24	Diferencia entre ofrecido y remanente en confinamiento y técnica de n-alcanos en pastoreo	Correlación fenotípica entre RFI posdestete en confinamiento y RFI en engorde en pastoreo	0,50		0,012
Black et al., 2013 (Estados Unidos)	angus, brahman, romosinuano y sus cruzas	vaquillonas y vacas de 3 años lactando	RTM <i>ad libitum</i> (63 % concentrado y 37 % heno <i>Paspalum notatum</i> , 1,5 Mcal ENm/kgMS, 0,9 Mcal ENG/kgMS y 14,1 % PC en posdestete; 86,7 % ensilaje <i>Paspalum notatum</i> 13,3 % concentrado, 1,0 Mcal ENm/kgMS, 0,4 Mcal ENG/kgMS, 0,8 Mcal ENI/kgMS y 16 % PC en vacas lactando)	74	GrowSafe	Correlación fenotípica entre RFI de vaquillona y RFI de vaca	0,13		0,297
						Correlación fenotípica entre RFI de vaquillona y CMS de vaca	0,21		0,071
						Correlación fenotípica entre CMS de vaquillona y CMS de vaca	0,63		0,001
McGee et al., 2014 (Estados Unidos)	red angus	novillos	Posdestete: RTM <i>ad libitum</i> (60% heno alfalfa y 40 % concentrado; 1,6 Mcal ENm/kgMS, 0,9 Mcal ENG/kgMS y 16,4 % PC). Terminación: RTM <i>ad libitum</i> (69 % concentrado y 31 % heno alfalfa; 1,9 Mcal ENm/kgMS, 1,1 Mcal ENG/kgMS y 15,2 % PC)	25	GrowSafe	Correlación fenotípica entre RFI en recría y RFI en terminación (ambos en confinamiento)	0,50		0,01
Cassady et al., 2016 (Estados Unidos)	charolais * simangus	novillos	RTM con base en maíz, <i>ad libitum</i>	320	GrowSafe	Correlación fenotípica entre RFI recría y engorde (ambos en confinamiento)	0,63		< 0,01
		vaquillonas	RTM de ensilaje de maíz y heno de alfalfa en recría y RTM con base en maíz en engorde, <i>ad libitum</i>	308	GrowSafe	Correlación fenotípica entre RFI recría y engorde (ambos en confinamiento)	0,40		< 0,01
Lahart et al., 2020 (Irlanda)	cruzas de limousin y aberdeen angus con limousin, aberdeen angus, limousin*holando y aberdeen angus*holando	novillos y vaquillonas	Ensilaje de pastura y concentrado restringido, en confinamiento (323 a 369 kg PV)	97	Calan gates	Correlación feotípica (Spearman´s rank correlation) entre RFI con ensilaje y RFI con pastoreo	0,25		< 0,05
			Pastoreo rotativo de pastura dominada por raigrás perenne (400 a 484 kg PV)		Técnica de n-alcanos	Correlación fenotípica (Spearman´s rank correlation) entre RFI con pastoreo y RFI con RTM alto en concentrados	0,15		> 0,1
			RTM (77 % concentrado, 23 % heno) <i>ad libitum</i> (595 a 691 kg PV)		Comederos electrónicos	Correlación fenotípica (Spearman´s rank correlation) entre RFI con ensilaje y RFI con RTM alto en concentrados	0,25		< 0,05

<sup>1</sup>(error estándar)

### 1.1.2.3. Medición de la eficiencia de conversión

La estimación del consumo de alimento puede predecirse a partir de información de producción usando una fórmula de consumo estándar (ejemplo: NRC) o mediante una regresión que utilice datos de pruebas de consumo reales (Arthur, 2001), donde la mayor limitante es el alto costo de los equipos de medición del consumo y, por lo tanto, la cantidad de animales que pueden evaluarse (Manafiazar et al., 2017, Herd et al., 2003).

Dado que la medición del consumo de alimento es costosa, la duración de las pruebas de RFI y la cantidad de datos recolectados debe ser optimizada para reducir los costos de las pruebas de animales (Herd et al., 2003). La recomendación actual para la industria australiana es de 70 días de prueba para RFI, basado en lo reportado por Archer et al. (1997), quienes encontraron que para ganados de razas británicas evaluados para RFI con registros diarios del consumo de alimento y quincenales del peso vivo, 35 días eran adecuados para medir el consumo de alimento, pero eran necesarios 70 días para medir de forma precisa la tasa de crecimiento y RFI.

Manafiazar et al. (2017) analizaron la posibilidad de acortar el período de medición del consumo individual de los animales utilizando la información de 4842 animales y encontraron que acortándolo a 42 días (con un mínimo de 30 días de registro de CMS válidos) puede estimar el RFI ajustado por grasa, pero se debe medir la evolución de peso vivo durante los 84 días de las pruebas regulares, lo que disminuye un 12 % la precisión de la estimación de RFI, pero permite evaluar potencialmente el doble de animales que en las pruebas regulares. Cassady et al. (2016) también encontraron que un período de evaluación del CMS diario individual de hasta 35 días es suficiente para predecir el CMS de la evaluación de 70 días de duración (correlación de 0,95 entre CMS medido en 35 días y CMS medido en 70 días).

Los animales pueden ser evaluados para RFI tanto en instalaciones de prueba centralizadas como en establecimientos comerciales (Herd et al., 2003). Una situación común en ambas formas de evaluar son los efectos del ambiente previo a la prueba en el desempeño animal durante la prueba. Por eso Archer et al. (1999) sugirieron dos formas de eliminar las diferencias debidas a la historia previa, una biológica (una fase común de ajuste previo a la prueba) y otra estadística (restringir las comparaciones a los animales que fueron criados en el mismo ambiente desde su concepción hasta la prueba —grupo contemporáneo—). El manual de estándares australianos (Exton, 2001) exige evaluar animales en grupos contemporáneos y un período de adaptación previo a la evaluación de por lo menos 21 días (Arthur et al., 2014, Herd et al., 2003). Las comparaciones de RFI pueden estar menos influenciadas por las condiciones ambientales previas a la prueba que lo que están los caracteres relacionados a crecimiento (Herd et al., 2003).

El manual de estándares australianos (Exton, 2001) también describe el protocolo de la evaluación y los registros que deben realizarse. Asimismo, especifica que el alimento debe ser suministrado *ad libitum* y que debe tener un contenido energético cercano a 10 MJ (2,39 Mcal) de energía metabolizable por kg de materia seca (MS) para pruebas posdestete y cercano a 12 MJ (2,87 Mcal) de energía metabolizable por kg de MS para pruebas de ganado en terminación en feedlot (Arthur et al., 2014). Por otro lado, la guía de la Beef Improvement Federation (BIF, 2016) también indica un período de acostumbramiento de 21 días, seguidos por 70 días de prueba (y que dentro de los cuales haya por los menos 50 días de registro de consumo válidos), con una dieta que contenga por lo menos 2,4 Mcal EM/kg MS en pruebas posdestete y 2,9 Mcal EM/kg MS en pruebas de terminación.

El método de medición del consumo individual de alimento, para posteriormente estimar RFI, varía según el tipo de dieta utilizada y el sistema de alimentación (Berry et al., 2014). En general, las evaluaciones de consumo para estimar RFI se realizan en sistemas de confinamiento, en los cuales los animales están en corrales y son alimentados en comederos que permiten mediciones

automáticas del consumo individual. Las principales tecnologías usadas para medir consumo individual son: Calan gates (American Calan Inc., Northwood, New Hampshire, EE. UU.), Griffith Elder (Griffith Elder & Co Ltd, Bury St Edmunds, Reino Unido), Insentec (Insentec B.V., Marknesse, Países Bajos) y Growsafe (GrowSafe Systems Ltd, Airdrie, Canadá) systems (Berry et al., 2014).

#### 1.1.2.4. Factores que inciden en el RFI

Richardson y Herd (2004), trabajando con novillos angus descendientes de una sola generación de selección divergente por RFI, reportaron que hay varios mecanismos fisiológicos que contribuyen a la variación de RFI. Según estos autores, el reciclaje de proteínas, el metabolismo de los tejidos y la respuesta al estrés contribuyeron en por lo menos un 37 % de la variación del RFI. Por otro lado, las diferencias en digestión (digestibilidad del alimento consumido) explicaron un 10 % de la variación en RFI, mientras que la actividad y el incremento de calor por fermentación explicaron un 10 % y un 9 %, respectivamente. La diferencia en la energía retenida en la composición corporal de los animales (proteína y grasa) explicó el 5 % de la diferencia en RFI por la selección divergente, mientras que los patrones de alimentación o consumo explicaron un 2 % de la variación. Aproximadamente un 27 % de la variación en RFI se debió a la variación en otros procesos, como el transporte de iones. Por otro lado, Herd (2004) reportaron que es posible que haya por lo menos cinco grandes procesos que afectan la eficiencia, asociados con la variación en: 1) consumo de alimento, 2) digestión del alimento (y los costos de energía asociados), 3) metabolismo (anabolismo y catabolismo asociados e incluyendo la variación en la composición corporal), 4) actividad y 5) termorregulación.

### *Consumo de alimento*

Según Herd y Arthur (2009), la variación en el consumo de alimento está asociada a la variación en los requerimientos de mantenimiento de los rumiantes y, a medida que aumenta el consumo de alimento, se incrementa la cantidad de energía usada en la digestión del alimento, debido al aumento de tamaño de los órganos del sistema digestivo y del gasto de energía que ocurre en los tejidos. Como la selección por RFI está asociada a diferencias en el consumo, los animales que comen menos para un mismo desempeño podrían tener menor gasto de energía en gasto calórico por alimentación (Herd y Arthur, 2009, Herd et al., 2004).

Adam et al. (1984) reportaron que el costo energético por consumo es función del tiempo utilizado en la ingesta más que de la cantidad de alimento ingerido, y por eso la tasa de ingestión y duración de la comida son factores importantes en la determinación del costo energético por consumo en el ganado. Nkrumah et al. (2006) encontraron que novillos de alto RFI presentaron una mayor duración de la comida ( $P < 0,01$ ) y un mayor número de visitas al comedero por día ( $P = 0,01$ ) que novillos de bajo RFI. Nkrumah et al. (2007b) también encontraron que novillos de alto RFI presentaron una mayor duración de la comida ( $P < 0,001$ ) y una mayor frecuencia de alimentación en el día ( $P < 0,001$ ) que los novillos de bajo RFI, y además hallaron un mayor tiempo de cabeza gacha en el día en los novillos de alto RFI ( $P < 0,001$ ). Estos mismos autores reportaron correlaciones fenotípicas positivas medias entre RFI fenotípico y duración de comida diaria y tiempo diario de cabeza gacha ( $P < 0,001$ ;  $r_p = 0,49$  y  $0,50$ , respectivamente) y baja entre RFI fenotípico y frecuencia de alimentación en el día ( $P < 0,01$ ;  $r_p = 0,18$ ). También reportaron correlaciones genéticas de medias a altas entre RFI fenotípico y duración de comida diaria, tiempo diario de cabeza gacha y frecuencia de alimentación en el día ( $r_g = 0,57 \pm 0,28$ ;  $0,33 \pm 0,30$ ; y  $-0,34 \pm 0,30$ , respectivamente). Basarab et al. (2011) encontraron que vaquillonas de alto RFI tuvieron una mayor frecuencia de eventos de alimentación ( $P = 0,001$ ) que las vaquillonas de bajo RFI, pero no hallaron diferencias en la duración de la comida ni en el tiempo de cabeza gacha. Kelly et al.

(2010b) encontraron una tendencia a correlación fenotípica positiva ( $P < 0,1$ ) de 0,24 entre RFI y número de eventos de comida en el día. Basarab et al. (2007) encontraron en terneros una correlación fenotípica positiva entre RFI y duración de la comida ( $P < 0,001$ ;  $r_p = 0,30$ ) y entre RFI y tiempo de cabeza gacha ( $P < 0,001$ ;  $r_p = 0,36$ ), pero no hallaron correlación entre RFI y frecuencia de alimentación ( $P = 0,210$ ). Robinson y Oddy (2004) reportaron que en novillos y vaquillonas en terminación en feedlot hubo una correlación fenotípica baja y positiva entre RFI y duración de comida, número de eventos de comida y tasa de alimentación ( $r_p = 0,16 \pm 0,11$ ;  $0,18 \pm 0,10$ ;  $0,14 \pm 0,25$ , respectivamente), y una correlación genética media y positiva entre RFI y duración de comida y entre RFI y número de eventos de comida en el día ( $r_g = 0,35 \pm 0,17$ ;  $0,43 \pm 0,11$  respectivamente), pero no hubo correlación entre RFI y tasa de alimentación ( $r_g = -0,07 \pm 0,17$ ).

### *Digestión*

Según Herd y Arthur (2009), existe una variación genética en la digestión total del alimento en el tracto digestivo. Trabajando con novillos hijos de animales seleccionados por alto y bajo RFI, Richardson et al. (2004) encontraron una correlación fenotípica media ( $P < 0,05$ ) entre RFI y la digestibilidad de la materia seca consumida ( $r_p = -0,44$ ) e indicaron que los novillos de alto RFI digirieron menos el alimento consumido. Nkrumah et al. (2006) también reportaron que novillos de alto RFI presentaron una menor ( $P < 0,05$ ) digestibilidad aparente de la materia seca y proteína cruda consumida que los novillos de bajo RFI y encontraron una correlación fenotípica ( $P < 0,1$ ) de -0,33 entre RFI y digestibilidad aparente de la materia seca. Bonilha et al. (2017) encontraron que toros nelore de bajo RFI en la fase de terminación presentaron una digestibilidad de nutrientes totales de 59,7 % frente a 55,0 % de los toros de alto RFI ( $P = 0,0657$ ). Fitzsimons et al. (2013), sin embargo, no hallaron diferencias en la digestibilidad total del tracto en vaquillonas de alto o bajo RFI ( $P = 0,83$ ).

### *Composición corporal y metabolismo*

Richardson y Herd (2004) reportaron que la composición química del cuerpo de los novillos estaba correlacionada con la variación genética de RFI, donde los novillos hijos de animales con bajo RFI tuvieron menos grasa total en el cuerpo que los hijos de animales con alto RFI. Robinson y Oddy (2004) encontraron correlaciones fenotípicas bajas positivas entre RFI y porcentaje de grasa intramuscular, espesor de grasa en la cadera (en el punto P8) y espesor de grasa dorsal (entre la 12.<sup>a</sup> y la 13.<sup>a</sup> costilla), y negativa entre RFI y área de ojo de bife ( $r_p = 0,12 \pm 0,03$ ;  $0,11 \pm 0,03$ ;  $0,13 \pm 0,03$  y  $-0,03 \pm 0,03$ , respectivamente) en novillos y vaquillonas. También encontraron correlaciones genéticas de  $0,22 \pm 0,17$  entre RFI y porcentaje de grasa intramuscular, de  $0,72 \pm 0,17$  entre RFI y espesor de grasa en la cadera, de  $0,48 \pm 0,12$  entre RFI y grasa dorsal, y de  $-0,24 \pm 0,26$  entre RFI y área de ojo de bife. Nkrumah et al. (2004) encontraron que novillos y toros de alto RFI tenían un mayor espesor de grasa dorsal que los de bajo RFI ( $P = 0,05$ ), y también hallaron que las carcasas de novillos de alto RFI presentaron un mayor grado de engrasamiento (medido entre la 12.<sup>a</sup> y la 13.<sup>a</sup> costilla) ( $P = 0,03$ ), una menor proporción de carne magra (músculo) ( $P = 0,01$ ) y una menor proporción estimada de carne comercializable ( $P = 0,04$ ). Nkrumah et al. (2007a) encontraron que novillos de alto RFI presentaron un mayor espesor de grasa dorsal y una mayor ganancia de grasa dorsal que los de bajo RFI ( $P < 0,001$ ), y reportaron también que las carcasas de novillos de alto RFI tuvieron un mayor grado de engrasamiento (medido entre la 12.<sup>a</sup> y la 13.<sup>a</sup> costilla) ( $P < 0,001$ ), una mayor proporción estimada de carne comercializable ( $P = 0,003$ ) y una menor proporción de carne magra ( $P = 0,02$ ). Estos autores además encontraron una correlación fenotípica de  $0,25$  entre RFI fenotípico y grasa dorsal ( $P < 0,01$ ), y correlaciones genéticas entre RFI fenotípico y grasa dorsal, grasa intramuscular y área de ojo de bife de  $0,35 \pm 0,30$ ,  $0,32 \pm 0,29$  y  $-0,52 \pm 0,32$ , respectivamente. Con respecto a las características de carcasa, estos autores reportaron correlaciones fenotípicas medias a bajas de RFI fenotípico con peso de carcasa ( $r_p = 0,26$ ,  $P < 0,01$ ), grado de engrasamiento de

carcasa ( $r_p = 0,23$ ,  $P < 0,01$ ), proporción estimada de carne comercializable ( $r_p = -0,21$ ,  $P < 0,01$ ), grado de engrasamiento intramuscular ( $r_p = 0,17$ ,  $P < 0,05$ ) y clasificación por proporción de carne magra ( $r_p = 0,22$ ,  $P < 0,01$ ), y reportaron correlaciones genéticas medias a altas entre RFI fenotípico y grado de engrasamiento en carcasa ( $r_g = 0,33 \pm 0,29$ ), área de ojo de bife en carcasa ( $r_g = -0,64 \pm 0,26$ ), proporción estimada de carne comercializable ( $r_g = -0,54 \pm 0,29$ ), y grado de engrasamiento intramuscular ( $r_g = 0,28 \pm 0,38$ ). Richardson et al. (2001), trabajando con novillos hijos de padres seleccionados de forma divergente por alto y bajo RFI, encontraron un menor aumento en el área de ojo de bife de los novillos de la línea de alto RFI que en la de bajo RFI ( $P < 0,05$ ), y la correlación entre el valor de cría estimado para RFI de los padres y el cambio en el área de ojo de bife de los novillos fue de  $-0,44$  ( $P < 0,01$ ). Estos autores hallaron también que las carcasas de los novillos de alto RFI tenían mayor cantidad de grasa (intramuscular y subcutánea) ( $P < 0,05$ ) y menor proporción de órganos externos, mayor proporción de grasa en carcasa y menor proporción de huesos en relación con el peso vivo final ( $P < 0,05$ ). Además, ellos reportaron que los novillos de alto RFI presentaron una menor ganancia en proteína durante el experimento ( $P < 0,05$ ) y una mayor producción de calor residual en relación con el peso total de proteína ganado durante la prueba ( $P < 0,05$ ). No encontraron, sin embargo, ninguna diferencia en la proporción de órganos internos en relación con el peso vivo final entre los novillos de las líneas de alto y bajo RFI.

Los resultados encontrados con respecto al metabolismo de animales de alto y bajo RFI concuerdan con lo reportado sobre las diferencias en su composición corporal. El mayor contenido de urea en sangre está relacionado a la degradación de proteínas y a una menor deposición de músculo en ovinos (Cameron, 1992). Richardson et al. (2004) encontraron que los novillos de alto RFI presentaron un mayor contenido de urea en sangre al inicio de la prueba de eficiencia que los novillos de bajo RFI ( $P < 0,05$ ). Kelly et al. (2010b) encontraron una correlación fenotípica positiva media entre RFI y contenido de urea en sangre ( $r_p = 0,38$ ,  $P <$

0,01) y Fitzsimons et al. (2013) reportaron que vaquillonas de alto RFI presentaron un mayor contenido de urea en sangre que vaquillonas de bajo RFI ( $P = 0,03$ ). El mayor contenido de creatinina en sangre está relacionado a mayor músculo magro en ovinos (Cameron, 1992). Richardson et al. (2004) reportaron una correlación positiva media entre el RFI de novillos y su contenido de creatinina en sangre al inicio de la prueba de eficiencia ( $r_p = 0,40$ ,  $P < 0,05$ ), mientras que Fitzsimons et al. (2013) encontraron que las vaquillonas de alto RFI tenían un menor contenido de creatinina en sangre que las de bajo RFI ( $P = 0,01$ ). El mayor contenido de triglicéridos en sangre estuvo asociado positivamente y en baja magnitud al contenido de carne magra en carcasa en ovinos (Cameron, 1992). En este mismo sentido, Richardson et al. (2004) encontraron que los novillos de alto RFI, que tendrían menor contenido de carne magra en carcasa, presentaron un menor contenido de triglicéridos en sangre que los de bajo RFI ( $P < 0,05$ ), aunque Fitzsimons et al. (2013) no hallaron diferencias en el contenido de triglicéridos en sangre entre vaquillonas de alto y bajo RFI. Richardson et al. (2004) reportaron que la enzima aspartato aminotransferasa, un indicador del metabolismo de proteínas y de la función hepática, presentó una correlación positiva media con el RFI de los novillos ( $r_p = 0,43$ ,  $P < 0,05$ ). El contenido de  $\beta$ -hidroxibutirato (BHB) en sangre ha presentado una correlación positiva con el contenido estimado de carne magra en carcasa de ovinos (Cameron, 1992) y Kelly et al. (2010b) reportaron una correlación de 0,40 ( $P < 0,01$ ) entre el contenido de BHB en sangre y el RFI de vaquillonas, mientras que Richardson et al. (2004) encontraron una correlación de 0,55 ( $P < 0,001$ ) entre BHB de novillos al destete y RFI. Sin embargo, Fitzsimons et al. (2013) no hallaron diferencias entre la concentración de BHB en sangre de vaquillonas de alto y bajo RFI.

La variación en aspectos de la eficiencia energética de la función mitocondrial también podría explicar parte de la variación entre animales en la eficiencia de conversión del alimento. Kolath et al. (2006) no encontraron diferencias en la función mitocondrial medida en músculo entre novillos angus con RFI fenotípico

alto y bajo (medido en el engorde), pero la tasa de respiración mitocondrial fue mayor en los novillos de bajo RFI. Por otro lado, Casal et al. (2018) encontraron que la densidad mitocondrial hepática fue mayor ( $P = 0,05$ ) en novillos hereford de bajo RFI que en los de alto RFI (medido en la recría) y que en los novillos de bajo RFI la respiración basal y la tasa de respiración máxima del complejo II fueron mayores ( $P = 0,03$  y  $P = 0,01$ , respectivamente), mientras que la tasa de respiración máxima del complejo I tendió a ser mayor ( $P = 0,09$ ), por lo que estos animales tendrían una mejor eficiencia de utilización de los nutrientes consumidos. Además, según Casal et al. (2018), la mayor disponibilidad de actividad de las cadenas respiratorias en los animales de bajo RFI les permitiría tener una mayor capacidad de reserva para proteger las células de la insuficiencia energía/substrato y del estrés oxidativo, entre otros estreses.

#### *Actividad*

Las variaciones en el incremento calórico y, por lo tanto, la energía disponible para mantenimiento y crecimiento también ocurren como resultado de diferencias en el gasto de energía asociado a la actividad (Herd y Arthur, 2009). Las diferencias en actividad también pueden asociarse a la variación en RFI en el ganado. Los mecanismos asociados con la variación en la actividad incluyen el trabajo implicado en la alimentación, la rumia y la locomoción a varias velocidades (Herd et al., 2004). Herd et al. (2004) reportaron que el costo energético de estas actividades para líneas de toros y vaquillonas seleccionadas por alto y bajo RFI, bajo condiciones estándar de evaluación, causaba aproximadamente el 5 % del aumento en el consumo de energía en la línea de selección de ganado de alto RFI (baja eficiencia).

#### *Termorregulación*

Según Herd y Arthur (2009), la principal ruta de pérdida de energía en rumiantes es la pérdida de calor por evaporación (a través del intercambio de calor en los pulmones y narinas). En gran parte, esto es regulado por la tasa respiratoria, pero

aún no se conoce de la relación entre la tasa respiratoria y el RFI. El cambio de postura y otras adaptaciones como mojarse, buscar refugio y amontonarse no constituyen en sí mismos una gran proporción de la variación en pérdida de calor, excepto en situaciones extremas (Herd y Arthur, 2009).

### 1.1.3. Emisiones de metano entérico y asociación con RFI

#### 1.1.3.1. Emisiones de metano

El CH<sub>4</sub> es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global entre 21 y 25 veces mayor que el CO<sub>2</sub> y un tiempo de vida media de 12 años en la atmósfera (Solomon et al., 2007). El CH<sub>4</sub> es un producto de la fermentación anaerobia que realiza un complejo sistema simbiótico entre diferentes grupos de microorganismos (bacterias, protozoos y hongos) presentes en el tracto digestivo, principalmente en el rumen (Buddle et al., 2011, Van Soest, 1994). Los microorganismos del rumen degradan los carbohidratos de la dieta, lo que produce ácidos grasos volátiles (principalmente acetato, propionato y butirato), hidrógeno (H<sub>2</sub>) y CO<sub>2</sub> (Vargas et al., 2012, Buddle et al., 2011). Estas moléculas de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> que se liberan deben ser removidas para mantener la eficiencia energética en la fermentación anaerobia. Las principales vías de remoción del H<sub>2</sub> son la formación de ácido propiónico y la formación de CH<sub>4</sub> (Van Soest, 1994), siendo esta última la más importante (Vargas et al., 2012, Buddle et al., 2011, Beauchemin et al., 2008). La producción de CH<sub>4</sub> es llevada a cabo por varias especies de microorganismos metanogénicos del dominio Archaea, que usan el H<sub>2</sub> para reducir el CO<sub>2</sub>, lo que produce CH<sub>4</sub>, el cual es liberado luego a la atmósfera principalmente a través de la eructación y exhalación del animal (Vargas et al., 2012, Buddle et al., 2011). Anderson et al. (1987) reportaron que las bacterias celulolíticas y metanogénicas se encontraron presentes en el rumen desde los tres días de edad en terneros. Al aumentar el consumo de materia seca y la actividad metabólica en el rumen, se

incrementó también la cantidad de microorganismos metanogénicos y, por lo tanto, la producción de CH<sub>4</sub>.

Blaxter y Clapperton (1965) reportaron producciones medias de CH<sub>4</sub> de 16,4 a 42,4 L/día en ovinos y de 73,4 a 248,5 L/día en bovinos, resultados provenientes de 615 experimentos con 55 dietas diferentes. Estos autores encontraron que, a un nivel de consumo de mantenimiento, las pérdidas de energía por emisión de CH<sub>4</sub> fueron de 6,2 a 10,8 % de la energía bruta ingerida en alimentos cuya digestibilidad aparente osciló entre 55 y 87 %. Cambra-López et al. (2008), por su parte, encontraron en su revisión pérdidas de energía por emisión de CH<sub>4</sub> de 1,9 a 7,5 % de la energía bruta ingerida por bovinos en alimentos con digestibilidades de 45 a 85 %. Johnson y Johnson (1995) encontraron que, generalmente, a medida que aumenta la digestibilidad de la dieta, aumenta también la variabilidad de la pérdida de CH<sub>4</sub>, habiendo dos mecanismos principales que causan estas variaciones en la producción de CH<sub>4</sub>. El primero es la cantidad de carbohidratos de la dieta fermentados en el retículo-rumen. Este mecanismo tiene varias interacciones dieta-animal que afectan el balance entre las tasas de fermentación de carbohidratos y de pasaje. El segundo mecanismo regula la disponibilidad de hidrógeno y, por lo tanto, la producción de CH<sub>4</sub> a través de la proporción de ácidos grasos volátiles (AGV) producidos. Especialmente, la fracción de ácido propiónico que se produce en relación al ácido acético es la que tiene un mayor impacto en la producción de CH<sub>4</sub>. Según Johnson y Johnson (1995), la producción de CH<sub>4</sub> también puede verse afectada cuando hay requerimientos de hidrógeno alternativos significativos. Estos requerimientos alternativos suelen ser relativamente menores, pero pueden incluir oxígeno, ácidos grasos insaturados, nitratos, sulfatos y crecimiento microbiano.

Se ha encontrado que la emisión de CH<sub>4</sub> entérico en bovinos de carne y leche tuvo heredabilidades medias que variaron entre 0,19 y 0,23 (Lassen y Løvendahl, 2016, Donoghue et al., 2013,)), mientras que, en ovinos, las heredabilidades, también medias, variaron entre 0,13 y 0,30 (Pinares-Patiño et al., 2013, 2011). Esto evidencia que se pueden seleccionar animales por menor emisión de metano, lo

que mejora la descendencia en este sentido y permite progresos permanentes en el rodeo.

Según Johnson y Johnson (1995), los principales factores que afectan la producción de CH<sub>4</sub> entérico son el consumo de alimento, el tipo de carbohidrato, la adición de lípidos y la manipulación de la microflora ruminal, incluyendo el uso de ionóforos. En relación con el consumo de alimento, Blaxter y Clapperton (1965) encontraron una estrecha relación de la producción de CH<sub>4</sub> con la cantidad de alimento consumido y la digestibilidad de la dieta. Ellos reportaron una mayor producción de CH<sub>4</sub> con dietas de baja digestibilidad a un nivel de consumo de mantenimiento, mientras que dietas de alta digestibilidad y un consumo tres veces mayor al de mantenimiento disminuyeron la producción de CH<sub>4</sub> en un 30 %. Pinares-Patiño et al. (2003) encontraron que en ovinos bajo condiciones de consumo restringido de heno de alfalfa la producción de CH<sub>4</sub> absoluta (g/día) estuvo correlacionada de forma positiva con la cantidad de materia orgánica (g) en el rumen ( $r_p = 0,84$ ) más que con el consumo de materia orgánica (g/día), mientras que la producción de CH<sub>4</sub> en relación con el consumo de energía bruta (% EB consumida) estuvo correlacionada de forma negativa con la tasa de pasaje de la fracción sólida del rumen (%/hora) ( $r_p = -0,75$ ). Por otro lado, Goopy et al. (2014) reportaron que ovejas de baja emisión de CH<sub>4</sub>/kg de MS consumida tuvieron un menor tiempo de retención ruminal y un menor volumen de rumen. Ellos midieron las emisiones de CH<sub>4</sub> de 160 ovejas mediante calorimetría de circuito abierto y seleccionaron 10 ovejas de alta (> 1 desvío estándar de la media) y baja (menor a 1 desvío estándar de la media) producción de CH<sub>4</sub>/kg de MS consumida, para luego realizar otros estudios. Las 20 ovejas fueron alimentadas con heno de alfalfa y avena a un nivel de 120 % los requerimientos de mantenimiento. Estos autores encontraron que las ovejas de baja emisión de CH<sub>4</sub>/kg de MS consumida tuvieron un menor tiempo medio de retención ruminal tanto de la fase líquida ( $P < 0,0001$ ) como sólida (partículas) ( $P = 0,002$ ) de la digesta e indicaron por regresión lineal que la variación en el tiempo medio de retención ruminal de las fracciones líquida y

sólida explicó en un 70 y 59 %, respectivamente, la variación observada en la emisión de CH<sub>4</sub>/kg MS consumida. Además, reportaron que las ovejas de baja emisión de CH<sub>4</sub>/kg MS consumida presentaron menor contenido ruminal de partículas (fracción sólida) en términos absolutos (P = 0,007) y por kg de MS consumida (P = 0,002), y no se registraron diferencias en el CMS con las de alta emisión. También encontraron, mediante tomografía computarizada de rayos X, que las ovejas de baja emisión de CH<sub>4</sub>/kg MS consumida tenían un menor volumen de rumen (P = 0,048).

El tipo de carbohidrato fermentado afecta la producción de CH<sub>4</sub>, especialmente a través de su impacto en el pH ruminal y en las poblaciones de microorganismos ruminales (Johnson y Johnson, 1995). Los carbohidratos de mayor digestibilidad provocan una mayor concentración de ácidos grasos volátiles en el fluido ruminal y, por lo tanto, un menor pH (Vargas et al., 2012). Según Van Soest (1994), los pH inferiores a 6,2 son menos favorables para el crecimiento de los microorganismos celulolíticos, que generalmente producen mayor proporción de ácido acético y, por lo tanto, mayores cantidades de CH<sub>4</sub> por unidad de materia orgánica degradada (Pinares-Patiño et al., 2007). Por eso, los carbohidratos de mayor digestibilidad provocan una reducción de los microorganismos celulolíticos en el rumen, que resulta en una menor producción de ácido acético y, consecuentemente, de CH<sub>4</sub>. Moe y Tyrrell (1979) encontraron que la fermentación de las paredes celulares de la fibra produjo una relación ácido acético/propiónico más alta y, por lo tanto, una mayor producción de CH<sub>4</sub>. La fermentación de los carbohidratos solubles y almidón, por otro lado, al producir una menor relación de ácido acético/propiónico, fueron menos metanogénicos que la celulosa y hemicelulosa de las paredes celulares de la fibra vegetal. Por otro lado, a medida que aumenta la cantidad de carbohidratos fermentados por día, independientemente de la fracción que sea (fibra o almidón), disminuye la producción de CH<sub>4</sub> por unidad de energía bruta consumida (Johnson y Johnson, 1995).

Los lípidos contenidos en los alimentos del ganado o la adición de lípidos en la dieta afectan las emisiones de CH<sub>4</sub> a través de varios mecanismos, incluyendo la biohidrogenación de los ácidos grasos insaturados, el aumento de la producción de ácido propiónico y la inhibición de los protozoos en el rumen (Johnson y Johnson, 1995). Beauchemin et al. (2008) analizaron la relación entre el nivel de grasa agregado a la dieta (% CMS) y la reducción en la emisión de CH<sub>4</sub> (kg/kg MS consumida) para varias fuentes de grasa y dietas a partir de los resultados de 17 estudios con bovinos de carne, leche y corderos. Ellos calcularon que la emisión de CH<sub>4</sub> (g/kg MS consumida) se redujo un 5,6 % por cada 1 % de agregado de grasa en la dieta, siendo la reducción de la emisión de CH<sub>4</sub> (en relación con los tratamientos control) explicada en un 67 % por el nivel de grasa agregado. Además encontraron que hubo una variación considerable en la reducción de la emisión de CH<sub>4</sub> observada según la fuente de grasa.

Por otra parte, existen metabolitos secundarios de algunas especies vegetales, como los taninos y saponinas, que disminuyen la producción de CH<sub>4</sub> entérico (Gerber et al., 2013). El efecto de disminución en la producción de CH<sub>4</sub> que provocan los forrajes ricos en saponinas parece estar relacionado especialmente con su efecto perjudicial para los protozoos (Beauchemin et al., 2008). En un experimento *in vitro*, Guo et al. (2008) encontraron que la adición de saponinas de semilla de té al inóculo ruminal extraído de dos ovinos redujo significativamente la producción de CH<sub>4</sub> en un 8 % después de 24 horas de incubación comparado con el tratamiento control sin adición de saponinas de té. Según estos autores, esta disminución en la producción de CH<sub>4</sub> fue causada por la inhibición de los protozoos provocada por las saponinas de té y por la interferencia que realizaron en la transferencia de hidrógeno interespecífica entre los protozoos y los microorganismos metanogénicos asociados a ellos.

Actualmente se han estudiado diferentes estrategias para mitigar las emisiones de CH<sub>4</sub> entérico, como la gestión del consumo y del tipo de alimento ofrecido a los animales, así como la adición de lípidos, taninos, saponinas a la dieta,

lo cual está basado en los efectos mencionados anteriormente. Además, la adición de ionóforos a la dieta también ha sido investigada, ya que podrían tener un efecto moderado en la mitigación de CH<sub>4</sub> en rumiantes alimentados con dietas con alto contenido de granos o de granos y forraje (Gerber et al., 2013). Estas estrategias de mitigación de la producción de CH<sub>4</sub> y algunas otras fueron estudiadas en los trabajos de Almeida et al. (2021) y Arndt et al. (2022).

#### 1.1.3.2. Metodologías de medición de metano

Las emisiones de CH<sub>4</sub> pueden expresarse en términos absolutos o relativos a la cantidad de alimento consumido o de producto obtenido. De Haas et al. (2017) y Pickering et al. (2013) denominaron «producción» de CH<sub>4</sub> a las emisiones expresadas en términos absolutos por unidad de tiempo (L o g/día) o expresadas en relación con los insumos (L o g/kg de MS consumida) e «intensidad» de CH<sub>4</sub> a las emisiones expresadas en relación con los productos (L o g/kg de leche o de peso vivo o de carne). Según Beauchemin et al. (2008), las estimaciones de las emisiones de CH<sub>4</sub> de ganado en pastoreo deberían expresarse con base en el consumo de forraje o en la producción animal, dado que la madurez y composición de las pasturas es muy variable en el tiempo y espacio, lo que dificulta la comparación entre las distintas situaciones si se lo expresa en términos absolutos. Otra forma de expresar las emisiones de CH<sub>4</sub> es como producción de CH<sub>4</sub> residual (Velazco et al., 2016a), definida como la producción de CH<sub>4</sub> observada menos la predicha, considerando los factores que la afectan (por ejemplo, nivel de producción de leche o carne, peso corporal, consumo de alimento) (De Haas et al., 2017).

Según Johnson y Johnson (1995), la cuantificación de las emisiones de CH<sub>4</sub>, bajo el amplio rango de situaciones productivas en las que se encuentran podría lograrse utilizando diferentes técnicas que van desde muestreos de gas expirado por cortos períodos de tiempo hasta sistemas de cámara más sofisticados. Independientemente de la técnica utilizada, es necesario determinar las

concentraciones de CH<sub>4</sub>. De acuerdo a estos autores, la concentración de CH<sub>4</sub> puede ser medida usando espectroscopía infrarroja, cromatografía de gas, espectroscopía de masa y técnicas de diodo láser ajustadas.

Los muestreos de las emisiones gaseosas individuales o de grupos de individuos pueden lograrse mediante técnicas de encierre o métodos trazadores. Para animales individuales, las técnicas de respiración calorimétrica comprenden principalmente las cámaras para todo el animal, donde las emisiones de CH<sub>4</sub> se determinan midiendo el flujo de aire total a través del sistema y la diferencia en la concentración entre el aire inspirado y expirado (Johnson y Johnson, 1995). Más recientemente, otro sistema que ha estado disponible para medir emisiones de CH<sub>4</sub> es el GreenFeed. Consiste en capuchas localizadas en comederos donde se les suministra suplemento a los animales, y, cuando estos ingresan la cabeza para comer, se libera aire (20 a 40 L/segundo) que pasa por la nariz del animal y luego es colectado por un tubo. Posteriormente se analiza la composición de ese aire. Alemu et al. (2017) encontraron diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) en la estimación de la emisión de CH<sub>4</sub> entre la utilización del sistema GreenFeed y la cámara de respiración, pero sus resultados difieren de los de Velazco et al. (2016b), quienes no hallaron diferencias cuando utilizaron suplemento como atrayente, aunque sí las encontraron al usar agua como atrayente.

Dentro de los métodos con trazadores para mediciones de CH<sub>4</sub> individuales que reportan Johnson y Johnson (1995), el más usado es el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), un gas trazador inerte que es depositado en el rumen dentro un tubo permeable. Se le coloca al animal un bozal en la cabeza con un tubo de capilaridad conectado a un recipiente colector donde se almacenan las muestras. A medida que el vacío del recipiente colector se va disipando, ingresa una muestra constante de aire de alrededor de la nariz y boca del animal. La duración del muestreo se puede regular variando el largo y diámetro del tubo de capilaridad. Luego de colectar la muestra de aire, el recipiente es presurizado con nitrógeno y se determinan las concentraciones de CH<sub>4</sub> y SF<sub>6</sub> mediante cromatografía de gas. La tasa de emisión de

CH<sub>4</sub> se calcula con la ecuación:  $QCH_4 = QSF_6 \times [CH_4] / [SF_6]$ , donde QCH<sub>4</sub> es la tasa de emisión de CH<sub>4</sub> en L/hora, QSF<sub>6</sub> es la tasa de liberación conocida de SF<sub>6</sub> del tubo permeable, [CH<sub>4</sub>] y [SF<sub>6</sub>] son las concentraciones medidas en el recipiente colector.

Hristov et al. (2016), comparando este método de medición con GreenFeed en vacas holando en corrales cerrados, encontraron que el método de SF<sub>6</sub> produjo una mayor variabilidad en las emisiones de CH<sub>4</sub> que el GreenFeed. Por eso ellos concluyeron que la técnica del SF<sub>6</sub> debe usarse en lugares cerrados con buena ventilación o abiertos y que los resultados de esta técnica deben interpretarse con precaución cuando las concentraciones ambientales de CH<sub>4</sub> y SF<sub>6</sub> son altas. Vlaming (2008) reportó que cuando se utiliza la técnica del SF<sub>6</sub>, las variaciones en el tiempo de la producción de CH<sub>4</sub> medida en relación con el CMS (g CH<sub>4</sub>/kg CMS) entre animales (coeficiente de variación, CV = 7 a 18 %) y dentro de un mismo animal (CV = 7 a 10 %) son considerables y dificultan la identificación de animales con alta o baja emisión de CH<sub>4</sub> en relación con el CMS. Hristov et al. (2018) reportaron en su revisión que, al comparar las técnicas de SF<sub>6</sub> y Greenfeed con la cámara de respiración, hubo algunos estudios que encontraron una concordancia aceptable de los resultados, mientras que otros no. Sin embargo, al utilizar la técnica modificada del SF<sub>6</sub> que propusieron Deighton et al. (2014), no hubo diferencias significativas entre las emisiones de CH<sub>4</sub> en g/kg MS consumida medidas con la técnica del SF<sub>6</sub> en relación con la cámara de respiración, y se alcanzó un coeficiente de variación entre animales para esta variable que fue similar en ambas técnicas de medición (6,5 y 7,5 %, respectivamente).

#### 1.1.3.3. Asociación entre RFI y metano

Según Hegarty et al. (2007), la cantidad de alimento consumido es un determinante importante de la emisión de CH<sub>4</sub> diaria del ganado, y en todas las dietas, excepto en las de alta digestibilidad, hay una asociación positiva entre el consumo de energía y la producción de CH<sub>4</sub>, lo que se debe probablemente a que

un mayor consumo provee una mayor cantidad de sustrato para la fermentación ruminal y, por lo tanto, un mayor suministro de H<sub>2</sub> para los microorganismos metanogénicos. Buddle et al. (2011) también reportaron que el nivel de consumo es el factor más importante que influye sobre la producción de CH<sub>4</sub> entérico. En términos generales, las emisiones de CH<sub>4</sub> (g/día) están positivamente relacionadas con el nivel de consumo de alimento (Hegarty et al., 2007, Beauchemin y McGinn, 2006, Blaxter y Clapperton, 1965) ( $r_p = 0,82$ ;  $P < 0,05$ ; Beauchemin y McGinn, 2006).

Hegarty et al. (2007) sugieren que la selección de ganado por menor consumo de alimento sería una forma directa de reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> de los rumiantes, pero que podría estar asociada a disminuciones en el desempeño de los animales. Sin embargo, la diversidad genética entre los animales en los requerimientos de consumo de alimento para lograr tasas de GMD similares, que implica variabilidad en RFI, ha creado la oportunidad de seleccionar animales para disminuir el consumo de alimento del ganado sin reducir su tasa de crecimiento e, indirectamente, reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> (Hegarty et al., 2007).

Varios estudios han reportado menores emisiones de CH<sub>4</sub> en animales de bajo RFI en comparación con aquellos de alto RFI en diferentes categorías y tipo de alimentación, expresado tanto en g de CH<sub>4</sub>/día (Dini et al., 2019, Fitzsimons et al., 2013, Hegarty et al., 2007) como en g (o L) de CH<sub>4</sub>/kg de peso metabólico (Fitzsimons et al., 2013, Nkrumah et al., 2006). Estas reducciones de las emisiones en términos absolutos o por unidad de producto se han visto acompañadas por un incremento en las emisiones de CH<sub>4</sub> en relación con la cantidad de alimento consumido en los animales de alto RFI (Oliveira et al., 2016 (en pastoreo), Mercadante et al., 2015).

Por otro lado, hay autores que no han encontrado diferencias significativas entre las emisiones de CH<sub>4</sub> de animales de alto y bajo RFI (Alemu et al., 2017; Oliveira et al., 2016 (en feedlot)). En el cuadro 1.3 se presenta un resumen de los resultados encontrados por diferentes autores que estudiaron las emisiones de CH<sub>4</sub>

de animales de alto y bajo RFI medidos en diferentes categorías y con distintas dietas.

Finalmente, algunos autores han estudiado la correlación fenotípica entre RFI y las emisiones de CH<sub>4</sub> y han reportado diferentes resultados. Nkrumah et al. (2006) encontraron una correlación positiva moderada ( $r = 0,44$ ) entre RFI y la emisión de CH<sub>4</sub> diaria expresada en L/kg de peso metabólico, mientras que Velazco et al. (2016a) reportaron una correlación negativa moderada ( $r = -0,55$ ) entre el valor de cría de RFI posdestete medio de los padres y la emisión de CH<sub>4</sub> expresada en g/día medida en los hijos. Por otro lado, Fitzsimons et al. (2013) encontraron una tendencia de correlación positiva media a baja entre el RFI y la emisión de CH<sub>4</sub> expresado en g/día y g/kg de peso metabólico ( $r = 0,26$  y  $0,30$ , respectivamente), pero negativa media a baja entre RFI y emisión de CH<sub>4</sub> expresado como g/kg de MS consumida ( $r = -0,27$ ). A diferencia de los trabajos anteriores, Renand et al. (2019) no hallaron correlación entre el RFI y la emisión de CH<sub>4</sub> (g/día). Los resultados de estos trabajos se resumen en el cuadro 1.4.

Cuadro 1.3. Emisiones de metano entérico según nivel de RFI evaluadas en diferentes tipos raciales, categorías de bovinos y métodos de medición.

Autor	Raza	Categoría	N.º de animales	Método de medición	Característica	Valor			Valor de P	Error estándar	
						RFI alto	RFI medio	RFI bajo			
Nkrumah et al., 2006 (Canadá)	cruzas carniceras (continental × británica)	novillos	27	Cámara respiratoria de circuito abierto.	CH4 (L/kg PV metabólico)	1,71 ± 0,11 a	1,68 ± 0,14 a	1,28 ± 0,14 b	0,04		
Hegarty et al., 2007 (Australia)	angus	novillos en terminación	76	SF6	CH4 (g/día)	190,2		142,3	0,01		
					CH4 (g/kg GMD)	173,0		131,8	0,09		
					CH4 (g/kg CMS)	14,7		16,3	0,37		
Fitzsimons et al., 2013 (Irlanda)	simmental	vaquillonas	42	SF6	CH4 (g/día)	297 a		275 ab	260 b	0,04	
					CH4 (g/kg CMS)	36		36	38	0,52	
					CH4 (g/kg PV metabólico)	2,9 a		2,7 ab	2,5 b	0,01	
Mercadante et al., 2015 (Brasil)	nelore	toros y vaquillonas (237 kg PV)	46	SF6	CH4 (g/día)	144 ± 3,64		142 ± 3,81	0,691		
					CH4 (g/kg PV metabólico)	2,21 ± 0,05		2,16 ± 0,06	0,5		
					CH4 (g/kg CMS)	22,8 ± 0,56		25,1 ± 0,59	< 0,001		
					CH4 (g/kg GMD)	203 ± 7,65		191 ± 7,99	0,304		
Oliveira et al., 2016 (Brasil)	nelore	toros y vaquillonas	47	SF6 en feedlot	CH4 (g/día)	107		101	0,152	2,75	
					CH4 (kg/año)	39,1		37	0,152	1,01	
					CH4 (kg/PV)	0,3		0,28	0,053	0,007	
					CH4 (g/kg PV metabólico)	1,32		1,23	0,054	0,029	
					CH4 (g/kg CMS)	11,4		11,9	0,166	0,254	
					CH4 (g/kg FDN digestible)	22,5		23,4	0,187	0,492	
					CH4 (% Consumo EB)	2,71		2,85	0,12	0,062	
				SF6 en pastura	CH4 (g/día)	95,9		101	0,279	3,26	
					CH4 (kg/año)	35,0		36,9	0,279	1,19	
					CH4 (kg/PV)	0,26		0,27	0,627	0,008	
					CH4 (g/kg PV metabólico)	1,15		1,18	0,51	0,36	
					CH4 (g/kg CMS)	13,7		17,6	0,001	0,786	
					CH4 (g/kg FDN digestible)	22,9		29,1	0,001	1,28	
					CH4 (% Consumo EB)	3,71		4,85	< 0,001	0,206	
Alemu et al., 2017 (Canadá)	cruzas	vaquillonas	16	GreenFeed	CH4 (g/día)	222,2		202,5	0,02	7,6	
				Cámara de respiración	CH4 (g/día)	164,5		156,3	0,4	9,56	
				GreenFeed	CH4 (g/kg CMS)	28,5		27,7	0,25	0,65	
				Cámara de respiración	CH4 (g/kg CMS)	26,5		26,5	0,99	1,18	
				GreenFeed	CH4 (g/kg PV metabólico)	2,38		2,26	0,22	0,1	
				Cámara de respiración	CH4 (g/kg PV metabólico)	1,76		1,76	0,97	0,1	
Dini et al., 2019 (Uruguay)	hereford	novillos (340-350 kg PV)	16	SF6	CH4 (g/animal/día)	265		194	0,009	15,9	
					CH4 (g/kg MS consumida)	28,1		20,3	0,021	1,76	
					Ym (%) (methane yield)	9,17		6,72	0,027	0,58	
					CH4 (g/kg FDN consumido)	59,2		43	0,024	3,73	
					CH4 (g/kg FDA consumido)	92		65,4	0,015	5,69	

Cuadro 1.4. Correlaciones entre RFI y diferentes formas de expresión de emisión de metano entérico medidas en distintas razas y categorías bovinas.

Autor	Raza	Categoría	Alimentación	N.º de animales	Método de medición	Característica	Valor de correlación	Error estándar	Valor de P
Nkrumah et al., 2006 (Canadá)	cruzas carniceras (continental x británica)	novillos	RTM (9-13,5 % heno de alfalfa y 91-86,5 % concentrado; 2,9 Mcal EM/kgMS y 12,5-14 % PC). Disponibilidad: 2,5 veces mantenimiento.	27	Cámara respiratoria de circuito abierto.	Correlación fenotípica entre RFI y producción de CH4 diaria	0,44		< 0,05
Velazco et al., 2016a (Australia)	angus	novillos y vaquillonas	Pastura (Festuca, Dactylis, Paspalum y Phalaris), 11,2 a 16 % PC y 8,8 a 9,8 MJ EM/kgMS.	39	GreenFeed	Correlación fenotípica entre EPD RFI-PD medio de los padres y CH4 de los hijos en pastoreo	-0,55		< 0,01
Fitzsimons et al., 2013 (Irlanda)	simmental	vaquillonas	Ensilaje de raigrás perenne, <i>ad libitum</i>	42	SF6	Correlación fenotípica entre CH4 (g/día) y RFI	0,26		< 0,10
						Correlación fenotípica entre CH4 (g/kg CMS) y RFI	-0,27		0,08
						Correlación fenotípica entre CH4 (g/kg PV metabólico) y RFI	0,30		< 0,10
Renand et al., 2019 (Francia)	charolais	vaquillonas 2 años	Ensilaje de festuca <i>ad libitum</i> (1,44 Mcal E neta/kg MS; 11,1 % PC)	252	GreenFeed	Correlación fenotípica entre CH4 (g/día) y RFI	0,04		> 0,05
			Heno de pastura natural <i>ad libitum</i> (0,93 Mcal E neta/kgMS; 7,8 % PC) y 1 kg/día de concentrado (1,92 Mcal E neta/kgMS; 16,2 % PC)	74	GreenFeed	Correlación fenotípica entre CH4 (g/día) y RFI	0,08		> 0,05

En síntesis, los resultados de trabajos que han estudiado el RFI en diferentes etapas de la vida de distintas categorías de bovinos encontraron que cuanto más cercanas en el tiempo son las mediciones de RFI, o si el RFI es evaluado con dietas similares en las distintas etapas, la correlación entre el RFI medido en diferentes momentos de la vida de los animales tiende a ser de media a alta. La magnitud de esta asociación disminuye cuando se miden con dietas muy distintas o se comparan momentos más alejados en la vida de los animales (Cassady et al., 2016, McGee et al., 2014, Black et al., 2013, Trujillo et al., 2013, Archer et al., 2002, Arthur et al., 2001). Con base en estos resultados, podría esperarse que animales que son eficientes (bajo RFI) durante la recría en condiciones de confinamiento, con dietas menos concentradas, sean también eficientes (bajo RFI) durante el engorde en confinamiento, con dietas más concentradas. En el contexto nacional es relevante investigar esta asociación, dado que la selección genética está basada en mediciones de RFI en la recría y así se podría explorar su repercusión en el engorde en confinamiento.

La mejora del RFI ha sido postulada como una posible herramienta de mitigación de las emisiones de CH<sub>4</sub> (Basarab et al., 2013, Hegarty et al., 2007). Sin embargo, al estudiar la relación entre el RFI y las emisiones de CH<sub>4</sub>, algunos trabajos han encontrado que los animales de bajo RFI emiten menos CH<sub>4</sub> en g/día o g/kg peso metabólico (Dini et al., 2019, Fitzsimons et al., 2013, Hegarty et al., 2007, Nkrumah et al., 2006), mientras que otros han hallado que los animales de bajo RFI emiten más CH<sub>4</sub> en g/kg de MS consumida (Oliveira et al., 2016, Mercadante et al., 2015) o no han encontrado diferencias entre las emisiones de animales de alto y bajo RFI (Alemu et al., 2017, Oliveira et al., 2016). En este sentido, los resultados de trabajos que han estudiado la asociación entre RFI y emisiones de CH<sub>4</sub> tampoco son tan claros: algunos reportaron correlaciones positivas (Nkrumah et al., 2006) y otros negativas (Velazco et al., 2016a), o no encontraron correlaciones (Renand et al., 2019, Fitzsimons et al., 2013) entre estas características. Dados los resultados contradictorios encontrados al estudiar la relación entre RFI y emisiones de CH<sub>4</sub>, es

necesario realizar más estudios sobre la asociación entre ambos caracteres y la magnitud de la asociación para conocer el efecto que podría tener la selección de animales más eficientes en las emisiones de CH<sub>4</sub>.

### 1.3. HIPÓTESIS

1) Los novillos de alta eficiencia (bajo RFI) durante la recría en confinamiento tienen también una alta eficiencia (bajo RFI) en el engorde en confinamiento.

2) Los novillos de alta eficiencia (bajo RFI) emiten menos metano entérico que los novillos de baja eficiencia (alto RFI) durante su engorde en confinamiento.

### 1.4. OBJETIVO GENERAL

Contribuir al entendimiento del desempeño de los animales en cuanto a su eficiencia de conversión del alimento en diferentes etapas de su vida y su asociación con las emisiones de metano al ambiente.

### 1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Ajustar la ecuación de cálculo de RFI para novillos en condiciones de engorde.
- Caracterizar el crecimiento y terminación de animales y su asociación con eficiencia de conversión en la recría y engorde.
- Investigar la asociación entre RFI medido en la recría y RFI medido en el engorde de novillos hereford en confinamiento.
- Cuantificar la asociación entre RFI y emisión de metano entérico medidos en el engorde de novillos hereford en confinamiento.

## 2. ESTUDIO DE LA ASOCIACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CONVERSIÓN Y DESEMPEÑO PRODUCTIVO EN LA RECRÍA Y EL ENGORDE DE NOVILLOS HEREFORD

### 2.1. RESUMEN

La mejora de la eficiencia de conversión del alimento, por menores consumos de alimento sin afectar el desempeño productivo, tiene impacto económico en la producción, dada la importancia de los costos de alimentación. El consumo residual de alimento (*residual feed intake*, RFI) medido en la recría es un criterio de selección con este fin, pero se conoce poco sobre su asociación con otras características en el engorde. Los objetivos de este estudio fueron evaluar posibles mejoras a la estimación del RFI en el engorde de novillos hereford, analizar la asociación entre RFI en la recría (RFI-R) y el engorde (RFI-E) de los novillos y caracterizar su desempeño productivo en ambas etapas. Se evaluaron 95 novillos hereford en la recría y el engorde en confinamiento en la Central de Prueba de Kiyú, Uruguay. Se midieron el consumo diario individual de materia seca (CMS), la ganancia diaria de peso, el peso metabólico promedio, el área del ojo de bife, el espesor de grasa dorsal (EGD) y el espesor de grasa de cadera al inicio, mitad y final de los períodos de evaluación. A partir de estos se calcularon RFI-R y RFI-E. La inclusión de EGD aumentó el ajuste del modelo de RFI-E respecto al modelo original. La correlación entre RFI-R y RFI-E fue 0,71. El RFI-R tuvo correlaciones de 0,79 y 0,49 con el CMS de la recría y engorde, respectivamente, mientras que para RFI-E fueron 0,56 y 0,63, respectivamente. Tanto RFI-R como RFI-E fueron independientes de las variables de desempeño productivo. Los novillos más eficientes en el engorde (RFI bajo) habían sido también más eficientes en la recría, básicamente por los menores CMS a igual desempeño, con consumos residuales de 1,77 y 2,15 kgMS/día menores que los de RFI alto en la recría y engorde respectivamente.

Palabras clave: consumo residual de alimento, confinamiento, novillos, recría, engorde, emisiones de metano.

## 2.2. SUMMARY

Improving feed efficiency by reducing feed intake without affecting performance has an economic impact on production due to the high importance of feed costs. With this aim, residual feed intake (RFI) measured in the growing phase is used as selection criteria, but more knowledge is needed about its association with the performance at the fattening phase. The aim of this study was to evaluate possible improvements to the estimation of RFI at fattening in Hereford steers, to analyze the association between RFI at growing (G-RFI) and fattening (F-RFI), and to characterize the performances in both phases. Ninety-five Hereford steers were evaluated at growing and fattening in confinement conditions, at the Kiyú Test Center, Uruguay. Individual daily dry matter intake (DMI), average daily gain, average metabolic body weight, eye muscle area, rib fat depth (RFD) and P8 fat depth at the beginning, middle and end of each evaluation period were recorded and used for the calculation of G-RFI and F-RFI. Including RFD to the original model improved the F-RFI model adjustment. The correlation between G-RFI and F-RFI was 0.71. The correlations between G-RFI and DMI in the growing and fattening phases were 0.79 and 0.49, respectively, whereas for F-RFI were 0.56 and 0.63, respectively. Both G-RFI and F-RFI were independent of productive performance variables. The most efficient steers in the fattening phase (low RFI) had also been more efficient in the growing phase, basically because of lower DMI at the same performance, with residual intakes of 1.77 and 2.15 kgDM/day lower than high RFI steers at the growing and fattening phases, respectively.

Keywords: residual feed intake, feedlot, steers, growing, fattening

### 2.3. INTRODUCCIÓN

Debido al alto impacto que tiene el costo de los alimentos en los sistemas de producción, es importante evaluar la eficiencia de conversión del alimento individual de los animales, ya que la inclusión de su mejora dentro de los objetivos productivos podría reducir el consumo de alimento manteniendo el mismo nivel de producción. Existe evidencia de que la eficiencia de conversión, medida como consumo residual del alimento (RFI), permite reducir el consumo de materia seca (lo que disminuiría los costos de alimentación) sin afectar el desempeño productivo (Hegarty et al., 2007; Nkrumah et al., 2006).

Aún son pocos los programas de mejora genética que incluyen al RFI debido a que la medición del consumo individual de alimento para su estimación es compleja. El criterio de selección utilizado actualmente es el RFI medido en la recría (Ravagnolo et al., 2018). Pero todavía son escasas las estimaciones de las asociaciones con otras características productivas de importancia económica, entre ellas, el desempeño de los animales en el engorde.

En esta sección se aborda la primera hipótesis planteada en esta tesis: los novillos de alta eficiencia (bajo RFI) durante la recría en confinamiento tienen también una alta eficiencia (bajo RFI) en el engorde en confinamiento. Los objetivos específicos de este estudio fueron evaluar posibles mejoras a la estimación del RFI en el engorde de novillos hereford, analizar la asociación entre RFI en la recría y el engorde de estos novillos y caracterizar su desempeño productivo en ambas fases. Para ello se determinaron las asociaciones de las características de consumo de alimento, crecimiento y composición corporal entre las dos fases y se comparó el desempeño según el nivel de eficiencia de conversión. Con base en la información disponible, se evaluaron potenciales mejoras a la estimación del RFI en el engorde.

## 2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en la Central de Prueba de Kiyú de la Sociedad de Criadores de Hereford del Uruguay, departamento de San José, Uruguay, desde octubre del 2017 hasta mayo de 2019. Contó con dos etapas principales: evaluación del RFI en la recría y evaluación del RFI durante el engorde.

En el primer año se utilizaron 28 novillos de raza hereford de 408 días de edad (desvío estándar = 12 días) y 272 kg de peso vivo (desvío estándar = 35 kg) al inicio del experimento. En el segundo año se utilizaron 67 novillos de raza hereford de 376 días de edad (desvío estándar = 17 días) y 233 kg de peso vivo (desvío estándar = 31 kg) al inicio del experimento. Estos animales provinieron de la Unidad Experimental de Glencoe (INIA). Previo al ingreso de los animales al corral, todos fueron tratados contra clostridiosis, parásitos gastrointestinales, fasciola hepática, enfermedades respiratorias y queratoconjuntivitis.

### 2.4.1. Evaluación de la eficiencia de conversión

Las evaluaciones de la eficiencia de conversión se realizaron con base en las mediciones de consumo individual en comederos automáticos (Model 6000 GrowSafe Systems Ltd., Airdrie AB, Canadá). Estos comederos están instalados en corrales de 60 m de largo × 40 m de frente, donde los animales son confinados con acceso a agua *ad libitum* de un bebedero de hormigón de 2,50 m × 0,85 m × 0,55 m. Durante los meses de verano también tuvieron acceso a sombra artificial de sombrite doble de 27 m × 8 m.

Cada corral contó con 8 comederos individuales con capacidad para que cada comedero alimentara diariamente a 12 terneros o 10 novillos en engorde. Los animales fueron alimentados con una ración totalmente mezclada (RTM) ofrecida *ad libitum* en dos entregas diarias, la primera a las 07:30 horas y la segunda a las 16:00 horas aproximadamente. Cada semana se tomaron muestras de la RTM y de

sus componentes, las que se acumularon durante cuatro semanas y se mandaron a analizar como muestras compuestas de ese período. Se realizaron tres evaluaciones de la calidad de la dieta durante cada prueba. Además, se hicieron monitoreos semanales del contenido de materia seca de la RTM y de cada componente. Los animales fueron pesados cada 14 días a primera hora de la mañana y sin desbaste. Se realizó también un seguimiento de la composición de crecimiento a través de medidas de ultrasonido llevadas a cabo al inicio, mitad y final de las pruebas de eficiencia de conversión.

#### 2.4.1.1. Recría

Esta fase se llevó adelante según el protocolo internacional definido para el registro de información para la evaluación genética de RFI en la raza hereford y para la formación de la población de entrenamiento para selección genómica (BIF, 2016), de las cuales participaron estos animales. Estos novillos no pudieron ser evaluados inmediatamente después de su destete, durante su primer invierno, porque en ese momento las instalaciones estuvieron ocupadas por toros de la misma edad para la evaluación genética de toros en el posdestete. Previo al inicio de la evaluación de eficiencia, los novillos tuvieron 14 días de acostumbramiento a una dieta de confinamiento porque provenían de pastoreo de campo natural, y 14 días más de acostumbramiento a la dieta del experimento y a los comederos automáticos individuales. En el cuadro 2.1 se muestra la composición de las dietas utilizadas durante el período de evaluación de eficiencia de conversión del alimento en cada año. En el primer año la evaluación de eficiencia se realizó desde el 07/11/2017 al 17/01/2018, mientras que en el segundo año se llevó a cabo desde el 10/10/2018 hasta el 20/12/2018.

#### 2.4.1.2. Engorde

Previo al inicio del período de evaluación de eficiencia en engorde, se realizó una etapa de transición con dos dietas de adaptación a la dieta de engorde (dieta de inicio durante 10 días y dieta de transición durante 10 días más). La composición de estas dietas se observa en el cuadro 2.2. Luego de las dietas de transición se suministró la dieta de la prueba de engorde durante 13 días antes de comenzar con la evaluación de la eficiencia en el engorde. Esta evaluación se realizó desde el 20/02/2018 hasta el 03/05/2018 en el primer año y desde el 23/01/2019 hasta el 10/04/2019 en el segundo año de evaluación. La composición de la dieta ofrecida a los novillos durante la evaluación de eficiencia en engorde se observa en el cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Composición de las dietas de evaluación de eficiencia de conversión del alimento en recría y engorde de novillos hereford (en base seca).

	Pruebas recría		Pruebas engorde	
	Año 1	Año 2	Año 1	Año 2
Componentes (%):				
Ensilaje planta entera de sorgo	38,11	45,60	10,15	13,00
Grano de maíz quebrado	45,71	41,42	81,11	78,19
Núcleo*	15,36	12,98	8,75	8,81
Harina de soja	0,85	0,00	0,00	0,00
Composición química:				
MS (%)	48,84	37,00	66,01	63,43
PC (%)	12,38	13,82	12,89	12,36
FDN (%)	48,02	48,76	29,75	28,33
FDA (%)	31,48	31,97	15,14	16,00
EM (Mcal/kg MS)	2,579	2,531	3,014	3,014

\*Componentes: expeler de girasol, harina de soja, urea, carbonato de calcio, sal, entre otros.

Cuadro 2.2. Composición de las dietas de transición entre la recría y engorde de novillos hereford (en base seca).

	Dieta inicio engorde		Dieta transición engorde	
	Año 1	Año 2	Año 1	Año 2
Ensilaje planta entera de sorgo (%)	47,35	44,61	26,19	24,87
Grano de maíz quebrado	43,25	42,98	65,06	64,89
Núcleo*	9,40	12,41	8,75	10,25

\*Componentes: expeler de girasol, harina de soja, urea, carbonato de calcio, sal, entre otros.

#### 2.4.2. Variables medidas

Las variables medidas en los animales fueron:

- Consumo de alimento diario: medido mediante el sistema GrowSafe; cada vez que un animal metía la cabeza en el comedero, el sistema registraba el chip de identificación por radiofrecuencia del animal y le asignaba a él la diferencia de peso detectada por la balanza del comedero para obtener al final del día el consumo total diario de cada animal. Esta variable medida en base fresca fue ajustada por el porcentaje de materia seca de la dieta.

- Peso vivo: registrado con balanza electrónica cada 14 días, sin ayuno previo, antes del suministro de alimento de la mañana. Además, el peso vivo inicial y final se registró como la media de dos pesos tomados en días consecutivos al inicio y fin del período estudiado, sin ayuno previo (requisito para la evaluación genética, BIF, 2016).

- Composición del crecimiento a través de las mediciones de área del ojo de bife (AOB), el espesor de grasa dorsal (EGD) y el espesor de grasa de cadera en el cuadril (P8) al inicio, mitad y final de los períodos de evaluación: mediciones realizadas con un ecógrafo ALOKA® modelo SSD-500 con un transductor lineal y una

frecuencia de 3,5 MHz. Se tomó una imagen para AOB y EGD entre la 12.<sup>a</sup> y 13.<sup>a</sup> costilla de cada animal y una imagen para espesor de grasa en la cadera en el cuadril (P8). Estas imágenes fueron interpretadas por técnicos certificados de INIA (Uruguay).

— Características de comportamiento ingestivo: registradas simultáneamente al consumo individual de alimento por los comederos automáticos del sistema GrowSafe. En el cuadro 2.3 se detallan las características de comportamiento ingestivo estudiadas.

Cuadro 2.3. Características de comportamiento ingestivo.

Característica	Abreviación	Unidad
Tiempo de comida diario	TCD	minuto
Tiempo de cabeza gacha diario	TCGD	minuto
Tiempo de cada evento de cabeza gacha	TCG	minuto
Número de comidas por día	NCD	
Consumo de materia seca por comida	CMSC	kg MS
Tasa de consumo por evento de comida	TasaCC	kg MS/minuto
Tasa de consumo por evento cabeza gacha	TasaCCG	kg MS/minuto

La comida de un animal se define como el evento donde los comederos identifican el chip por radiofrecuencia del animal, sin que este se ausente de cualquiera de los comederos por más de 300 segundos (5 minutos), y puede estar conformada por una o varias visitas en varios comederos diferentes. El evento de cabeza gacha es el evento donde uno de los comederos está identificando el chip por radiofrecuencia del animal mientras este tiene la cabeza metida dentro del comedero.

### 2.4.3. Análisis estadístico

#### 2.4.3.1. Estimación de RFI

##### RFI en recría

La estimación del RFI en la recría se basó en la ecuación propuesta por Basarab et al. (2003) y utilizada actualmente en la evaluación genética de hereford (Ravagnolo et al., 2018):

$$\text{CMS real} = \text{Prueba} * \text{corral} + \beta_0 + \beta_1 \text{GMD} + \beta_2 \text{PMM} + \beta_3 \text{EGD} + e$$

$$\text{RFI} = e = \text{CMS real} - \text{CMS estimado}$$

Donde *CMSreal* es la variable aleatoria observada (CMS), *Prueba* es el período de evaluación, *Corral* corresponde a uno de los dos corrales disponibles,  $\beta_0$  es el intercepto,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_3$  son los coeficientes de regresión de los parámetros, *GMD* es la ganancia media diaria de cada animal en el período de prueba, *PMM* es el peso metabólico medio de cada animal durante la prueba, *EGD* es el espesor de grasa dorsal de cada novillo al final de la prueba y *e* es el residuo.

##### RFI en engorde

Como parte de esta tesis se evaluaron modelos alternativos para la estimación del RFI. El modelo base fue el originalmente propuesto por Koch et al. (1963) que incluye las variables ganancia media diaria (GMD) y peso metabólico medio (PMM) como regresores.

Tomando como referencia este modelo, se analizó la inclusión de diferentes variables relativas a la composición corporal medidas por ultrasonido (AOB, EGD y P8) al inicio, mitad y final de prueba. Se consideraron modelos de regresión múltiple que incluyeron diferentes combinaciones de variables relativas a la estimación de la composición corporal, que se adicionaron al modelo base propuesto por Koch et al. (1963).

En primera instancia se evaluó la incidencia y nivel de significación de las medidas realizadas al final de la prueba y combinaciones de estas. Además, se analizó la incidencia de reemplazar medidas realizadas al final de la prueba de eficiencia con aquellas realizadas antes (al inicio y mitad de la prueba). Se tomaron en cuenta el nivel de significancia de los efectos en los modelos de regresión múltiple en la predicción de consumo y el nivel de ajuste de los modelos y utilizando como criterios el R<sup>2</sup>, R<sup>2</sup> ajustado y AIC.

El modelo utilizado en este estudio para la estimación del RFI en el engorde fue idéntico al que se utiliza para la recría en el sistema de medición de eficiencia de conversión que genera los fenotipos que se integran a la evaluación genética para esta característica en la raza hereford (Ravagnolo et al., 2018).

#### 2.4.3.2. Caracterización del desempeño de crecimiento y composición

Se analizaron las diferencias de desempeño de los animales según nivel de RFI con base en la estimación de las medias por mínimos cuadrados de animales de baja, media y alta eficiencia durante el engorde, utilizando el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \text{año}_i + \text{RFI}_j + \text{año} \times \text{RFI}_{ij} + e_{ijk}$$

Donde  $Y$  es la variable aleatoria observada,  $\text{año}_i$  es el año de evaluación ( $i= 1, 2$ ),  $\text{RFI}_j$  es el grupo de RFI del engorde ( $j=$  alto, medio y bajo),  $\text{año} \times \text{RFI}_{ij}$  es la interacción entre los efectos fijos y  $e_{ijk}$  es el residuo.

A través del análisis descriptivo (media, desvío estándar) de los resultados de RFI estimado para cada animal, se clasificaron en los tres grupos de RFI considerados en este estudio: alto ( $> 0,5$  desvíos estándar de la media), medio (entre  $\pm 0,5$  desvíos estándar) y bajo ( $< 0,5$  desvíos estándar).

#### 2.4.3.3. Asociación entre la eficiencia de conversión en diferentes fases

Se calculó la correlación entre el RFI de la recría y del engorde de los novillos, así como las existentes entre las variables que hacen a la definición del RFI. Esto incluye consumo de alimento en base seca (CMS), ganancia de peso media diaria (GMD), peso metabólico medio (PMM), deposición de grasa (EGD) y desarrollo muscular (AOB).

#### 2.4.3.4. Caracterización del comportamiento ingestivo de los novillos en recría y engorde

Las variables de comportamiento ingestivo se analizaron usando un modelo lineal general con los efectos fijos principales del grupo de RFI y del año, y la interacción entre los dos efectos fijos principales:

$$Y_{ij} = \mu + RFI_i + A_j + RFI_i \times A_j + e_{ijk}$$

Donde  $Y$  son las variables de comportamiento descritas en el cuadro 2.3,  $RFI$  es el grupo de  $RFI$  ( $RFI_i$  = alto, medio y bajo),  $A$  es el año de evaluación ( $A_j$  = 1 y 2),  $RFI \times A$  es la interacción entre el nivel de  $RFI$  y el año, y  $e$  es el residuo ( $e_{ijk}$ ).

Los análisis estadísticos se realizaron con la versión 9.0 del programa SAS (SAS Institute, Inc., Cary, NC, EE. UU.).

### 2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cuadro 2.4 se presenta la descripción estadística de las características medidas durante los dos años de evaluación del RFI en la recría y el engorde de los novillos.

Cuadro 2.4. Medias, desvíos estándar, mínimos, máximos y coeficientes de variación de las variables medidas durante la evaluación del RFI en la recría y el engorde de novillos hereford.

	n	Media	Desvío estándar	Mínimo	Máximo	CV <sup>9</sup> (%)
RFI <sup>1</sup> recría (kg MS <sup>2</sup> /día)	91	0,000	1,037	-2,738	2,151	
CMS <sup>3</sup> recría (kg MS/día)	91	9,157	1,310	6,029	12,406	14,31
Edad inicio recría (días)	91	385	22	338	435	5,83
Peso inicial recría (kg)	91	246	35	177	336	14,44
GMD <sup>4</sup> recría (kg/día)	91	1,513	0,160	1,095	1,957	10,55
Peso promedio recría (kg)	91	301	37	226	387	12,32
PMM <sup>5</sup> recría (kg)	91	71,9	6,7	58,2	86,8	9,33
AOB <sup>6</sup> final recría (cm <sup>2</sup> )	91	40,33	5,03	27,30	52,40	12,47
EGD <sup>7</sup> final recría (mm)	91	3,8	1,2	2,3	8,2	30,39
P8 <sup>8</sup> final recría (mm)	91	4,4	1,4	2,3	8,6	32,19
RFI engorde (kg MS/día)	91	0,000	0,921	-3,575	2,108	
CMS engorde (kg MS/día)	91	11,576	1,466	7,687	15,031	12,66
Edad inicio engorde (días)	91	490	22	443	539	4,52
Peso inicial engorde (kg)	91	401	42	315	496	10,52
GMD engorde (kg/día)	91	1,481	0,152	1,169	1,909	10,30
Peso promedio engorde (kg)	91	463	43	373	566	9,21
PMM engorde (kg)	91	98,8	6,9	83,9	114,8	7,02
AOB final engorde (cm <sup>2</sup> )	91	54,63	5,75	38,80	72,80	10,53
EGD final engorde (mm)	91	11,0	2,6	6,1	20,9	23,90
P8 final engorde (mm)	91	11,0	2,8	5,9	20,7	25,05

<sup>1</sup> Consumo residual de alimento (*residual feed intake*)

<sup>2</sup> Materia seca

<sup>3</sup> Consumo de materia seca de alimento

<sup>4</sup> Ganancia de peso media diaria

<sup>5</sup> Peso metabólico medio

<sup>6</sup> Área del ojo de bife

<sup>7</sup> Espesor de grasa dorsal

<sup>8</sup> Espesor de grasa de cadera a nivel del cuadril

<sup>9</sup> Coeficiente de variación

### 2.5.1. Evaluación del modelo de RFI en engorde

Como paso preliminar en la consideración de las posibles mejoras que se podrían hacer en el modelo de cálculo del RFI para la etapa del engorde, se evaluaron las correlaciones entre las variables usadas en el modelo original de cálculo de RFI propuesto por Koch et al. (1963) (ganancia de peso y peso metabólico medio) y las variables relativas a la composición corporal de los novillos medidas por ultrasonido al inicio, mitad y final del período de evaluación de RFI (AOB, EGD y P8). En el cuadro 2.5 se presentan los coeficientes de correlación obtenidos.

Cuadro 2.5. Correlaciones entre consumo de materia seca (CMS), ganancia media diaria (GMD), peso metabólico medio (PMM), área del ojo de bife al inicio, mitad y final (AOB-i, AOB-m y AOB-f), espesor de grasa dorsal al inicio, mitad y final (EGD-i, EGD-m y EGD-f), y espesor de grasa de cadera en el cuadril al inicio, mitad y final (P8-i, P8-m y P8-f) del período de evaluación de RFI durante el engorde de novillos Hereford.

	CMS engorde	GMD engorde	PMM engorde	AOB-i engorde	AOB-m engorde	AOB-f engorde	EGD-i engorde	EGD-m engorde	EGD-f engorde	P8-i engorde	P8-m engorde	P8-f engorde
CMS engorde	1	0,490**	0,136	-0,012	-0,011	0,055	0,065	0,097	0,195 <sup>+</sup>	0,243*	0,309**	0,234*
GMD engorde		1	0,365**	0,089	0,153	0,214*	-0,080	-0,120	-0,105	-0,029	0,025	0,041
PMM engorde			1	0,728**	0,683**	0,613**	0,450**	0,363**	0,260*	0,395**	0,125	0,136
AOB-i engorde				1	0,903**	0,815**	0,438**	0,351**	0,213*	0,298**	0,011	0,046
AOB-m engorde					1	0,861**	0,355**	0,285**	0,154	0,194 <sup>+</sup>	-0,074	-0,064
AOB-f engorde						1	0,312**	0,264*	0,096	0,163	-0,027	-0,058
EGD-i engorde							1	0,838**	0,787**	0,649**	0,384**	0,377**
EGD-m engorde								1	0,859**	0,622**	0,476**	0,472**
EGD-f engorde									1	0,648**	0,560**	0,556**
P8-i engorde										1	0,726**	0,670**
P8-m engorde											1	0,863**
P8-f engorde												1

\*\* P ≤ 0,01; \* P ≤ 0,05; <sup>+</sup> P ≤ 0,1; los demás no fueron significativos, P > 0,1.

Como se muestra en el cuadro 2.5 se encontró que el CMS durante el engorde tuvo una correlación positiva moderada con la GMD del engorde ( $P < 0,01$ ) y una correlación media a baja con el P8 inicial, medio y final del engorde ( $P < 0,05$ ). La GMD presentó una correlación positiva media a baja con el PMM y con el AOB medido al final del engorde ( $P < 0,05$ ), mientras que el PMM tuvo una correlación positiva alta con el AOB medido al inicio, mitad y final del engorde ( $P < 0,01$ ) y una correlación positiva media a baja con el EGD inicial, medio y final del engorde y con el P8 inicial del engorde ( $P < 0,05$ ). Las AOB inicial, media y final del engorde tuvieron una correlación positiva alta entre sí y positiva media a baja con el EGD inicial y medio, correlacionándose además el AOB inicial con el EGD final y con P8 inicial ( $P < 0,05$ ). Finalmente, las coberturas de grasa subcutáneas (EGD y P8 iniciales, medias y finales del engorde) tuvieron correlaciones positivas altas y moderadas entre sí ( $P < 0,01$ ). Estas correlaciones en general fueron menores a las correlaciones fenotípicas encontradas por Robinson y Oddy (2004) en novillos y vaquillonas de razas carniceras engordados a corral. Johnston et al. (2003), estudiando ganado de razas templadas y razas adaptadas al trópico terminados en pasturas o feedlot, encontraron correlaciones fenotípicas y genéticas entre EGD y P8 mayores a las del presente trabajo, pero reportaron correlaciones más bajas entre AOB y las coberturas de grasa subcutánea.

#### 2.5.1.1. Comparación de modelos de estimación de RFI de engorde

El RFI es definido como la diferencia entre el consumo real y el predicho, expresada como materia seca o energía, siendo el predicho basado en el peso y el crecimiento de los animales en un período determinado de acuerdo con la propuesta de Koch et al. (1963). Dado que el RFI es el residual de un modelo de regresión múltiple, es independiente de las variables regresoras incluidas en el modelo.

Otras características relacionadas con la utilización de la energía, tales como las relacionadas con composición corporal, pueden ser incluidas de manera que el RFI estimado sea también independiente de dichas características (Kenny et al., 2018). La inclusión de espesor de grasa subcutánea medido por ultrasonido fue propuesta por Basarab et al. (2003; 2011), de manera que el RFI estimado fuera también independiente del nivel de engrasamiento. Esto permite minimizar o eliminar potenciales efectos desfavorables de la selección genética por RFI en la calidad de las canales (menor engrasamiento) y desempeño reproductivo en hembras que esté influenciado por los depósitos de grasa (Basarab et al., 2003, 2011). El RFI de la recría estimado con base en el modelo propuesto por Basarab et al. (2003, 2011) es el fenotipo utilizado en la evaluación genética de la raza hereford de Uruguay (Ravagnolo et al., 2018).

En el cuadro 2.6 se presentan los coeficientes de regresión parcial y nivel de ajustes de diferentes modelos utilizados para la estimación de RFI en el engorde. Los modelos que se presentan incluyen la propuesta original de Koch et al. (1963) (modelo 1) y los modelos resultantes de la adición al modelo original de las variables indicadoras de la composición corporal (modelos 2 al 11).

Cuadro 2.6. Coeficientes de regresión parcial estimados para cada variable de los modelos probados para el cálculo del RFI en el engorde de novillos hereford, y el nivel de ajuste de los distintos modelos.

Efectos	Modelos										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Año	2,11**	2,00**	2,11**	2,08**	2,03**	2,11**	2,12**	2,02**	2,06**	2,11**	1,97**
GMD	2,57**	3,12**	2,56**	2,62**	2,92**	3,03**	2,63**	3,21**	3,05**	2,57**	2,77**
PMM	0,06**	0,05**	0,07**	0,06**	0,05*	0,04*	0,06*	0,03+	0,05*	0,06**	0,05**
EGD-i						0,15*					
EGD-m									0,1+		
EGD-f		0,11**			0,06ns						
AOB-i							0,01ns				
AOB-m										0,00ns	
AOB-f			-0,01ns		0,00ns						
P8-i								0,22**			
P8-m											0,13**
P8-f				0,11**	0,08+						
Ajuste modelo											
R <sup>2</sup>	0,573	0,605	0,574	0,612	0,619	0,594	0,574	0,638	0,591	0,573	0,615
R <sup>2</sup> ajustado	0,559	0,587	0,555	0,594	0,592	0,575	0,554	0,621	0,572	0,554	0,597
AIC	-0,936	-5,968	0,839	-7,656	-5,250	-3,499	0,958	-13,945	-2,701	1,064	-8,267

\*\* P ≤ 0,01; \* P ≤ 0,05; + P ≤ 0,1;

ns > 0,1

El efecto del AOB-f no fue significativo ( $P > 0,05$ ) (modelo 3), como tampoco lo fueron las mediciones de AOB al inicio o a mitad de la prueba de engorde. Por otro lado, la inclusión del EGD y P8, medidas indicadoras del nivel de engrasamiento, fueron significativas ( $P > 0,05$ ; modelos 2 y 4) y resultaron en un mayor ajuste del modelo medido tanto por  $R^2$  ajustado como por AIC, en comparación con el modelo 1.

La inclusión de más de una variable de composición corporal no mejoró los indicadores de ajuste (ejemplo, modelo 5). Se evaluaron también los modelos resultantes de incorporar las medidas de AOB, EGD y P8 al inicio o a mitad de prueba. Los resultados siguieron la misma tendencia que los ya descritos, con la excepción del modelo 6, en el cual P8-i es significativo ( $P < 0,05$ ) y el modelo alcanza el mayor ajuste ( $R^2$  ajustado = 0,63), pero PMM pasa a ser no significativo ( $P > 0,05$ ).

El valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de estos modelos de regresión indica la contribución de los diferentes procesos considerados en relación con la variación del CMS y, por lo tanto, también del RFI estimado a partir de estos. Los valores de  $R^2$  y  $R^2$  ajustados del modelo base fueron similares (de 0,57 y 0,56, respectivamente) en este estudio. Estos niveles de ajuste estarían dentro de los rangos reportados en la literatura, cuyos valores promedio, según la revisión realizada por Kenny et al. (2018), fueron de 0,60 y 0,70, para dietas con forraje y con base en concentrados de alta energía, respectivamente.

La incorporación de la composición corporal mejora el ajuste del modelo en el caso de las medidas asociadas con el nivel de engrasamiento. Pero esta mejora es marginal, con un incremento del  $R^2$  ajustado de 0,04 al comparar los modelos 2 y 4 con el modelo base. Resultados similares han sido encontrados en otros estudios con incrementos que varían entre 0,01 y 0,04 (Kenny et al., 2018). En el caso de las estimaciones de RFI realizadas en Uruguay para la recría de toritos utilizando el equivalente al modelo 2 de este estudio, el  $R^2$  ajustado fue de 0,80 con base en 780 toritos evaluados desde 2014 a 2018 (Pravia et al., 2022).

Si bien algunos estudios indican que el EGD es la medida más precisa para la determinación de la composición corporal (Realini et al., 2001), la importancia relativa de EGD y P8 en la predicción de la composición corporal puede estar influenciada por la asociación entre la deposición de grasa en ambas regiones. Williams et al. (1997) y Silva et al. (2012) encontraron que P8 fue significativa en la predicción de la composición de la canal, particularmente en *Bos indicus*, mientras que no tuvo valor predictivo en las estimaciones investigadas por Realini et al. (2001) en novillos hereford, siendo EGD significativa.

En el cuadro 2.7 se presentan los coeficientes de correlación entre los RFI calculados con los modelos 1, 2 y 4, así como los coeficientes de regresión resultantes de cada una de las comparaciones. El ranking de los animales por cualquiera de estos modelos es muy similar, con un ajuste parecido entre los valores indicados por los interceptos de cero y coeficientes de regresión lineal de uno o muy próximos a la unidad.

Cuadro 2.7. Comparación de las estimaciones de RFI con base en modelo base (modelo 1) y a la inclusión de EGD (modelo 2) o P8 (modelo 4), medidos al final de la prueba de engorde.

X	y	R	Intercepto	Pendiente
Modelo 1	Modelo 2	0,96	0,00	0,97
Modelo 1	Modelo 4	0,95	0,00	1,00
Modelo 2	Modelo 4	0,96	0,00	1,00

R es el coeficiente de correlación

En síntesis, se ha encontrado que la adición de las mediciones por ultrasonido de los espesores de grasa subcutánea incrementa el grado de ajuste del modelo inicialmente propuesto para la estimación de RFI por Koch et al. (1963).

De los modelos comparados, si bien el mayor grado de ajuste se observó con la inclusión de la medida de P8 al inicio del engorde, el efecto del PMM deja ser significativo, lo que afectaría el componente incluido para explicar los requerimientos de mantenimiento de los animales en el modelo teórico del RFI (Martin et al., 2021). Los siguientes mejores modelos son los que incluyen la

variable P8 medida en la mitad de la prueba de eficiencia, o las variables EGD o P8 medidas al final de la prueba de eficiencia en el engorde. Si bien la comparación de las estimaciones de RFI con base en los modelos 1, 2 y 4 pueden considerarse equivalentes en cuanto al ranking de los animales, se considera importante tomar en cuenta el engrasamiento en la estimación de RFI de manera de lograr estimaciones que sean independientes del nivel de grasa (Basarab et al., 2011; Kenny et al., 2018). Además, teniendo en cuenta el modelo teórico del RFI, es importante considerar en el modelo los requerimientos energéticos para deposición de grasa en la etapa de engorde de los animales, donde este tejido es el que se deposita mayoritariamente (Martin et al., 2021). Con base en estos resultados, la ecuación del modelo 2 es la utilizada en este estudio para la estimación del RFI en el engorde.

#### 2.5.2. Asociación entre la eficiencia de conversión de diferentes fases

En el cuadro 2.8 se muestran las correlaciones fenotípicas encontradas entre las variables RFI, consumo de materia seca (CMS), ganancia de peso (GMD), pesos inicial y promedio, peso metabólico medio (PMM) y espesor de grasa (EGD) medidas durante la etapa de recría y de engorde. La correlación fenotípica entre el RFI medido en la recría y el RFI medido en el engorde de los novillos fue de 0,712 ( $P < 0,001$ ). Esta correlación de moderada a alta está acorde a lo reportado por otros trabajos donde el tipo de alimentación de los animales fue relativamente similar entre las distintas etapas en que se midió el RFI ( $r_p = 0,50$  a  $0,85$ ) (Arthur et al., 2001; Cassady et al., 2016; McGee et al., 2014). Esto significa que una gran proporción de los animales que fueron eficientes durante la fase de recría también lo fueron durante la fase del engorde, con dietas adecuadas a los requerimientos de cada fase. El hecho de que haya animales que, habiendo sido eficientes en la recría, no lo fueron en el engorde, o viceversa, puede ser explicado porque la composición de la ganancia de peso de los novillos fue diferente entre ambas etapas (habiéndose

depositado mayor proporción de tejido adiposo durante el engorde), lo que involucra diferentes procesos metabólicos, donde puede haber diferencias en el nivel de eficiencia que presenta cada animal en cada proceso (Martin et al., 2021).

Por otra parte, el RFI en la etapa de recría tuvo una correlación fenotípica positiva y alta solamente con el CMS durante la recría ( $r_p = 0,79$ ;  $P < 0,001$ ) y media con el CMS durante el engorde ( $r_p = 0,49$ ;  $P < 0,001$ ), mientras que el RFI de la etapa de engorde tuvo una correlación moderada y positiva tanto con el CMS del engorde como con el de la recría ( $r_p = 0,63$ ,  $P < 0,001$ ;  $r_p = 0,56$ ,  $P < 0,001$ ). Tanto el RFI de la etapa de recría como el de la etapa de engorde no estuvieron correlacionados con la GMD, con el peso inicial, con el peso promedio, con el PMM ni con el EGD final de ninguna de las dos etapas. Cassady et al. (2016) tampoco encontraron correlación entre el RFI estimado en la recría o engorde y la GMD registrada en cualquiera de las dos etapas, pero sí reportaron una correlación moderada positiva entre el RFI de cada etapa y el CMS de la misma etapa, que se volvió una correlación media a baja cuando se analizaron RFI y CMS de distintas etapas.

La correlación fenotípica encontrada entre el CMS en la recría y en el engorde fue de 0,55 ( $P < 0,001$ ), la cual es similar a la reportada por McGee et al. (2014) y por Cassady et al. (2016), y algo inferior a las correlaciones fenotípicas encontradas en los trabajos de Arthur et al. (2001) y Black et al. (2013) ( $r_p = 0,63$  y  $0,92$ ). Además, el CMS de la recría tuvo una correlación moderada con la GMD de la recría ( $r_p = 0,41$ ;  $P < 0,001$ ), al igual que el CMS y GMD durante el engorde ( $r_p = 0,49$ ;  $P < 0,001$ ). A diferencia del CMS del engorde, el de la recría presentó correlaciones positivas medias con el peso inicial, peso promedio, PMM y EGD tanto de la recría como del engorde ( $P < 0,001$ ).

En general, y como era esperable, las correlaciones fueron altas y positivas entre los pesos iniciales, promedios y PMM, y tuvieron una correlación moderada y positiva con la GMD en ambas etapas.

Estos resultados son coherentes con la definición y cálculo de RFI, que hacen que el RFI sea fenotípicamente independiente de las variables que componen el modelo de estimación del consumo (GMD, PMM y EGD final) (Basarab et al., 2003).

Cuadro 2.8. Correlaciones entre consumo de MS, peso inicial, ganancia media diaria, peso promedio, peso metabólico medio (PMM) espesor de grasa dorsal (EGD) final y RFI evaluados en la recría y en el engorde de novillos hereford.

	CMS recría	Peso inicio recría	GMD recría	Peso promedio recría	PMM recría	EGD final recría	RFI recría	CMS engorde	Peso inicio engorde	GMD engorde	Peso promedio engorde	PMM engorde	EGD final engorde	RFI engorde
CMS recría	1	0,524**	0,406**	0,560**	0,552**	0,350**	0,792**	0,550**	0,551**	0,205‡	0,579**	0,564**	0,328*	0,555**
Peso inicio recría		1	0,368**	0,988**	0,990**	0,505**	0,004	-0,051	0,930**	0,031	0,886**	0,893**	0,279*	0,022
GMD recría			1	0,487**	0,492**	0,236+	0,000	0,170	0,620**	0,494**	0,671**	0,668**	0,132	-0,063
Peso promedio recría				1	0,998**	0,520**	0,003	0,017	0,959**	0,122	0,933**	0,937**	0,288*	0,013
PMM recría					1	0,510**	0,000	-0,010	0,963**	0,114	0,933**	0,939**	0,280*	0,006
EGD final recría						1	0,000	0,148	0,477**	-0,019	0,467**	0,463**	0,710**	-0,018
RFI recría							1	0,486**	-0,001	0,030	0,008	-0,002	0,151	0,712**
CMS engorde								1	0,047	0,490**	0,170	0,136	0,195‡	0,628**
Peso inicio engorde									1	0,228+	0,979**	0,988**	0,278*	0,013
GMD engorde										1	0,393**	0,365**	-0,105	0,000
Peso promedio engorde											1	0,997**	0,265+	-0,0004
PMM engorde												1	0,260+	0,000
EGD final engorde													1	0,000
RFI engorde														1

\*\* P < 0,001; \* P < 0,01; + P < 0,05; ‡ P < 0,1; los demás no fueron significativos, P > 0,1.

### 2.5.3. Caracterización del desempeño de crecimiento y composición

En el estudio de las características de crecimiento y composición corporal de los novillos en relación con el RFI, se estimaron las medias de los grupos de RFI alto, medio y bajo del engorde para las características RFI, CMS, edad de inicio, pesos inicial y promedio, GMD, PMM, AOB final, EGD final y P8 final registradas durante las fases de recría y engorde de los novillos. Estas se presentan en el cuadro 2.9.

Cuadro 2.9. Comparación del RFI, consumo de MS, edad de inicio, peso inicial, ganancia de peso media diaria, peso promedio, peso metabólico medio, área del ojo de bife (AOB) final, espesor de grasa dorsal (EGD) final y espesor de grasa de cadera (P8) final de las evaluaciones de RFI en la recría y engorde de novillos hereford, con base en el grupo de RFI de engorde al que pertenecen.

	Grupo RFI engorde			Valor de P
	Alto	Medio	Bajo	
RFI recría (kg MS/día)	0,783 <sup>a</sup>	0,092 <sup>b</sup>	-0,988 <sup>c</sup>	< 0,0001
CMS recría (kg MS/día)	9,969 <sup>a</sup>	9,221 <sup>b</sup>	8,316 <sup>c</sup>	< 0,0001
Edad inicio recría (días)	389,7	389,8	398,1	0,1308
Peso inicial recría (kg)	254,6	249,9	254,4	0,8183
GMD recría (kg/día)	1,507	1,522	1,560	0,5216
Peso promedio recría (kg)	308,7	305,0	310,7	0,8223
PMM recría (kg)	73,5	72,9	73,9	0,8251
AOB final recría (cm <sup>2</sup> )	40,5	41,4	40,8	0,7687
EGD final recría (mm)	3,8	4,0	3,9	0,8175
P8 final recría (mm)	4,7	4,5	4,5	0,9441
RFI engorde (kg MS/día)	0,993 <sup>a</sup>	0,023 <sup>b</sup>	-1,156 <sup>c</sup>	< 0,0001
CMS engorde (kg MS/día)	12,300 <sup>a</sup>	11,114 <sup>b</sup>	10,105 <sup>c</sup>	< 0,0001
Edad inicio engorde (días)	494,2	494,3	502,6	0,1308
Peso inicial engorde (kg)	411,3	403,9	414,4	0,5870
GMD engorde (kg/día)	1,497	1,445	1,474	0,4371
Peso promedio engorde (kg)	472,6	462,9	475,1	0,5126
PMM engorde (kg)	101,3	99,7	101,7	0,516
AOB final engorde (cm <sup>2</sup> )	55,5	55,2	54,7	0,8934
EGD final engorde (mm)	10,9	11,0	10,9	0,9904
P8 final engorde (mm)	11,7	10,9	10,5	0,2991

Medias seguidas por letras distintas en la misma fila indican que difieren significativamente ( $P < 0,05$ ).

Como se muestra en el cuadro 2.9, el consumo de alimento general durante la recría fue de alrededor de 9,0 kg de MS/día, y durante el engorde fue de 11,0 kg de MS/día. Estos niveles de consumo del engorde fueron similares a los reportados en trabajos nacionales con engorde de novillos a corral, como los de Simeone et al. (2018a) y Simeone et al. (2018b) (10,7 a 11,6 kgMS/día), mientras que los consumos de la recría fueron algo superiores a los reportados por Simeone et al. (2018a) y Beretta et al. (2018) en encierres para recría de terneros (6,2 kgMS/día), probablemente porque los novillos de este trabajo fueron encerrados más tarde (con mayor edad) y más pesados de lo que reportan estos trabajos. Las ganancias de peso generales registradas en este trabajo estuvieron en el orden de 1,53 y 1,47 kg/día durante la recría y el engorde, respectivamente. La ganancia en la recría fue algo superior a las reportadas por Beretta et al. (2018), Simeone et al. (2018a) y Baldi et al. (2010) (de 1,0 a 1,4 kg/día) para animales un poco menores y más livianos que los de este trabajo, mientras que la ganancia de peso en el engorde fue similar a las reportadas por Simeone et al. (2018a), Simeone et al. (2018b) y Baldi et al. (2010) (de 1,3 a 1,5 kg/día).

Al agrupar los novillos de acuerdo a su RFI medido durante el engorde, se observó que el grupo de animales que fueron significativamente más eficientes en la conversión del alimento durante el engorde (grupo de RFI bajo) ( $P < 0,0001$ ) también habían sido significativamente más eficientes en la recría ( $P < 0,0001$ ). Se manifestó una diferencia promedio de 1,77 kg y 2,15 kg de MS/día de consumo residual de alimento entre los grupos de alto y bajo RFI en la recría y el engorde, respectivamente. Estas diferencias en el RFI registrado en la recría y el engorde de novillos con eficiencia de conversión contrastante concuerda con lo registrado por McGee et al. (2014), quienes reportaron que el RFI de novillos eficientes fue de -0,92 kg de MS/día promedio durante la recría y de -1,07 kg de MS/día en el engorde, mientras que los novillos ineficientes registraron un RFI de 0,87 kg de MS/día en la recría y 0,96 kg de MS/día en el engorde.

En promedio, los novillos que fueron más eficientes durante el engorde consumieron 8,32 kg de MS/día durante la recría y 10,11 kg de MS/día durante el engorde, frente a un consumo de 9,97 y 12,3 kg de MS/día en la recría y engorde de los novillos menos eficientes (alto RFI), con diferencias significativas entre los novillos de alto y bajo RFI ( $P < 0,0001$ ). Estos niveles de CMS, tanto en la recría como en el engorde, son un poco inferiores a los registrados por McGee et al. (2014) en novillos red angus recriados y engordados a corral (10,5 vs. 12,3 kgMS/día en recría y 12,6 vs. 15,0 kgMS/día en engorde de novillos eficientes e ineficientes respectivamente).

Por otra parte, no hubo diferencias significativas entre los novillos con alto y bajo RFI de engorde en las características de desempeño como el peso inicial, la GMD, el peso promedio y el PMM de la recría o del engorde ( $P > 0,05$ ). Tampoco hubo diferencias en las características de composición corporal como AOB final, EGD final y P8 final de la recría o del engorde ( $P > 0,05$ ). Esto es consistente con las correlaciones presentadas en el cuadro 2.8 y concuerda con lo reportado por McGee et al. (2014) y Basarab et al. (2003) para novillos en recría y engorde, y por Black et al. (2013) para vacas en lactación, cuando, al igual que en este trabajo, incluyeron el EGD como variable en el modelo de cálculo del RFI. Cuando no se incluye la variable EGD en el cálculo de RFI, como fue el caso del trabajo de Nkrumah et al. (2007a), por ejemplo, aparecen diferencias significativas en el EGD de novillos de alto y bajo RFI ( $P < 0,001$ ). Acorde a lo encontrado en el presente trabajo, el AOB medido al final de las evaluaciones, a pesar de no estar incluido en el modelo de cálculo del RFI, no difirió significativamente entre animales de alto y bajo RFI en el trabajo de Nkrumah et al. (2007a) con novillos, ni en los trabajos de Fitzsimons et al. (2013), Shaffer et al. (2011) y Lancaster et al. (2009) con vaquillonas.

#### 2.5.4. Caracterización del comportamiento ingestivo de los novillos en recría y engorde

En el cuadro 2.10 se presentan las características de comportamiento ingestivo registradas durante la evaluación de la eficiencia de la conversión de los novillos en la recría y en el engorde según el grupo de RFI de engorde al que pertenecieron.

Cuadro 2.10. Medias ajustadas de las características de comportamiento ingestivo de novillos de RFI alto, medio y bajo en el engorde, registradas en la recría y en el engorde, y valor de la probabilidad de que las medias sean iguales (valor de P).

	Recría				Engorde			
	RFI alto	RFI medio	RFI bajo	Valor de P	RFI alto	RFI medio	RFI bajo	Valor de P
TCD (min)	229,0 <sup>a</sup>	218,8 <sup>b</sup>	201,7 <sup>c</sup>	0,0022	121,5 <sup>a</sup>	113,5 <sup>b</sup>	105,4 <sup>c</sup>	0,0001
TCGD (min)	85,6 <sup>a</sup>	65,5 <sup>b</sup>	53,6 <sup>b</sup>	0,0007	49,1 <sup>a</sup>	37,4 <sup>b</sup>	26,5 <sup>c</sup>	<0,0001
TCG (min)	8,6 <sup>a</sup>	6,0 <sup>b</sup>	5,0 <sup>b</sup>	0,0004	8,0 <sup>a</sup>	5,6 <sup>b</sup>	4,0 <sup>c</sup>	<0,0001
NCD	11,3 <sup>a</sup>	12,7 <sup>b</sup>	13,2 <sup>b</sup>	0,0149	6,8 <sup>a</sup>	7,5 <sup>b</sup>	7,8 <sup>b</sup>	0,0200
CMSC (kg MS)	1,00 <sup>a</sup>	0,81 <sup>b</sup>	0,75 <sup>b</sup>	0,0003	1,98 <sup>a</sup>	1,62 <sup>b</sup>	1,48 <sup>b</sup>	<0,0001
TasaCC (kg MS/min)	0,045 <sup>a</sup>	0,043 <sup>a</sup>	0,043 <sup>a</sup>	0,2324	0,103 <sup>a</sup>	0,100 <sup>a</sup>	0,101 <sup>a</sup>	0,6501
TasaCCG (kg MS/min)	0,145 <sup>a</sup>	0,184 <sup>b</sup>	0,219 <sup>b</sup>	0,0017	0,287 <sup>a</sup>	0,363 <sup>b</sup>	0,505 <sup>c</sup>	<0,0001

Medias seguidas de letras diferentes para cada característica, dentro de cada etapa (recría o engorde) difieren significativamente entre sí ( $P < 0,05$ ). TCD: tiempo de comida diaria. TCGD: tiempo de cabeza gacha diaria. TCG: tiempo de cada evento de cabeza gacha. NCD: número de comidas por día. CMSC: consumo de materia seca por evento de comida. TasaCC: tasa de consumo por comida. TasaCCG: tasa de consumo por evento de cabeza gacha.

Como se puede ver en el cuadro 2.10, los novillos más eficientes (bajo RFI) destinaron un tiempo significativamente menor ( $P < 0,05$ ) al consumo de alimento diario (expresado tanto en tiempo de comida diaria como en tiempo de cabeza gacha diaria y tiempo de cada evento de cabeza gacha) y consumieron menos alimento en cada comida, con una mayor tasa de consumo por evento de cabeza gacha, y con una mayor frecuencia de comidas diarias que los animales más ineficientes (alto RFI), tanto durante la recría como durante el engorde. El menor

tiempo diario que destinaron los animales de bajo RFI a la comida coincidió con lo reportado por Nkrumah et al. (2006) y Nkrumah et al. (2007b) en novillos en engorde (47,8 y 56,4 minutos/día en novillos de bajo RFI vs. 74,0 y 74,6 minutos/día en novillos de alto RFI, respectivamente) ( $P < 0,05$ ) y a lo reportado por Burjel y Marques (2017) en toros y novillos en recría (196,8 vs. 220,9 minutos/día;  $P < 0,05$ ). Basarab et al. (2003), Basarab et al. (2011), Kelly et al. (2010) y McGee et al. (2014) sin embargo, no encontraron diferencias entre el tiempo que destinaron vaquillonas y novillos de alto y bajo RFI a la comida diaria. Con respecto al número de comidas diarias, a diferencia de lo observado en el presente trabajo, Basarab et al. (2011), Kelly et al. (2010), Nkrumah et al. (2007b) y Nkrumah et al. (2006) encontraron que los animales de bajo RFI tuvieron una menor frecuencia de comidas que los de alto RFI (101,3 vs. 110,2; 53,4 vs. 68,1; 27,2 vs. 31,5 y 18,1 vs. 35,6, respectivamente;  $P < 0,05$ ), mientras que Basarab et al. (2003), Burjel y Marques (2017) y McGee et al. (2014) no encontraron diferencias significativas ( $P > 0,05$ ). Por otro lado, al analizar el tamaño de cada comida Burjel y Marques (2017) encontraron que los animales de bajo RFI consumieron menor cantidad de alimento por comida que los de alto RFI (0,811 vs. 1,010 kg/comida;  $P < 0,05$ ), al igual que lo observado en el presente trabajo, y a diferencia de McGee et al. (2014), que no reportaron diferencias en el consumo promedio por comida de animales eficientes e ineficientes. Estos resultados, junto con las correlaciones positivas bajas a medias que han reportado Nkrumah et al. (2007b) y Robinson y Oddy (2004) entre RFI y el tiempo destinado a la comida ( $r_p = 0,49$  y  $0,16$ , respectivamente), sugieren que los animales más eficientes destinan menos tiempo al consumo de alimento, lo que, además de traducirse en un menor consumo diario de materia seca, podría significar menor gasto energético en la actividad de la alimentación.

## 2.6. CONCLUSIONES

- Los novillos más eficientes (menor RFI) durante el engorde consumieron 18 % y 17 % menos alimento, con el mismo peso, la misma ganancia de peso y deposición de grasa subcutánea y músculo que los novillos menos eficientes, en las etapas de engorde y de recría, respectivamente.
- Las asociaciones entre RFI en el engorde y las características utilizadas en su estimación confirmaron la alta correlación entre RFI con consumo ( $r = 0,63$ ) y su independencia con las demás variables productivas.
- Existió una alta asociación entre la eficiencia de conversión del alimento medido como RFI en la recría y en el engorde de novillos hereford en confinamiento ( $r = 0,71$ ). Los novillos que fueron eficientes durante el engorde también lo fueron en su recría.
- Dada la magnitud de la relación entre RFI en engorde y recría, la comparación del desempeño de los animales indicó que la mayor eficiencia en la recría también es explicada por menores niveles de consumo de alimento, sin diferencias significativas en peso, crecimiento o composición del crecimiento.
- El modelo de cálculo del RFI en el engorde no mejoró su ajuste si se le agregan variables de grasa subcutánea o AOB respecto a las variables que se utilizan actualmente para su cálculo en la recría.

## 2.7. BIBLIOGRAFÍA

- Arthur PF, Renand G, Krauss D. 2001. Genetic and phenotypic relationships among different measures of growth and feed efficiency in young Charolais bulls. *Livestock Production Science*. 68 (2–3): 131–139. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(00\)00243-8](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(00)00243-8)
- Baldi F, Banchemo G, La Manna A, Fernández E, Pérez E. 2010. Efecto del manejo nutricional post-destete y durante el período de terminación sobre las características de crecimiento y eficiencia de conversión en sistemas de recría y engorde intensivo. In: INIA La Estanzuela. Jornada de Invernada Intensiva, julio, La Estanzuela, Colonia, Uruguay, 2010. Producción de carne desde una invernada de precisión. La Estanzuela, Colonia (Uruguay): INIA, 2010. p. 1-13. (INIA Serie Actividades de Difusión; 609).
- Basarab JA, Colazo MG, Ambrose DJ, Novak S, McCartney D, Baron VS. 2011. Residual feed intake adjusted for backfat thickness and feeding frequency is independent of fertility in beef heifers. *Canadian Journal of Animal Science*. 91 (4): 573–584. <https://doi.org/10.4141/cjas2011-010>
- Basarab J A, Price MA, Aalhus JL, Okine EK, Snelling WM, Lyle KL. 2003. Residual feed intake and body composition in young growing cattle. *Canadian Journal of Animal Science*. 83 (2): 189–204. <https://doi.org/10.4141/A02-065>
- Beretta V, Simeone A, Pancini S, Caorsi CJ, Calero S, Taruselli S. 2018. Combinando el grano entero de avena como fuente de fibra y el autoconsumo en la recría de terneros a corral (sistema ADT). 20° Jornada Anual de la Unidad de Producción Intensiva de Carne. Facultad de Agronomía. p. 16-28.
- Black TE, Bischoff KM, Mercadante VRG, Marquezini GHL, Dilorenzo N, Chase CC, Coleman SW, Maddock TD, Lamb GC. 2013. Relationships among performance,

residual feed intake, and temperament assessed in growing beef heifers and subsequently as 3-year-old, lactating beef cows. *Journal of Animal Science*. 91 (5): 2254–2263. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5242>

Burjel MV, Marques M. 2017. Caracterización del comportamiento de consumo a corral y su vinculación con la eficiencia de conversión en vacunos de la raza Hereford. Tesis Ingeniero Agrónomo. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 82p.

Cassady CJ, Felix TL, Beaver JE, Shike DW, Taylor J, Kerley M, Schnabel R, Marques E, Garrick D, Hansen S, Loy D, Weaber R, Seabury C, Beaver J, Shike D, Fahrenkrug S, Spangler M, Johnson K, Neiberghs H, Pollak J. 2016. Effects of timing and duration of test period and diet type on intake and feed efficiency of Charolais-sired cattle. *Journal of Animal Science*. 94 (11): 4748–4758. <https://doi.org/10.2527/jas2016-0633>

Fitzsimons C, Kenny DA, Deighton MH, Fahey AG, McGee M. 2013. Methane emissions, body composition, and rumen fermentation traits of beef heifers differing in residual feed intake. *Journal of Animal Science*. 91 (12): 5789–5800. <https://doi.org/10.2527/jas2013-6956>

Hegarty RS, Goopy JP, Herd RM, 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>

Johnston DJ, Reverter A, Burrow HM, Oddy VH, Robinson DL. 2003. Genetic and phenotypic characterisation of animal, carcass, and meat quality traits from temperate and tropically adapted beef breeds. 1. Animal measures. *Australian Journal of Agricultural Research*. 54 (2): 107–118. <https://doi.org/10.1071/AR02085>

Kelly AK, McGee M, Crews DH, Fahey AG, Wylie AR, Kenny DA. 2010. Effect of

divergence in residual feed intake on feeding behavior, blood metabolic variables, and body composition traits in growing beef heifers. *Journal of Animal Science*. 88 (1): 109–123. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2196>

Kenny DA, Fitzsimons C, Waters SM, McGee M. 2018. Invited review : Improving feed efficiency of beef cattle – the current state of the art and future challenges. *Animal*. 12 (9): 1815-1826..  
<https://doi.org/10.1017/S1751731118000976>

Koch R, Swiger LA, Chambers D, Gregory KE. 1963. Efficiency of feed use in beef cattle. *Journal of Animal Science*. 22 (2): 486–494.

Lancaster PA, Carstens GE, Crews DH, Welsh TH, Forbes TDA, Forrest DW, Tedeschi LO, Randel RD, Rouquette FM. 2009. Phenotypic and genetic relationships of residual feed intake with performance and ultrasound carcass traits in Brangus heifers. *Journal of Animal Science*. 87 (12): 3887–3896.  
<https://doi.org/10.2527/jas.2009-2041>

Martin P, Ducrocq V, Faverdin P, Friggens N, Martin P, Ducrocq V, Faverdin P, Friggens N, Friggens NC. 2021. Invited review : Disentangling residual feed intake-Insights and approaches to make it more fit for purpose in the modern context. *Journal of Dairy Science*. 104 (6): 6329-6342.  
<https://doi.org/10.3168/jds.2020-19844>

McGee M, Welch CM, Ramirez JA, Carstens GE, Price WJ, Hall JB, Hill RA. 2014. Relationships of feeding behaviors with average daily gain, dry matter intake, and residual feed intake in Red Angus–sired cattle. *Journal of Animal Science*. 92 (11): 5214–5221. <https://doi.org/10.2527/jas2014-8036>

Nkrumah JD, Basarab JA, Price MA, Okine EK, Ammoura A, Guercio S, Hansen C, Li C, Benkel B, Murdoch B, Moore SS. 2007a. Genetic and phenotypic relationships of feed intake and measures of efficiency with growth and carcass merit of

beef cattle. *Journal of Animal Science*. 85 (10): 2711-2720.

<https://doi.org/10.2527/jas.2006-767>

Nkrumah JD, Crews DH, Basarab JA, Price MA, Okine EK, Wang Z, Li C, Moore SS.

2007b. Genetic and phenotypic relationships of feeding behavior and temperament with performance, feed efficiency, ultrasound, and carcass merit of beef cattle. *Journal of Animal Science*. 85 (10): 2382–2390.

<https://doi.org/10.2527/jas.2006-657>

Nkrumah JD, Okine EK, Mathison GW, Schmid K, Li C, Basarab JA, Price MA, Wang Z,

Moore SS. 2006. Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. *Journal of Animal Science*. 84 (1): 145–153.

<https://doi.org/10.2527/2006.841145x>

Pravia MI, Navajas EA, Aguilar I, Ravagnolo O. 2022. Evaluation of feed efficiency traits in different Hereford populations and their effect on variance component estimation. *Animal Production Science*. 62 (17:), 1652-1660.

<https://doi.org/10.1071/AN21420>

Ravagnolo O, Aguilar I, Crowley JJ, Pravia MI, Lema M, Macedo FL, Scott S, Navajas EA. 2018. Accuracy of genomic predictions of residual feed intake in Hereford with Uruguayan and Canadian training populations. *Canadian Journal of Animal Science*. 91 (4): 573–584.

Realini CE, Williams RE, Pringle TD, Bertrand JK. 2001. Gluteus medius and rump fat depths as additional live animal ultrasound measurements for predicting retail product and trimmable fat in beef carcasses. *Journal of Animal Science*. 79 (6): 1378–1385. <https://doi.org/10.2527/2001.7961378x>

Robinson DL, Oddy VH. 2004. Genetic parameters for feed efficiency, fatness, muscle area and feeding behaviour of feedlot finished beef cattle. *Livestock Production Science*. 90 (2–3): 255–270.

<https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2004.06.011>

Shaffer KS, Turk P, Wagner WR, Felton EED. 2011. Residual feed intake, body composition, and fertility in yearling beef heifers. *Journal of Animal Science*. 89 (4): 1028–1034. <https://doi.org/10.2527/jas.2010-3322>

Silva S, Tarouco JU, Ferraz JBS, Gomes R, Leme PR, Navajas EA. 2012. Prediction of retail beef yield, trim fat and proportion of high-valued cuts in nellore cattle using ultrasound live measurements. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 41 (9): 2025–2031. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012000900009>

Simeone A, Beretta V, Buffa JI, Canán G, Varalla D, Miranda D. 2018a. Analizando los factores que inciden sobre la eficiencia de conversión de un corral de engorde. 20° Jornada Anual de la Unidad de Producción Intensiva de Carne. Facultad de Agronomía. p. 54-63.

Simeone A, Beretta V, Franco J, Pancini S, Caorsi J, Novac M, Panizza V, Rodríguez V. 2018b. Uso del DDGS de sorgo en raciones de engorde a corral, “con suministro restringido” como estrategia de manejo del comedero. 20° Jornada Anual de la Unidad de Producción Intensiva de Carne. Facultad de Agronomía. p. 44-52.

Williams RE, Bertrand JK, Williams SE, Benyshek LL. 1997. Biceps Femoris and Rump Fat as Additional Ultrasound Measurements for Predicting Retail Product and Trimmable Fat in Beef Carcasses. *Journal of Animal Science*. 75 (1): 7–13. <https://doi.org/10.2527/1997.7517>

### 3. COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE METANO ENTÉRICO DE NOVILLOS DE ALTO Y BAJO CONSUMO RESIDUAL DE ALIMENTOS

#### 3.1. RESUMEN

Las emisiones de metano entérico (EM) de los rumiantes son parte de los gases de efecto invernadero (GEI) de la atmósfera, cuya intensidad de emisiones Uruguay se comprometió a reducir. La mejora del consumo residual de alimento (*residual feed intake*, RFI) ha sido sugerida como herramienta de mitigación por su asociación con menores EM. El objetivo de este estudio fue cuantificar la asociación entre RFI y la EM de novillos hereford en engorde en confinamiento. El trabajo se realizó en la Central de Prueba de Kiyú de la Sociedad de Criadores de Hereford del Uruguay, en dos años. Cada año, luego de la evaluación del RFI en el engorde (91 novillos), se midieron las EM con la técnica del SF<sub>6</sub> en novillos con RFI contrastante (RFI alto y bajo) (21 animales). El RFI fue estimado como la diferencia entre el consumo de materia seca individual diario (CMS) y el consumo estimado con base en la ganancia media diaria (GMD), el peso metabólico medio (PMM) y el espesor de grasa dorsal (EGD) medido por ultrasonido al final de la prueba. Los novillos de alto RFI tuvieron un CMS superior a los de bajo RFI (12,30 vs. 10,08 kgMS/día;  $P < 0,05$ ) durante la evaluación del RFI, diferencia que se mantuvo durante las mediciones de EM, pero en menor magnitud. No hubo diferencias en el PMM, GMD ni EGD entre los novillos de alto y bajo RFI durante la evaluación de RFI ( $P > 0,05$ ), ni durante las mediciones de EM ( $P > 0,05$ ). No se encontraron diferencias entre las EM de novillos de alto y bajo RFI ( $P > 0,05$ ). La menor diferencia en CMS de los novillos de alto y bajo RFI durante las mediciones de EM y la alta variabilidad de las EM obtenidas (coeficiente de variación de 50 %) pudieron haber contribuido a este resultado.

Palabras clave: eficiencia de conversión del alimento, emisiones de metano, novillos, confinamiento, engorde

### 3.2. SUMMARY

Methane emissions (ME) from ruminants are part of the atmosphere greenhouse gases. Uruguay has committed to reduce its emission intensity. The improvement of residual feed intake (RFI) has been suggested as a mitigation tool because of its association with lower ME. The aim of this study was to quantify the association between RFI and ME of Hereford steers measured at fattening. The experiment was carried out at the Hereford Breeders Association's Kiyú Test Center (Uruguay), in two years. Each year after the RFI evaluation during the fattening phase (91 steers) MEs were measured in contrasting RFI (high and low RFI) steers, using the SF6 technique (21 animals). RFI was estimated as the difference between daily individual dry matter intake (DMI) and an estimated intake based on average daily gain (ADG), average metabolic weight (MW) and rib fat depth (RFD) measured at the end of the trial by ultrasound. High RFI steers had a higher DMI than low RFI steers (12.30 vs. 10.08 kgDM/day;  $P < 0.05$ ) during RFI evaluation. A smaller difference in DMI was observed during the ME measurements. There were no differences in MW, ADG or RFD between high and low RFI steers during the RFI evaluation ( $P > 0.05$ ), nor during the ME measurements ( $P > 0.05$ ). No statistically significant difference was found in ME between high and low RFI steers ( $P > 0.05$ ). This result could be due to the smaller difference in DMI between high and low RFI steers during ME measurements, and the large variability in the ME data (coefficient of variation of 50 %).

Keywords: feed efficiency, methane emissions, steers, feedlot, fattening

### 3.3. INTRODUCCIÓN

Las emisiones de metano entérico ( $\text{CH}_4$ ) por parte de los rumiantes constituyen una pérdida de la energía consumida, que en bovinos representa entre un 2 % y un 12 % de la energía bruta ingerida (Johnson y Johnson, 1995). Además, el  $\text{CH}_4$  es uno de los gases de efecto invernadero (GEI) más importantes que se emiten a la atmósfera por actividades antropogénicas, después del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Cambra-López et al., 2008).

Uruguay, como miembro del Acuerdo de París de las Naciones Unidas, asumió ciertos compromisos que apuntan a reducir para 2025 aproximadamente un 50 % la intensidad de emisiones de GEI (cantidad de emisiones de GEI por unidad de Producto Bruto Interno) con relación a 1990. En cuanto a la producción de alimento, la meta propuesta es una reducción del 32 % de la intensidad de emisiones de  $\text{CH}_4$  por unidad de producto, expresada como kg de carne vacuna en peso vivo (MVOTMA, 2017). Esto hace necesario el desarrollo de estrategias que ayuden a reducir las emisiones de metano por fermentación entérica, ya que este es el responsable de aproximadamente el 41 % de las emisiones totales de GEI del Uruguay (MVOTMA, 2019).

Existen evidencias de que la eficiencia de conversión del alimento medida como RFI está asociada a la emisión de  $\text{CH}_4$  y que una mejora en el RFI contribuiría a su reducción (Hegarty et al., 2007; Nkrumah et al., 2006), por lo que ha sido sugerida como una herramienta de mitigación.

En esta sección se aborda la segunda hipótesis planteada en esta tesis: los novillos de alta eficiencia (bajo RFI) emiten menos metano entérico que los novillos de baja eficiencia (alto RFI) durante su engorde en confinamiento. El objetivo específico de este estudio fue cuantificar la asociación entre RFI y la emisión de metano entérico de novillos hereford en fase de engorde en condiciones de confinamiento.

### 3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en la Central de Prueba de Kiyú de la Sociedad de Criadores de Hereford del Uruguay, departamento de San José, Uruguay, desde enero hasta junio de 2018 y desde diciembre de 2018 hasta mayo de 2019. Contó con dos etapas principales: 1. evaluación del RFI durante el engorde y 2. mediciones de emisiones de metano entérico durante el engorde, realizadas en dos generaciones de animales (nacidos en las primaveras de 2016 y 2017, respectivamente).

Todos los animales utilizados fueron originarios de la Unidad Experimental de Glencoe (INIA). En el primer año se utilizaron 28 novillos de raza hereford de 480 días de edad (desvío estándar = 13 días) y 380 kg de peso vivo (desvío estándar = 41 kg) al inicio del experimento. En el segundo año se utilizaron 63 novillos de raza hereford de 447 días de edad (desvío estándar = 17 días) y 342 kg de peso vivo (desvío estándar = 33 kg) al inicio del experimento. Estos animales previamente participaron en la evaluación genética de RFI en la raza hereford realizada en la recría, llevada a cabo en las mismas instalaciones y bajo las mismas condiciones, siguiendo el protocolo internacional definido para el registro de información para la evaluación genética de RFI en esta raza (BIF, 2016). Luego de la evaluación genética de RFI en la recría, se volvió a evaluar su RFI en el engorde, utilizando la misma metodología.

Previo al comienzo de las evaluaciones, los animales fueron tratados contra clostridiosis y se les realizó un análisis coprológico para detectar infestaciones de parásitos gastrointestinales o fasciola hepática y realizar los tratamientos correspondientes, lo cual no fue necesario porque los animales se encontraron libres de parásitos.

### 3.4.1. Evaluación de la eficiencia de conversión

La evaluación de la eficiencia de conversión del alimento se realizó desde el 20/02/2018 hasta el 03/05/2018 en el primer año y desde el 23/01/2019 hasta el 10/04/2019 en el segundo año de evaluación. Durante los dos años la evaluación de la eficiencia de conversión se llevó a cabo con base en las mediciones de consumo individual en comederos automáticos (Model 6000 GrowSafe Systems Ltd., Airdrie AB, Canadá). Estos comederos están instalados en dos corrales de 60 m de largo × 40 m de frente, donde los animales fueron confinados con acceso a agua *ad libitum* de un bebedero de hormigón por corral, cuyas dimensiones fueron 2,50 m × 0,85 m × 0,55 m. Durante los meses de verano también tuvieron acceso a sombra artificial de sombrite doble de 27 m × 8 m.

Cada corral contó con 8 comederos individuales con capacidad para que cada comedero alimentara diariamente a 10 novillos en engorde. Los animales fueron alimentados con una ración totalmente mezclada (RTM) basada en ensilaje de planta entera de sorgo, grano de maíz quebrado y núcleo. Esta fue ofrecida *ad libitum* en dos entregas diarias, la primera a las 07:30 horas y la segunda a las 16:00 horas, aproximadamente, durante un período de 72 y 77 días en el primer y segundo año de evaluación, respectivamente. Semanalmente se tomaron muestras de la RTM y de sus componentes, las que se acumularon durante cuatro semanas y se mandaron a analizar como muestras compuestas de ese período (cuatro semanas). Se realizaron tres evaluaciones de la calidad de la dieta durante cada prueba de evaluación de eficiencia de conversión. Además, se hicieron monitoreos semanales del contenido de materia seca de la RTM y de cada componente. Los animales fueron pesados cada 14 días a primera hora de la mañana y sin desbaste. Se realizó también un seguimiento de la composición de crecimiento a través de medidas de ultrasonido llevadas a cabo al inicio, mitad y final de los períodos de evaluación de eficiencia de conversión.

Previo al inicio del período de evaluación de eficiencia en engorde, se realizó una etapa de adaptación a la dieta de engorde (dieta de inicio durante 10 días y dieta de transición durante 10 días más). La composición de estas dietas se observa en el cuadro 3.1. Luego de las dietas de adaptación, se suministró la dieta de la prueba de engorde durante 13 días antes de comenzar con la evaluación de la eficiencia de conversión en el engorde. La composición de la dieta ofrecida a los novillos durante la evaluación de eficiencia en engorde se observa en el cuadro 4.3. Cuadro 3.1. Composición en base seca de las dietas de adaptación a la dieta de engorde de novillos hereford en los dos años de evaluación.

	Dieta inicio engorde		Dieta transición engorde	
	Año 1	Año 2	Año 1	Año 2
Ensilaje planta entera de sorgo (%)	47,35	44,61	26,19	24,87
Grano de maíz quebrado (%)	43,25	42,98	65,06	64,89
Núcleo (%)*	9,40	12,41	8,75	10,25

\*Componentes: expeler de girasol, harina de soja, urea, carbonato de calcio, sal, entre otros.

Cuadro 3.2. Composición en base seca de las dietas de evaluación de eficiencia de conversión del alimento en el engorde de novillos hereford en los dos años evaluados.

	Año 1	Año 2
Componentes (%):		
Ensilaje planta entera de sorgo	10,15	13,00
Grano de maíz quebrado	81,11	78,19
Núcleo*	8,75	8,81
Composición química:		
MS (%)	66,01	63,43
PC (%)	12,89	12,36
FDN (%)	29,75	28,33
FDA (%)	15,14	16,00
EM (Mcal/kg MS)	3,014	3,014

\*Componentes: expeler de girasol, harina de soja, urea, carbonato de calcio, sal, entre otros.

### 3.4.2. Mediciones de metano

Las mediciones de CH<sub>4</sub> del primer año se realizaron en 6 novillos con RFI alto y en 6 novillos con RFI bajo (12 novillos en total), aunque los 28 novillos permanecieron en el corral. En el segundo año se realizaron las mediciones de CH<sub>4</sub> en 13 novillos con RFI alto y 11 novillos con RFI bajo (24 novillos en total), con los 63 novillos en el mismo corral. Los novillos se clasificaron como RFI alto cuando su RFI fue mayor a 0,5 desvíos estándar de la media, como RFI bajo cuando su RFI fue menor a 0,5 desvíos de la media y como RFI medio cuando su RFI se encontraba entre  $\pm 0,5$  desvíos de la media. La dieta suministrada a los novillos en esta etapa fue la misma que durante la prueba de RFI en engorde y los animales fueron pesados al inicio y final de cada período de medición de CH<sub>4</sub>.

Las mediciones de CH<sub>4</sub> se realizaron mediante la técnica del gas trazador SF<sub>6</sub> (Johnson y Johnson, 1995) adaptada para la medición durante períodos prolongados (Gere y Gratton, 2010), siguiendo el protocolo metodológico elaborado por INIA (INIA, 2015). Las mediciones se realizaron durante dos períodos consecutivos de 5 días cada uno, luego de finalizada la prueba de estimación de RFI durante el engorde. Los animales tuvieron un período de 5 días de acostumbramiento a los implementos de medición previo a comenzar con el primer período de colecta de CH<sub>4</sub>. Para esto se les colocaron los arneses y caños plásticos corrugados en donde luego se colocarían los tubos colectores de gas. Además, al inicio del acostumbramiento, se les suministró una cápsula o tubo de permeación rellena del gas SF<sub>6</sub>, utilizando un lanzabolos, para permitir la estabilización de la liberación de este gas en el rumen antes de comenzar las mediciones. El día de inicio de la primera medición (23/05/2018 y 24/04/2019 en el primer y segundo año de evaluación, respectivamente) se les colocó a los animales los tubos colectores, las mangueras y los restrictores de flujo de entrada de aire, los cuales fueron retirados al final del primer período de medición. En cada tubo colector retirado se midió su presión y se tomaron y guardaron cuatro submuestras en viales de 12 mL.

Finalmente, cada tubo fue vaciado, limpiado con nitrógeno y vaciado de nuevo. Luego de un período de descanso, se les volvió a colocar los tubos colectores, mangueras y restrictores a los mismos animales para dar inicio a un segundo período de medición de cinco días (30/05/2018 y 08/05/2019 en el primer y segundo año, respectivamente). Al final de este segundo período se retiraron todos los implementos de medición, se midió la presión de cada tubo y se tomaron y guardaron cuatro submuestras de cada uno para luego vaciar y limpiar los tubos colectores.

Antes de extraer las muestras de aire de los tubos colectores, se descartaron aquellos tubos que no estaban en buenas condiciones debido a imperfecciones, roturas o torceduras en las mangueras, restrictores o en los propios tubos. Los análisis de las muestras de aire se realizaron a la segunda y tercera submuestra que se tomó de cada tubo y se guardó la cuarta para chequeos en caso de que surgieran dudas con los resultados de alguna de las dos analizadas. Se analizaron las muestras de los tubos cuya presión de aire se encontró dentro de los rangos aceptables de acuerdo al protocolo del método usado, calibrado para muestrear emisiones durante 5 días, y también se analizaron las muestras de aquellos tubos cuya presión estuvo fuera del rango pero que dieron una concentración correspondiente a emisiones reportadas en la literatura desde 60 (Boadi et al., 2004) a 350 g de CH<sub>4</sub>/día (José Gere, comunicación personal, 13 de mayo de 2019). Las determinaciones de las concentraciones de gases de las muestras se realizaron en un cromatógrafo de gases Agilent Technologies 7890A en la estación experimental de INIA La Estanzuela, Uruguay. A partir de los datos obtenidos allí, se calculó la emisión de CH<sub>4</sub> de cada animal utilizando la siguiente ecuación:

$$CH_4 \left( \frac{g}{día} \right) = TL SF_6 \left( \frac{mg}{día} \right) \times \left[ \frac{CH_4 \text{ ent (ppm)} - CH_4 \text{ atm (ppm)}}{(SF_6 \text{ ent (ppt)} - SF_6 \text{ atm (ppt)})} \right] \times \left( \frac{16}{146} \right) \times 1000$$

Donde,

*CH<sub>4</sub>*: es la emisión de metano del animal expresada en g/día;

*TL SF<sub>6</sub>*: es la tasa de liberación de SF<sub>6</sub> de la cápsula (expresada en mg/día), medida previamente a dársela a cada animal para que se mantenga en el rumen;

*CH4 ent*: es la concentración de CH<sub>4</sub> encontrada en la muestra de aire emitida por el animal (CH<sub>4</sub> entérico), expresada en ppm;

*CH4 atm*: es la concentración de CH<sub>4</sub> encontrada en la muestra de aire tomada del ambiente cercano al corral donde se encontraban los animales (CH<sub>4</sub> atmosférico), expresada en ppm;

*SF6 ent*: es la concentración de SF<sub>6</sub> encontrada en la muestra de aire emitida por el animal (SF<sub>6</sub> proveniente del rumen), expresada en ppt;

*SF6 atm*: es la concentración de SF<sub>6</sub> encontrada en la muestra de aire tomada del ambiente cercano al corral donde se encontraban los animales (SF<sub>6</sub> atmosférico), expresada en ppt;

16: peso molecular del CH<sub>4</sub>;

146: peso molecular del SF<sub>6</sub>.

Durante la fase de medición de CH<sub>4</sub>, en los dos años de evaluación se obtuvieron los registros de 21 animales de los 36 animales considerados en el ensayo planteado. En los restantes 15 animales no se obtuvieron mediciones de la emisión de CH<sub>4</sub> entérico (4 animales en el primer año y 11 en el segundo) debido a problemas en tubos, mangueras y bozales para la medición (fallas y averías ocurridas durante los períodos de medición en los tubos recolectores, enganches rápidos y mangueras, pérdidas completas de los bozales con todos los materiales de medición), a tubos colectores que no tuvieron la presión adecuada al finalizar las mediciones o a datos que quedaron por fuera del rango establecido como válido.

Del total de los 21 novillos con medición de CH<sub>4</sub>, 8 corresponden al primer año de evaluación y 13 al segundo, siendo 12 de alto RFI y 9 de bajo RFI. De estos 21 animales, solamente 4 tuvieron valores válidos de emisiones en los dos períodos de medición.

### 3.4.3. Variables medidas

Las variables medidas en los animales fueron:

— Consumo de alimento diario en base seca (CMS): medido mediante el sistema GrowSafe; cada vez que un animal introducía la cabeza en el comedero, el sistema registraba el chip de identificación por radiofrecuencia del animal y le asignaba a él la diferencia de peso detectada por la balanza del comedero, obteniendo al final del día el consumo total diario de cada animal. Esta variable medida en base fresca fue ajustada por el porcentaje de materia seca de la dieta. Las mediciones de CMS fueron realizadas durante la prueba de RFI para su estimación y se continuaron durante las mediciones de emisiones de CH<sub>4</sub>.

— Peso vivo: registrado con balanza electrónica cada 14 días, sin ayuno previo, antes del suministro de alimento de la mañana. Además, el peso vivo inicial y final se registraron como la media de dos pesos tomados en días consecutivos al inicio y fin del período estudiado, sin ayuno previo (requisito para la evaluación genética, BIF, 2016). Los pesos de los animales a los cuales se les midió la emisión de CH<sub>4</sub> fueron registrados al inicio del período de adaptación y al inicio y fin de cada período de medición (1 y 2).

— Espesor de grasa dorsal (EGD): medición por ultrasonido del espesor de grasa dorsal realizada con un ecógrafo ALOKA® modelo SSD-500 con un transductor lineal y una frecuencia de 3,5 MHz. Se tomó una imagen entre la 12.<sup>a</sup> y 13.<sup>a</sup> costilla de cada animal que fue interpretada por técnicos certificados de INIA (Uruguay). Los EGD medidos al final de la prueba de RFI fueron incorporados en el cálculo de RFI.

— Emisión de metano: registrada durante dos períodos de 5 días consecutivos, con 2 días de descanso entre los dos períodos el primer año y 9 días de descanso el segundo año, y con 5 y 7 días (primer y segundo año respectivamente) para el acostumbamiento a los dispositivos de medición y estabilización de la liberación del SF<sub>6</sub> de las cápsulas en el rumen, previos al inicio del primer período de medición de cada año. Las variables relativas a la emisión de

CH<sub>4</sub> consideradas en este estudio son: CH<sub>4</sub> expresado como g/día, g/kg de MS consumida, g/Mcal de energía metabolizable (EM) consumida y g/kg de peso metabólico medio (PMM).

— Peso de rumen: registrado durante el proceso de faena de los novillos, en el frigorífico Breeders and Packers Uruguay el primer año y en el frigorífico Marfrig de Tarariras (Colonia, Uruguay) el segundo año, utilizando balanzas electrónicas industriales suministradas por los frigoríficos. Antes de ser pesados, los rúmenes fueron lavados con agua en el proceso habitual de la faena.

#### 3.4.4. Análisis estadístico

##### 3.4.4.1. Asociación entre RFI y emisiones de metano

Las variables relativas a emisiones de CH<sub>4</sub> fueron analizadas con base en un modelo lineal general con los efectos fijos principales del grupo de RFI, el año y el período de medición. Si bien en un primer análisis se incluyeron los efectos de las tres interacciones dobles entre los efectos principales, finalmente se mantuvo en el modelo solamente la interacción año × período por ser la única que tuvo una significancia cercana al 5 %:

$$Y_{ijk} = \mu + RFI_i + A_j + P_k + A_j \times P_k + e_{ijkl}$$

incluyendo el efecto fijo del nivel de RFI ( $RFI_i$  = alto y bajo), el efecto fijo del año ( $A_j$  = 1 y 2), el efecto fijo del período ( $P_k$  = 1 y 2), el efecto de la interacción entre el año y el período, y el residuo ( $e_{ijkl}$ ).

##### 3.4.4.2. Asociación entre emisiones de metano y peso de rumen

Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre la variable peso de rumen y cada una de las variables relativas a emisión de CH<sub>4</sub> entérico. También

se analizaron las variables relativas a la emisión de CH<sub>4</sub> usando un modelo de regresión lineal simple con el efecto del peso de rumen:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \times R_i$$

Donde  $Y_i$  son las variables aleatorias observadas de emisión de CH<sub>4</sub>,  $R_i$  es la variable peso de rumen,  $\beta_0$  es el intercepto y  $\beta_1$  es el coeficiente de regresión de la variable peso de rumen.

Finalmente, el peso de rumen se incluyó en un modelo lineal general de análisis de las variables relativas a la emisión de CH<sub>4</sub> como una covariable, junto con los efectos fijos del grupo de RFI, el año y período de medición, y sus interacciones:

$$Y_{ijk} = \mu + RFI_i + A_j + P_k + \beta(R_{ijk} - R..) + RFI_i \times A_j + RFI_i \times P_k + A_j \times P_k + e_{ijkl}$$

Donde  $Y_{ijk}$  son las variables aleatorias observadas de emisión de CH<sub>4</sub>,  $\mu$  es la media poblacional,  $RFI_i$  es el efecto fijo del nivel de RFI ( $RFI_i$  = alto y bajo),  $A_j$  es el efecto fijo del año ( $A_j = 1$  y  $2$ ),  $P_k$  es el efecto fijo del período de medición de CH<sub>4</sub> ( $P_k = 1$  y  $2$ ),  $\beta$  es el coeficiente de regresión,  $R_{ijk}$  es el valor de la covariable en el  $i$ -ésimo nivel de RFI,  $j$ -ésimo año y  $k$ -ésimo período,  $R..$  es la media de la covariable,  $RFI_i \times A_j$ ,  $RFI_i \times P_k$  y  $A_j \times P_k$  son los efectos de las interacciones entre los efectos principales y  $e_{ijkl}$  es el residuo.

Los análisis estadísticos se realizaron con la versión 9.0 del programa SAS (SAS Institute, Inc., Cary, NC, EE. UU.).

### 3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este estudio se realizaron mediciones de CH<sub>4</sub> entérico de novillos divergentes para RFI en el engorde con el objetivo de investigar la asociación entre estas características. Para ello se seleccionaron animales con valores extremos dentro de los grupos de alto y bajo RFI, cuyos valores promedio de RFI fueron 0,99 y -1,16 kg de MS/animal/día, respectivamente (cuadro 2.7).

### 3.5.1. Desempeño productivo de los novillos

La diferencia de RFI, medido en el engorde, entre los grupos de alta y baja con medición de metano fue significativa, manteniéndose como animales con valores extremos en relación con el grupo inicial con base en el cual fueron seleccionados. Como se puede observar en el cuadro 3.3, de los novillos que se obtuvieron datos de emisión de CH<sub>4</sub>, los del grupo de alto RFI en la fase de engorde consumieron 1,23 kg más de alimento en base seca por día que lo esperado en relación con su peso metabólico medio, ganancia de peso y espesor de grasa dorsal. Son animales ineficientes con RFI positivo, cuyo valor promedio se encuentra 1,05 unidades de desvío por encima de la media de RFI total. Por otro lado, los animales con bajo RFI en la fase de engorde consumieron 1,07 kg de materia seca menos que lo esperado con base en su peso metabólico medio, ganancia de peso y espesor de grasa dorsal. Son animales eficientes, con un valor promedio a 1 unidad de desvío por debajo de la media de RFI.

El análisis comparativo de las características tomadas en cuenta en el cálculo de RFI en el engorde (cuadro 3.3) indica que la mayor eficiencia de los novillos de bajo RFI se debió a un menor consumo de alimento que los de RFI alto a similares niveles de desempeño. Esto también ha sido observado en varios estudios como Kelly et al. (2010), Nkrumah et al. (2004), Nkrumah et al. (2007), McGee et al. (2014) y Grion et al. (2014) y está en concordancia con los resultados presentados en la sección 3. La media del consumo medio diario de alimento (en base seca) de los novillos de alto RFI fue significativamente superior al de los novillos de bajo RFI (12,30 vs. 10,08 kg MS/día;  $P < 0,05$ ), mientras que las medias de peso metabólico medio, ganancia de peso y espesor de grasa dorsal final de la evaluación fueron similares en ambos grupos de novillos ( $P > 0,05$ ) (cuadro 3.3). Ambos grupos de novillos tenían una edad similar al inicio de la evaluación de RFI en el engorde (493 y 500 días de edad los novillos de alto y bajo RFI. respectivamente;  $P > 0,05$ ).

Esta diferencia de niveles de consumo entre los novillos de alto y bajo RFI también se observó en algunas de las etapas de la fase de medición de CH<sub>4</sub>, que sucedió a la fase evaluación de RFI en el engorde, aunque la magnitud de la diferencia fue menor. Los novillos de alto RFI consumieron una cantidad significativamente mayor de alimento que los de bajo RFI en la etapa de adaptación a la medición de CH<sub>4</sub> durante el descanso entre las dos mediciones de CH<sub>4</sub> y durante el segundo período de medición de CH<sub>4</sub> ( $P < 0,05$ ). Sin embargo, la diferencia de consumo de alimento no fue significativa durante el primer período de medición de CH<sub>4</sub> ( $P > 0,05$ ).

El peso vivo de los novillos de alto y bajo RFI no difirió significativamente durante la fase de medición de CH<sub>4</sub> ( $P > 0,05$ ), así como tampoco lo hizo la ganancia de peso que registraron ambos grupos de animales ( $P > 0,05$ ).

Cuadro 3.3. Medias ajustadas (error estándar) de algunas características de los novillos de alto y bajo RFI en el engorde y valor de la probabilidad de que las medias sean iguales (valor de P). Los animales incluidos en el análisis cuentan con medición de la emisión de metano entérico.

	Grupo de RFI engorde		Valor de P
	Alto	Bajo	
N.º de animales	12	9	
<u>Fase de evaluación RFI engorde:</u>			
RFI <sup>1</sup> (kgMS/día)	1,229 (0,12)	-1,066 (0,13)	< 0,0001
Edad inicio (días)	493 (4,74)	500 (5,20)	0,3213
CMS <sup>2</sup> medio diario (kg/día)	12,298 (0,29)	10,078 (0,32)	< 0,0001
PMM <sup>3</sup> (kg)	98,2 (1,86)	99,5 (2,03)	0,6415
GMD <sup>4</sup> (kg/día)	1,490 (0,05)	1,470 (0,05)	0,7757
EGD <sup>5</sup> final (mm)	9,77 (0,73)	10,51 (0,80)	0,5014
<u>Fase de medición CH<sub>4</sub>:</u>			
CMS <sup>2</sup> medio adaptación (kg/día)	9,428 (0,36)	8,026 (0,40)	0,0180
CMS <sup>2</sup> medio período 1 (kg/día)	9,310 (0,35)	8,451 (0,39)	0,1184
CMS <sup>2</sup> medio descanso (kg/día)	10,513 (0,25)	8,608 (0,27)	< 0,0001
CMS <sup>2</sup> medio período 2 (kg/día)	11,487 (0,35)	10,007 (0,39)	0,0116
Peso inicio adaptación (kg)	520,8 (11,82)	527,6 (12,95)	0,7029
Peso inicio período 1 (kg)	521,7 (12,42)	528,8 (13,61)	0,7062
Peso final período 1 (kg)	524,8 (12,40)	535,3 (13,58)	0,5754
Peso inicio período 2 (kg)	539,9 (12,76)	545,8 (13,98)	0,7600
Peso final período 2 (kg)	540,3 (12,48)	547,8 (13,67)	0,6909
GMD <sup>4</sup> P1 y P2 <sup>6</sup> (kg/día)	1,318 (0,12)	1,363 (0,13)	0,8029

<sup>1</sup> RFI: consumo residual de alimento (*residual feed intake*).

<sup>2</sup> CMS: consumo de materia seca.

<sup>3</sup> PMM: peso metabólico medio.

<sup>4</sup> GMD: ganancia de peso media diaria.

<sup>5</sup> EGD: espesor de grasa dorsal.

<sup>6</sup> P1 y P2: períodos 1 y 2 de medición de metano.

### 3.5.2. Emisiones de metano entérico

En el cuadro 3.4 se muestra una descripción general de los datos de emisiones de CH<sub>4</sub> entérico obtenidos en este trabajo, expresados en g de CH<sub>4</sub>/día, g de CH<sub>4</sub>/kg de MS consumida, g de CH<sub>4</sub>/Mcal de EM consumida y g de CH<sub>4</sub>/kg de peso metabólico medio. Se consideraron 25 observaciones correspondientes a 21 animales.

Cuadro 3.4. Número de observaciones analizadas, media, desvío estándar, mínimo, máximo y coeficiente de variación de cada variable de emisión de CH<sub>4</sub> entérico.

Variable	n	Media	Desvío estándar	Mínimo	Máximo	CV (%) <sup>2</sup>
CH <sub>4</sub> (g/día)	25	258,68	131,32	60,60	493,30	50,76
CH <sub>4</sub> (g/kg MS <sup>1</sup> consumida)	25	27,13	13,21	6,26	52,68	48,71
CH <sub>4</sub> (g/Mcal EM <sup>1</sup> consumida)	25	8,95	4,36	2,07	17,39	48,71
CH <sub>4</sub> (g/kg de peso metabólico)	25	2,67	1,38	0,61	5,30	51,78

<sup>1</sup>MS: materia seca; EM: energía metabolizable.

<sup>2</sup>CV (%): coeficiente de variación expresado en porcentaje.

El rango de emisión de CH<sub>4</sub> entérico registrado en este trabajo, al igual que la media, son mayores a lo reportado por Hegarty et al. (2007), quien también midió la emisión de CH<sub>4</sub> de novillos de raza británica en engorde con la técnica del gas trazador SF<sub>6</sub> (media: 179,6 g CH<sub>4</sub>/día; máximo: 395,8 g CH<sub>4</sub>/día; mínimo: 84,4 g CH<sub>4</sub>/día).

El coeficiente de variación de la emisión de CH<sub>4</sub> de este trabajo, en las distintas formas de expresión, fue cercano al 50 % (cuadro 3.4), siendo de 52 % a 58 % en el primer año de medición y de 48 % en el segundo. Este valor es mayor al encontrado en otros trabajos donde también se utilizó el método del gas trazador SF<sub>6</sub> para medir las emisiones de CH<sub>4</sub> entérico, como Fitzsimons et al. (2013) y Hegarty et al. (2007), que obtuvieron coeficientes de variación de 25,8 % y 35,5 %, respectivamente.

Por otro lado, según Vlaming (2008), una posible fuente de variación al usar el método del gas trazador SF<sub>6</sub> para medir emisiones de CH<sub>4</sub> es la tasa de liberación del gas de las cápsulas de SF<sub>6</sub> utilizadas, donde cuanto mayor sea la tasa de liberación del SF<sub>6</sub>, mayor será la estimación del CH<sub>4</sub> producido. Estudiando este tema, Pinares-Patiño et al. (2008) encontraron que con un rango de tasa de liberación de las cápsulas de 2,214 a 3,594 mg/día no había un efecto significativo de la tasa de liberación del SF<sub>6</sub> en la estimación del CH<sub>4</sub> emitido, pero con un rango de 2,624 a 5,689 mg/día el efecto era significativo. En el presente trabajo las tasas de liberación de las cápsulas de SF<sub>6</sub> fueron de 3,14 a 5,25 mg/día en el primer año y de 3,51 a 7,79 mg/día en el segundo año de medición, lo que hace pensar que hayan afectado significativamente la estimación del CH<sub>4</sub> emitido y que hayan introducido mayor variación a los datos obtenidos.

Otra posible fuente de variación de este método del SF<sub>6</sub> es la medición precisa de las concentraciones ambientales de CH<sub>4</sub> y SF<sub>6</sub>, porque al utilizarse para el cálculo del CH<sub>4</sub> emitido afectan los resultados obtenidos. Berndt et al. (2014) recomendaron que los tubos colectores de aire ambiental estén distribuidos de forma de tomar muestras representativas del ambiente en que están los animales a los que se está midiendo las emisiones de CH<sub>4</sub>, considerando incluso las direcciones de los vientos. Además, ellos mencionaron la importancia de la limpieza de los tubos colectores para que no queden residuos de gases entre una medición y la siguiente, lo cual es especialmente importante en el caso de los tubos usados para medir el CH<sub>4</sub> y SF<sub>6</sub> ambiental, cuyas concentraciones atmosféricas son tan bajas en comparación con las emisiones de los animales que cualquier residuo podría afectar el dato registrado.

### 3.5.3. Asociación entre RFI y emisiones de metano entérico

Al analizar las emisiones de CH<sub>4</sub> entérico no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $P > 0,05$ ) entre los novillos de alto y bajo RFI para

ninguna de las cuatro formas de expresión de la emisión de CH<sub>4</sub>. En el cuadro 3.5 se muestran las medias ajustadas de las variables para los novillos de alto y bajo RFI en el engorde.

Cuadro 3.5. Emisiones de CH<sub>4</sub> entérico medias (error estándar) por grupo de RFI en el engorde y la significancia de la diferencia entre las medias.

	RFI <sup>1</sup> en el engorde		Valor de P
	Alto	Bajo	
n	14	11	
CH <sub>4</sub> (g/día)	225,41 (41,63)	197,28 (50,70)	0,6017
CH <sub>4</sub> (g/kg MS <sup>2</sup> consumida)	21,67 (4,38)	24,46 (5,33)	0,6224
CH <sub>4</sub> (g/Mcal EM <sup>2</sup> consumida)	7,15 (1,45)	8,07 (1,76)	0,6224
CH <sub>4</sub> (g/kg de peso metabólico medio)	2,32 (0,43)	2,02 (0,53)	0,5799

<sup>1</sup> Consumo residual de alimento.

<sup>2</sup> MS: materia seca; EM: energía metabolizable.

En el cuadro 3.6 se presentan las emisiones medias de CH<sub>4</sub> entérico de los novillos evaluados en cada año de medición, donde se observa que se encontró una tendencia (P < 0,10) a mayores emisiones de CH<sub>4</sub> en g/día y g/kg de peso metabólico medio en los animales del segundo año de medición.

Cuadro 3.6. Emisiones de CH<sub>4</sub> entérico medias (error estándar) por año de medición y la significancia de la diferencia entre las medias.

	Año		Valor de P
	1	2	
n	8	17	
CH <sub>4</sub> (g/día)	143,78 (68,72)	278,91 (31,12)	0,0858
CH <sub>4</sub> (g/kg MS <sup>1</sup> consumida)	17,83 (7,23)	28,31 (3,27)	0,1976
CH <sub>4</sub> (g/Mcal EM <sup>1</sup> consumida)	5,88 (2,39)	9,34 (1,08)	0,1976
CH <sub>4</sub> (g/kg de peso metabólico medio)	1,38 (0,71)	2,96 (0,32)	0,0559

<sup>1</sup>MS: materia seca; EM: energía metabolizable.

En el cuadro 3.7 se muestran las emisiones medias de CH<sub>4</sub> registradas en cada período de medición. Como se puede apreciar, no difirieron significativamente (P > 0,05) las emisiones de CH<sub>4</sub> entérico de los novillos registradas en el primer y segundo período de medición.

Cuadro 3.7. Emisiones medias (error estándar) de CH<sub>4</sub> entérico por período de medición y la significancia de la diferencia entre las medias.

	Período		Valor de P
	1	2	
n	16	9	
CH <sub>4</sub> (g/día)	234,74 (32,05)	187,95 (68,54)	0,5410
CH <sub>4</sub> (g/kg MS <sup>1</sup> consumida)	26,87 (3,37)	19,27 (7,21)	0,3486
CH <sub>4</sub> (g/Mcal EM <sup>1</sup> consumida)	8,87 (1,11)	6,36 (2,38)	0,3486
CH <sub>4</sub> (g/kg de peso metabólico medio)	2,37 (0,33)	1,97 (0,71)	0,6138

<sup>1</sup>MS: materia seca; EM: energía metabolizable.

La emisión de CH<sub>4</sub> entérico expresado en relación con la energía metabolizable consumida sigue la misma tendencia que al expresarla en relación con la materia seca consumida porque, como se puede ver en el cuadro 3.2, la concentración energética de las dietas fue igual en los dos años de medición.

La falta de evidencia de diferencias en emisiones de CH<sub>4</sub> entre animales de alto y bajo RFI de este trabajo (cuadro 3.5) es concordante con otros estudios internacionales. Mercadante et al. (2015) tampoco encontraron diferencias entre toros y vaquillonas de alto y bajo RFI evaluados con el método del gas trazador SF<sub>6</sub> en emisiones de CH<sub>4</sub> expresadas en g/día, g/kg de peso metabólico y g/kg de ganancia de peso (P > 0,1), aunque ellos observaron que los animales de bajo RFI emitieron más CH<sub>4</sub> por kg de alimento consumido (25,1 vs. 22,8 g CH<sub>4</sub>/kg MS consumida, P < 0,001). Los resultados de esta tesis también concuerdan con lo reportado por Oliveira et al. (2016), quienes, utilizando el mismo método del gas trazador SF<sub>6</sub>, no observaron diferencias entre toros y vaquillonas de alto y bajo RFI evaluados en feedlot en la emisión de CH<sub>4</sub> expresada en g/día, kg/año, g/kg de MS consumida, g/kg de FDN digestible y en porcentaje de la energía bruta consumida, y en pastoreo tampoco encontraron diferencias en la emisión de CH<sub>4</sub> expresada en g/día, kg/año, kg/kg de peso vivo y kg/kg de peso metabólico (P > 0,1), aunque sí encontraron que los animales de bajo RFI emitieron mayor cantidad de CH<sub>4</sub> al expresarlo en función del alimento consumido en pastoreo (P < 0,05) y verificaron

una tendencia de menor emisión expresada en g/kg de peso vivo y g/kg de peso metabólico en novillos de bajo RFI en feedlot ( $P < 0,1$ ).

Sin embargo, los resultados obtenidos en el presente trabajo difieren de lo reportado por Dini et al. (2019) y Nkrumah et al. (2006), quienes encontraron que los animales más eficientes emitieron menos  $CH_4$  ( $P < 0,05$ ). En los trabajos de Fitzsimons et al. (2013) y Hegarty et al. (2007), utilizando la técnica del gas trazador  $SF_6$ , reportaron que los novillos de bajo RFI emitieron menos  $CH_4$  que los de alto RFI al expresarlo en g/día ( $P < 0,05$ ), pero no en g/kg de MS consumida ( $P > 0,05$ ). Además, Fitzsimons et al. (2013) también reportaron menores emisiones de  $CH_4$  por kg de peso metabólico de los novillos de bajo RFI ( $P = 0,01$ ), mientras que Hegarty et al. (2007) señalaron una tendencia a una menor emisión de  $CH_4$  por kg de peso vivo ganado en los novillos de bajo RFI ( $P = 0,09$ ).

En este estudio, la cuantificación del consumo durante la medición de  $CH_4$  indica que hubo una reducción del consumo, en comparación con la prueba de evaluación de RFI, y también una disminución de la diferencia de consumo entre los grupos de alto y bajo RFI que pasan de 22 % a aproximadamente 15 % (cuadro 3.3). Esto puede ser atribuido a los implementos usados con la técnica del gas trazador  $SF_6$  para la medición del  $CH_4$ , que interfieren en el normal comportamiento de alimentación de los animales. Si bien no impiden el acceso al alimento, los bozales y tubos colectores de gas, sujetos a los costados de la cabeza de los novillos, dificultan pasar la cabeza en los comederos para su normal acceso.

Si bien el efecto en el consumo durante la medición de  $CH_4$  pudo haber enmascarado las diferencias entre los grupos de alto y bajo RFI, la alta variabilidad de los datos obtenidos es otra de las posibles causas por las que tal vez no se hayan detectado diferencias significativas entre la emisión de  $CH_4$  de los novillos con alto y bajo RFI. Esta alta variación en las emisiones de  $CH_4$  pudo deberse a una alta variabilidad entre animales en la producción de  $CH_4$  entérico de los novillos evaluados (lo que, dado el bajo número de datos obtenidos, dificulta la detección de diferencias entre grupos), al método de medición utilizado para estimar las

emisiones de CH<sub>4</sub> o a una combinación de ambos. La consideración de estos aspectos, al igual que la utilización de nuevos equipos para medición con SF<sub>6</sub>, como los arneses con posible menor interferencia en el consumo, contribuirán en futuras investigaciones sobre la interrelación entre RFI, consumo de alimento y emisiones de CH<sub>4</sub> entérico.

#### 3.5.4. Asociación entre emisiones de metano entérico y peso de rumen

El peso del rumen de los animales de los cuales se obtuvo dato de emisión de CH<sub>4</sub> entérico fue, en promedio, de 9,43 kg (desvío estándar: 1,03 kg), con un mínimo de 7,72 kg y un máximo de 11,88 kg. El coeficiente de variación fue de 10,88 %. No hubo diferencias significativas entre el peso del rumen de los novillos de alto y bajo RFI (9,9 y 9,4 kg, respectivamente; P = 0,154).

Se encontró que el peso de rumen no estuvo correlacionado (P > 0,05) con ninguna de las cuatro formas de expresión de las emisiones de CH<sub>4</sub> entérico. Los coeficientes de correlación de Pearson del peso de rumen con las emisiones de CH<sub>4</sub> expresadas en g/día, g/kg de MS consumida, g/Mcal de EM consumida y g/kg de peso metabólico medio fueron de -0,106 (P = 0,613), -0,201 (P = 0,337), -0,201 (P = 0,337) y -0,129 (P = 0,538), respectivamente.

Al analizar las variables relativas a la emisión de CH<sub>4</sub> entérico utilizando el modelo de regresión lineal simple con el efecto del peso de rumen, se encontró que este efecto no fue significativo para ninguna de las formas de expresión del CH<sub>4</sub> emitido (P > 0,05). En el cuadro 3.8 se muestran las estimaciones de los coeficientes de regresión con su error estándar y el valor de P, y el R<sup>2</sup> del modelo para cada variable de emisión de CH<sub>4</sub>.

Cuadro 3.8. Estimaciones de los coeficientes de regresión del modelo de regresión lineal simple de cada variable de emisión de CH<sub>4</sub> con el efecto del peso de rumen, con sus errores estándar (entre paréntesis) y valor de P, y el R<sup>2</sup> de cada modelo.

	$\beta_0$	Valor de P	$\beta_1$	Valor de P	R <sup>2</sup>
CH <sub>4</sub> (g/día)	385,6 (248,7)	0,1348	-135,5 (26,4)	0,6127	0,011
CH <sub>4</sub> (g/kg MS <sup>1</sup> consumida)	51,2 (24,7)	0,0493	-2,6 (2,6)	0,3365	0,040
CH <sub>4</sub> (g/Mcal EM <sup>1</sup> consumida)	16,9 (8,1)	0,0493	-0,8 (0,9)	0,3365	0,040
CH <sub>4</sub> (g/kg de peso metabólico medio)	4,3 (2,6)	0,1138	-0,2 (0,3)	0,5381	0,017

<sup>1</sup>MS: materia seca; EM: energía metabolizable.

Como se puede observar en el cuadro 3.8, los errores estándar de las estimaciones de los coeficientes de regresión son elevados y las estimaciones de los coeficientes de regresión, especialmente las de  $\beta_1$ , que son los coeficientes de la variable peso de rumen, no fueron significativos ( $P > 0,05$ ). El R<sup>2</sup> de los modelos, de acuerdo con lo anterior, resultó muy bajo. Esto concuerda con el hecho de que no se encontró correlación entre el peso de rumen y las variables relativas a la emisión de CH<sub>4</sub>.

Finalmente, en el análisis de la emisión de CH<sub>4</sub> expresada en g/día, g/kg de MS consumida, g/Mcal de EM consumida y g/kg de peso metabólico medio, donde se incluyó el peso de rumen como covariable junto con los efectos fijos del grupo de RFI, el año, el período y sus interacciones, no se encontraron efectos significativos ni de la covariable ni de ninguno de los tres efectos fijos principales (grupo de RFI, año y período) o de sus interacciones ( $P > 0,05$ ).

El volumen del rumen es uno de los múltiples factores asociados a la variación entre animales en las emisiones de CH<sub>4</sub>, así como el consumo total de alimento, la composición del alimento y la frecuencia de alimentación, entre otros (Pickering et al., 2015). Con base en la comparación de animales extremos dentro de líneas de selección divergentes por emisión de CH<sub>4</sub> por kg de MS consumida, se encontró que los animales que emitieron menos presentaron rúmenes que fueron 20 % más

pequeños (Goopy et al., 2014). Bond et al. (2017) observaron una asociación similar y reportaron diferencias significativas por padre, lo cual señala un componente genético. Más recientemente, Lambe et al. (2019) encontraron que tanto la emisión absoluta como la ajustada por el consumo de alimento estaban asociadas con el volumen ruminal.

No se encontraron estimaciones de esta asociación, posiblemente por la dificultad adicional de medir el peso o volumen del rumen. En el caso de ovinos, el uso de tomografía computarizada *in vivo* provee una manera más sencilla de realizar esta medición, pero esta tecnología no es aplicable en bovinos aún.

### 3.6. CONCLUSIONES

No se detectaron diferencias estadísticamente significativas en la emisión de metano entérico de novillos hereford de alto y bajo RFI durante su engorde a corral.

### 3.7. BIBLIOGRAFÍA

Berndt A, Boland TM, Deighton MH, Gere JI, Grainger C, Hegarty RS, Iwaasa AD, Koolaard JP, Lasseby KR, Luo D, Martin RJ, Martin C, Moate PJ, Molano G, Pinares-Patiño C, Ribaux BE, Swainson NM, Waghorn GC, Williams SRO. 2014. Guidelines for use of sulphur hexafluoride (SF6) tracer technique to measure enteric methane emissions from ruminants. Ministry of Primary Industries. Wellington, New Zealand. 66p.

BIF (Beef Improvement Federation). 2016. Guidelines for uniform beef improvement programs. Carolina del Sur, Estados Unidos. Clemson University. 183p.

Boadi DA, Wittenberg KM, Scott SL, Burton D, Buckley K, Small JA, Ominski KH. 2004. Effect of low and high forage diet on enteric and manure pack

greenhouse gas emissions from a feedlot. *Canadian Journal of Animal Science*. 84 (3): 445–453. <https://doi.org/10.4141/A03-079>

Bond J J, Cameron M, Donaldson AJ, Austin KL, Harden S, Robinson DL, Oddy VH. 2017. Aspects of digestive function in sheep related to phenotypic variation in methane emissions. *Animal Production Science*. 59 (1): 55–65. <https://doi.org/10.1071/AN17141>

Cambra M, Garcia P, Estellés F, Torres A. 2008. Estimación de las emisiones de los rumiantes en España: El factor de conversión de metano. *Archivos de Zootecnia*. 57: 89–101.

Dini Y, Cajarville C, Gere JJ, Fernandez S, Fraga M, Pravia MI, Navajas EA, Ciganda VS. 2019. Association between residual feed intake and enteric methane emissions in Hereford steers. *Translational Animal Science*. 3 (1): 239–246. <https://doi.org/10.1093/tas/txy111>

Fitzsimons C, Kenny DA, Deighton MH, Fahey AG, McGee M. 2013. Methane emissions, body composition, and rumen fermentation traits of beef heifers differing in residual feed intake. *Journal of Animal Science*. 91 (12): 5789–5800. <https://doi.org/10.2527/jas2013-6956>

Gere JJ, Gratton R. 2010. Simple, low-cost flow controllers for time averaged atmospheric sampling and other applications. *Latin American Applied Research*. 40 (4): 377–381.

Goopy JP, Donaldson A, Hegarty R, Vercoe PE, Haynes F, Barnett M, Oddy VH. 2014. Low-methane yield sheep have smaller rumens and shorter rumen retention time. *British Journal of Nutrition*. 111 (4): 578–585. <https://doi.org/10.1017/S0007114513002936>

Grion AL, Mercadante MEZ, Cyrillo JNSG, Bonilha SFM, Magnani E, Branco RH. 2014. Selection for feed efficiency traits and correlated genetic responses in feed

intake and weight gain of Nelore cattle. *Journal of Animal Science*. 92 (3): 955–965. <https://doi.org/10.2527/jas2013-6682>

Hegarty RS, Goopy JP, Herd RM, 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>

INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) (Uruguay). 2015. Protocolo para determinación de emisión de metano en rumiantes: técnica del trazador SF6 para períodos de medición prolongados. Montevideo, Uruguay. 16p.

Johnson KA, Johnson DE. 1995. Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, 73 (8): 2483–2492. <https://doi.org/10.2527/1995.7382483x>

Kelly AK, McGee M, Crews DH, Fahey AG, Wylie AR, Kenny DA. 2010. Effect of divergence in residual feed intake on feeding behavior, blood metabolic variables, and body composition traits in growing beef heifers. *Journal of Animal Science*. 88 (1): 109–123. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2196>

Lambe N, Miller G, McLean K, Gordon J, Dewhurst R. 2019. Prediction of methane emissions in sheep using computed tomography (CT) measurements of rumen volume. En: *British Society of Animal Science Annual Conference (75<sup>o</sup>, 2019, Edinburgo, Escocia)*. *Advances in Animal Biosciences*. Cambridge. Cambridge University Press. 152.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1017/S2040470019000013>

McGee M, Welch CM, Ramirez JA, Carstens GE, Price WJ, Hall JB, Hill RA. 2014. Relationships of feeding behaviors with average daily gain, dry matter intake, and residual feed intake in Red Angus–sired cattle. *Journal of Animal Science*. 92 (11): 5214–5221. <https://doi.org/10.2527/jas2014-8036>

Mercadante MEZ, De Melo Caliman AP, Canesin RC, Bonilha SFM, Berndt A, Frighetto RTS, Magnani E, Branco RH. 2015. Relationship between residual

feed intake and enteric methane emission in Nelore cattle. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 44 (7): 255–262. <https://doi.org/10.1590/S1806-92902015000700004>

MVOTMA (Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Dirección Nacional de Medio Ambiente. División de Cambio Climático). 2017. Primera Contribución Nacional Determinada al Acuerdo de Paris. Montevideo, Uruguay. 29p. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/contribucion>

MVOTMA (Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Dirección Nacional de Medio Ambiente. Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático). 2019. Inventario nacional de gases de efecto invernadero 2017. Montevideo, Uruguay. 399p.

Nkrumah JD, Basarab JA, Price MA, Okine EK, Ammoura A, Guercio S, Hansen C, Benkel B, Moore SS. 2004. Different measures of energetic efficiency and their phenotypic relationships with growth, feed intake, ultrasound, and carcass measurements in hybrid cattle. *Journal of Animal Science*, 82(8), 2451–2459. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-767>

Nkrumah JD, Basarab JA, Price MA, Okine EK, Ammoura A, Guercio S, Hansen C, Li C, Benkel B, Murdoch B, Moore SS. 2007. Genetic and phenotypic relationships of feed intake and measures of efficiency with growth and carcass merit of beef cattle. *Journal of Animal Science*. 85 (10): 2711–2720. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-767>

Nkrumah JD, Okine EK, Mathison GW, Schmid K, Li C, Basarab JA, Price MA, Wang Z, Moore SS. 2006. Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. *Journal of Animal Science*. 84 (1): 145–153. <https://doi.org/10.2527/2006.841145x>

- Oliveira LF, Ruggieri AC, Branco RH, Cota OL, Canesin RC, Costa HJU, Mercadante MEZ. 2016. Feed efficiency and enteric methane production of Nellore cattle in the feedlot and on pasture. *Animal Production Science*. 58: 886–893.  
<https://doi.org/10.1071/AN16303>
- Pickering NK, Oddy VH, Basarab J, Cammack K, Hayes B, Hegarty RS, Lassen J, McEwan JC, Miller S, Pinares-Patiño CS, De Haas Y. 2015. Animal board invited review: genetic possibilities to reduce enteric methane emissions from ruminants. *Animal*. 9 (09): 1431–1440.  
<https://doi.org/10.1017/S1751731115000968>
- Pinares-Patiño CS, Machmüller A, Molano G, Smith A, Vlaming J B, Clark H. 2008. The SF6 tracer technique for measurements of methane emission from cattle - Effect of tracer permeation rate. *Canadian Journal of Animal Science*. 88 (2): 309–320. <https://doi.org/10.4141/CJAS07117>
- Vlaming JB. 2008. Quantifying variation in estimated methane emission from ruminants using the SF6 tracer technique. Thesis Doctor of Philosophy in Animal Science. Palmerston North, New Zealand. Massey University. 186p.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5052.7440>

#### 4. DISCUSIÓN GENERAL

La eficiencia de conversión medida como RFI es una característica con valor económico para la ganadería, ya que su mejora está asociada a la reducción de costos de producción sin afectar el desempeño de los animales.

Dada la forma de estimación de RFI, como residuo de un modelo de regresión, es esperable que el RFI sea independiente de las variables independientes consideradas (peso metabólico, ganancia diaria y espesor de grasa) y correlacionado con el consumo de alimento (variable dependiente), como fuera reportado por diversos estudios en el contexto internacional (Kelly et al., 2010a, Nkrumah et al., 2004, Basarab et al., 2003, Arthur et al., 2001a). Resultados nacionales con base en las mediciones de RFI en la recría de toritos hereford también reportaron correlaciones de cero con peso metabólico, ganancia diaria y espesor de grasa, y una correlación fenotípica de 0,55 entre RFI y CMS (Pravia et al., 2022). En este primer estudio nacional del RFI en engorde a corral, los resultados confirman lo encontrado en durante la recría, siendo la correlación entre RFI y CMS de 0,63 ( $P < 0,001$ ).

El cálculo de RFI en engorde se realizó con base en la misma ecuación utilizada para la recría, que se basa en la propuesta original de Koch et al. (1963) a la cual se incluye el espesor de grasa subcutánea (Basarab et al., 2003). Respecto a esta ecuación, también se evaluaron posibles mejores niveles de ajuste de la ecuación por la inclusión de otras mediciones de espesor de grasa (espesor de grasa en la cadera en el cuadril o P8) y AOB, así como mediciones realizadas en otros momentos de la prueba. No se identificaron mejoras significativas en los modelos alternativos que se evaluaron respecto al modelo utilizado para la fase de recría.

La comparación de grupos de novillos, definidos por su RFI en el engorde, indicó que los animales más eficientes consumieron 2,195 kg MS menos que los más eficientes (17,8 % menos). A su vez, no existieron diferencias significativas en peso, ganancia de peso o deposición de grasa. Estos resultados fueron similares a

los encontrados durante la fase de recría, en la cual la diferencia de CMS fue de 1,653 kg MS (16,6 % menos), sin diferencias en su desempeño productivo entre grupos.

La correspondencia de las comparaciones entre grupos de RFI en el engorde y recría está en concordancia con la correlación de 0,71 entre RFI de recría y engorde, lo cual coincide con lo reportado en estudios internacionales (Cassady et al., 2016, McGee et al., 2014, Archer et al., 2002, Arthur et al., 2001b). Esto es esperable dado que los momentos de evaluación son consecutivos y cercanos en el tiempo, a pesar de los cambios de la dieta utilizada en cada fase.

En síntesis, los resultados de este primer trabajo confirman la hipótesis de que novillos de alta eficiencia (bajo RFI) durante la recría en confinamiento tienen también una alta eficiencia (bajo RFI) en el engorde en confinamiento. El estudio permite también cuantificar la magnitud de las diferencias de CMS entre los animales más y menos eficientes en el engorde y la recría, representando 19,0 % y 18,0 % del CMS promedio en cada fase, respectivamente. Esto sugiere que el impacto por la mejora de la eficiencia de conversión puede tener un efecto importante en la ecuación económica de los engordes intensivos a corral, así como en propuestas de recría y engorde intensivos, ya que los beneficios se mantienen en ambas etapas.

Desde el punto de mejoramiento genético, estos resultados indicarían que la selección por mayor eficiencia en la recría, medido como RFI, estaría asociada con mayor eficiencia de conversión en el engorde en confinamiento. Las estimaciones internacionales de las correlaciones genéticas indican una muy alta asociación (Archer et al., 2002, Arthur et al., 2001b), que sería necesario confirmar en ámbito nacional. Asimismo, resulta importante analizar el impacto de las diferencias en cuanto a la calidad del producto, tanto calidad de canal como de carne, luego del engorde a corral, y en comparación con los estudios realizados con engorde en pastoreo más suplementación reportados por (Pravia et al., 2018).

Se han postulado varias explicaciones para las diferencias en eficiencia de conversión de los animales (Casal et al., 2018, Nkrumah et al., 2007b, Nkrumah et al., 2006, Herd et al., 2004, Richardson y Herd, 2004). La emisión de CH<sub>4</sub> entérico representa una pérdida de energía, por lo cual es esperable que los animales más eficientes emitan menos metano que los menos eficientes, siendo esta la segunda hipótesis de esta tesis.

La comparación de las emisiones de CH<sub>4</sub> entérico, medidas a través de la técnica del SF<sub>6</sub>, en subgrupos de animales de alto y bajo RFI, señala diferencias estadísticamente no significativas según el nivel de RFI. No se encontraron diferencias en emisiones absolutas de CH<sub>4</sub> entérico ni en relación con el CMS o del peso metabólico.

Otros trabajos han reportado resultados similares (Oliveira et al., 2016, Mercadante et al., 2015). Sin embargo, la información recabada en este estudio tuvo algunas limitantes, que podrían explicar el alto coeficiente de variación de los datos de emisión de CH<sub>4</sub> de alrededor del 50 % y la ausencia de diferencias estadísticamente significativas. Además, si bien se preveía analizar las emisiones de CH<sub>4</sub> entérico de 36 animales, el número efectivo de datos fue de 21, de los cuales sólo el 19 % contaron con dos mediciones por evaluación. Esto se debió a fallas y averías ocurridas durante los períodos de medición en los tubos recolectores, enganches rápidos y mangueras, a pérdidas completas de los bozales con todos los materiales de medición, al descarte de tubos colectores porque no tuvieron la presión adecuada al finalizar las mediciones, y al descarte de datos que quedaron por fuera del rango establecido como válido. Tal vez el método del gas trazador SF<sub>6</sub> no sea el más adecuado para medir las emisiones de CH<sub>4</sub> entérico de animales en confinamiento, ya que los animales pueden sacarse o romper los implementos de medición con mayor facilidad, especialmente si se colocan los tubos colectores de gas con bozales a los costados de la cabeza. Probablemente la colocación de los tubos sobre el lomo con arneses tipo «mochila» tenga menores pérdidas y averías de los materiales de medición.

La experiencia del ensayo también indicaría que sería bueno contar con por lo menos cuatro tubos colectores de aire del ambiente, uno hacia cada lado del corral de confinamiento, para captar los posibles efectos de cambios en la dirección del viento. Es importante también que los tubos que se utilizan para tomar las muestras de  $\text{CH}_4$  y  $\text{SF}_6$  ambientales sean siempre los mismos y que se utilicen exclusivamente para ese fin, ya que por más que los tubos se limpian con  $\text{N}_2$  entre mediciones sucesivas, siempre pueden quedar trazas de esos gases en los tubos que pueden afectar futuras mediciones. Por lo tanto, si los tubos utilizados para mediciones en animales luego fueran usados para mediciones en el ambiente, como las concentraciones de gases obtenidas de las exhalaciones de los animales son mucho mayores que las del ambiente, la contaminación de los tubos usados previamente en animales podría afectar los resultados de futuras mediciones ambientales y, por el método de cálculo, las estimaciones de las emisiones de animales se verían afectadas.

Cabe destacar la importancia de continuar con las mediciones de  $\text{CH}_4$  entérico en asociación con RFI, así como con CMS y desempeño productivo, como es factible de obtener en las instalaciones donde se realizan las pruebas de eficiencia de conversión, para investigar no sólo la asociación con RFI, sino también con el consumo del alimento. Esto contribuirá a optimizar las estrategias de mitigación de emisiones de  $\text{CH}_4$  entérico, teniendo en cuenta la producción ganadera y las emisiones absolutas de  $\text{CH}_4$  entérico por el sector.

## 5. BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Adam I, Young BA, Nicol AM, Degen AA. 1984. Energy cost of eating in cattle given diets of different form. *Animal Production*. 38 (1): 53-56.  
<https://doi.org/10.1017/S0003356100041349>.
- Alemu, AW, Vyas, D, Manafiazar G, Basarab JA, Beauchemin KA. 2017. Enteric methane emissions from low- and high-residual feed intake beef heifers measured using greenfeed and respiration chamber techniques. *Journal of Animal Science*. 95 (8): 3727-3737. <https://doi.org/10.2527/jas.2017.1501>
- Almeida A K, Hegarty RS, Cowie A. 2021. Meta-analysis quantifying the potential of dietary additives and rumen modifiers for methane mitigation in ruminant production systems. *Animal Nutrition*. 7 (4): 1219-1230.  
<https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.09.005>
- Anderson KL, Nagaraja TG, Morrill JL, Avery TB, Galitzer SJ, Boyer JE, Al AET. 1987. Ruminal microbial development in conventionally or early-weaned calves 1. *Culture Media for Bacterial Enumeration*. 64 (4): 1215-1226.
- Archer JA, Arthur PF, Herd RM, Parnell PF, Pitchford WS. 1997. Optimum Postweaning Test for Measurement of Growth Rate, Feed Intake, and Feed Efficiency in British Breed Cattle. *Journal of Animal Science*. 75 (8): 2024-2032.  
<https://doi.org/10.2527/1997.7582024x>
- Archer JA, Reverter A, Herd RM., Johnston DJ, Arthur PF. 2002. Genetic Variation in Feed Intake and Efficiency of Mature Beef Cows and Relationships With Postweaning Measurements. En: *World Congress on Genetics Applied to Livestock Production (7°, 2002, Montpellier, Francia)*. Proceedings. 221-224.
- Archer JA, Richardson EC, Herd RM, Arthur PF. 1999. Potential for selection to improve efficiency of feed use in beef cattle: a review. *Australian Journal of Agricultural Research*. 50 (2): 147-161. <https://doi.org/10.1071/A98075>
- Arndt C, Hristov AN, Price WJ, McClelland SC, Pelaez AM, Cueva SF, Oh J. 2022. Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by

- ruminants can help meet the 1.5 °C target by 2030 but not 2050. 1-10.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.2111294119/-/DCSupplemental.Published>
- Arthur JPF, Herd RM. 2008. Residual feed intake in beef cattle. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 37 (spe): 269-279. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008001300031>
- Arthur PF, Archer JA, Johnston DJ, Herd RM, Richardson EC, Parnell PF. 2001a. Genetic and phenotypic variance and covariance components for feed intake, feed efficiency, and other postweaning traits in Angus cattle. *Journal of Animal Science*, 79 (11): 2805-2811. <https://doi.org/10.2527/2001.79112805x>
- Arthur PF, Herd RM, Basarab JA. 2010. The role of cattle genetically efficient in feed utilisation in an Australian carbon trading environment. *Australian Farm Business Management Journal*, 7 (2): 5-14. [En línea]. Consultado el 7 de abril del 2018. Disponible en:  
<http://search.informit.com.au/documentSummary;dn=819944881365450;res=IELBUS>
- Arthur PF, Herd RM, Wilkins JF, Archer JA. 2005. Maternal productivity of Angus cows divergently selected for post-weaning residual feed intake. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 45 (7-8): 985-993.  
<https://doi.org/10.1071/EA05052>
- Arthur PF, Pryce JE, Herd RM. 2014. Lessons learnt from 25 years of feed efficiency research in Australia. En: *World Congress of Genetics Applied to Livestock Production (10°, 2014, Vancouver, Canadá)*. Proceedings. American Society of Animal Science. 18-22.
- Arthur PF, Renand G, Krauss D. 2001b. Genetic and phenotypic relationships among different measures of growth and feed efficiency in young Charolais bulls. *Livestock Production Science*. 68 (2-3): 131-139.  
[https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(00\)00243-8](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(00)00243-8)
- Basarab JA, Beauchemin KA, Baron VS, Ominski KH, Guan LL, Miller SP, Crowley JJ. 2013. Reducing GHG emissions through genetic improvement for feed

- efficiency: effects on economically important traits and enteric methane production. *Animal : An International Journal of Animal Bioscience*. 7 (2): 303-315. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000888>
- Basarab JA, Colazo MG, Ambrose DJ, Novak S, McCartney D, Baron VS. 2011. Residual feed intake adjusted for backfat thickness and feeding frequency is independent of fertility in beef heifers. *Canadian Journal of Animal Science*. 91(4): 573-584. <https://doi.org/10.4141/cjas2011-010>
- Basarab JA, McCartney D, Okine EK, Baron VS. 2007. Relationships between progeny residual feed intake and dam productivity traits. *Canadian Journal of Animal Science*: 87 (4): 489-502. <https://doi.org/10.4141/CJAS07026>
- Basarab JA, Price MA, Aalhus JL, Okine EK, Snelling WM, Lyle KL. 2003. Residual feed intake and body composition in young growing cattle. *Canadian Journal of Animal Science*. 83(2): 189-204. <https://doi.org/10.4141/A02-065>
- Beauchemin KA, Kreuzer M, O'Mara F, McAllister TA. 2008. Nutritional management for enteric methane abatement: A review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 48(1-2): 21-27. <https://doi.org/10.1071/EA07199>
- Beauchemin KA, McGinn SM. 2006. Enteric methane emissions from growing beef cattle as affected by diet and level of intake. *Canadian Journal of Animal Science*. 86 (3): 401-408.
- Berry DP, Crowley JJ. 2013. Cell biology Symposium: Genetics of feed efficiency in dairy and beef cattle 1. *Journal of Animal Science*. 91 (4): 1594-1613. <https://doi.org/10.2527/jas2012-5862>
- Berry DP, Kennedy E, Crowley JJ. 2014. Genetics of Feed Intake and Efficiency. En: Garrick y Ruvinsky (Eds.). *The Genetics of Cattle*. Oxfordshire, Reino Unido; Boston, Estados Unidos. CAB International. 502-522.
- BIF (Beef Improvement Federation). 2016. Guidelines for uniform beef improvement programs. Carolina del Sur, Estados Unidos. Clemson University. 183 p.
- Black TE, Bischoff KM, Mercadante VRG, Marquezini GHL, Dilorenzo N, Chase CC,

- Coleman SW, Maddock TD, Lamb GC. 2013. Relationships among performance, residual feed intake, and temperament assessed in growing beef heifers and subsequently as 3-year-old, lactating beef cows. *Journal of Animal Science*. 91 (5): 2254-2263. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5242>
- Blaxter KL, Clapperton JL. 1965. Prediction of the amount of methane produced by ruminants. *British Journal of Nutrition*. 19 (01): 511. <https://doi.org/10.1079/BJN19650046>
- Bonilha SFM, Branco RH, Mercadante MEZ, Dos Santos Gonçalves Cyrillo JN, Monteiro FM, Ribeiro EG. 2017. Digestion and metabolism of low and high residual feed intake Nellore bulls. *Tropical Animal Health and Production*. 49 (3): 529-535. <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1224-9>
- Buddle BM, Denis M, Attwood GT, Altermann E, Janssen PH, Ronimus RS, Pinares-Patiño CS, Muetzel S, Neil Wedlock D. 2011. Strategies to reduce methane emissions from farmed ruminants grazing on pasture. *Veterinary Journal*. 188 (1): 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2010.02.019>
- Cambra-López M, Garcia Rebollar P, Estellés F, Torres A. 2008. Estimación de las emisiones de los rumiantes en España: El factor de conversión de metano. *Archivos de Zootecnia*. 57: 89-101.
- Cameron ND. 1992. Correlated responses in slaughter and carcass traits of crossbred progeny to selection for carcass lean content in sheep. *Animal Production*. 54 (3): 379-388. <https://doi.org/10.1017/S0003356100020833>
- Casal A, Garcia-Roche M, Navajas EA, Cassina A, Carriquiry M. 2018. Hepatic mitochondrial function in Hereford steers with divergent residual feed intake phenotypes. *Journal of Animal Science*, 96 (10): 4431-4443. <https://doi.org/10.1093/ofid/ofy092/4987343>
- Cassady CJ, Felix TL, Beaver JE, Shike DW, Taylor J, Kerley M, Schnabel R, Marques E, Garrick D, Hansen S, Loy D, Weaver R, Seabury C, Beaver J, Shike D, Fahrenkrug S, Spangler M, Johnson K, Neiberghs H, Pollak J. 2016. Effects of timing and duration of test period and diet type on intake and feed efficiency of Charolais-

- sired cattle. *Journal of Animal Science*. 94 (11): 4748-4758.  
<https://doi.org/10.2527/jas2016-0633>
- CREA Uruguay. 2017. 34.ª Jornada de Información Económica CREA, LATU 23/11/17. Resultados físicos y económicos de las empresas CREA ganaderas. Ing. Agr. Gonzalo Ducós. Coordinador Ganadero de FUCREA. [En línea]. Consultado el 9 de abril del 2018. Disponible en: [http://fucrea.org/system/comfy/cms/files/files/000/000/670/original/Resultados\\_CREA\\_ganaderos\\_Duc%C3%B3s.pdf](http://fucrea.org/system/comfy/cms/files/files/000/000/670/original/Resultados_CREA_ganaderos_Duc%C3%B3s.pdf).
- Crowley JJ, McGee M, Kenny DA, Crews DH, Evans RD, Berry DP. 2010. Phenotypic and genetic parameters for different measures of feed efficiency in different breeds of Irish performance-tested beef bulls. *Journal of Animal Science*. 88 (3): 885-894. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-1852>
- 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>
- Deighton MH, Williams SRO, Hannah MC, Eckard RJ, Boland TM, Wales WJ, Moate PJ. 2014. A modified sulphur hexafluoride tracer technique enables accurate determination of enteric methane emissions from ruminants. *Animal Feed Science and Technology*. 197: 47-63.  
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.08.003>
- Dini Y, Cajarville C, Gere JJ, Fernandez S, Fraga M, Pravia MI, Navajas EA, Ciganda VS. 2019. Association between residual feed intake and enteric methane emissions in Hereford steers. *Translational Animal Science*. 3(1): 239-246.  
<https://doi.org/10.1093/tas/txy111>
- Donoghue KA, Herd RM, Bird SH, Arthur PF, Hegarty RF. 2013. Preliminary genetic parameters for methane production in Australian beef cattle. En: Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics (20°, 2013, Napier, New Zealand). Proceedings. 290–293.

- Exton S. 2001. Testing beef cattle for net feed efficiency—Standards manual. Performance Beef Breeders Association, Armidale, NSW. 20 p.
- Fitzsimons C, Kenny DA, Deighton MH, Fahey AG, McGee M. 2013. Methane emissions, body composition, and rumen fermentation traits of beef heifers differing in residual feed intake. *Journal of Animal Science*. 91 (12): 5789-5800. <https://doi.org/10.2527/jas2013-6956>
- Gerber PJ, Hristov AN, Henderson B, Makkar H, Oh J, Lee C, Meinen R, Montes F, Ott T, Firkins J, Rotz A, Dell C, Adesogan AT, Yang WZ, Tricarico JM, Kebreab E, Waghorn G, Dijkstra J, Oosting S. 2013. Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review. *Animal : An International Journal of Animal Bioscience*. 7 (2): 220-234. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000876>
- Gerber PJ, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, Falcucci A, Tempio G. 2013. Tackling climate change through livestock. A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Goopy JP, Donaldson A, Hegarty R, Vercoe PE, Haynes F, Barnett M, Oddy VH. 2014. Low-methane yield sheep have smaller rumens and shorter rumen retention time. *British Journal of Nutrition*. 111 (4): 578-585. <https://doi.org/10.1017/S0007114513002936>
- Grion AL, Mercadante MEZ, Cyrillo JNSG, Bonilha SFM, Magnani E, Branco RH. 2014. Selection for feed efficiency traits and correlated genetic responses in feed intake and weight gain of Nelore cattle. *Journal of Animal Science*. 92 (3): 955-965. <https://doi.org/10.2527/jas2013-6682>
- Guo YQ, Liu JX, Lu Y, Zhu WY, Denman SE, McSweeney CS. 2008. Effect of tea saponin on methanogenesis, microbial community structure and expression of *mcrA* gene, in cultures of rumen micro-organisms. *Letters in Applied Microbiology*. 47 (5): 421-426. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2008.02459.x>

- Hafla AN, Lancaster PA, Carstens GE, Forrest DW, Fox JT, Forbes TDA, Davis ME, Randel RD, Holloway JW. 2012. Relationships between feed efficiency, scrotal circumference, and semen quality traits in yearling bulls. *Journal of Animal Science*. 90 (11): 3937-3944. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4029>
- Hegarty RS, Goopy JP, Herd RM, 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>
- Herd RM, Archer JA, Arthur PF. 2003. Reducing the cost of beef production through genetic improvement in residual feed intake : Opportunity and challenges to application. *Journal of Animal Science*. 81 (1): 9-17. [https://doi.org/2003.8113\\_suppl\\_1E9x](https://doi.org/2003.8113_suppl_1E9x)
- Herd RM, Arthur PF. 2009. Physiological basis for residual feed intake. *Journal of Animal Science*, 87 (14): 64-71. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-1345>
- Herd RM, Bishop SC. 2000. Genetic variation in residual feed intake and its association with other production traits in British Hereford cattle. *Livestock Production Science*. 63 (2): 111-119. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00122-0](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00122-0)
- Herd RM, Oddy VH, Richardson EC. 2004. Biological basis for variation in residual feed intake in beef cattle. 1. Review of potential mechanisms. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 44 (4-5): 423-430. <https://doi.org/10.1071/ea02220>
- Hristov AN, Kebreab E, Niu M, Oh J, Bannink A, Bayat AR, Boland TM, Brito AF, Casper DP, Crompton LA, Dijkstra J, Eugène M, Garnsworthy PC, Haque N, Hellwing ALF, Huhtanen P, Kreuzer M, Kuhla B, Lund P, Madsen J, Martin C, Moate PJ, Muetzel S, Muñoz C, Peiren N, Powell JM, Reynolds CK, Schwarm A, Shingfield KJ, Storlien TM, Weisbjerg MR, Yáñez-Ruiz DR, Yu Z. 2018. Symposium review: Uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models. *Journal of Dairy Science*. 101 (7): 6655-6674. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13536>

- Hristov AN, Oh J, Giallongo F, Frederick T, Harper MT, Weeks H, Branco AF, Price WJ, Moate PJ, Deighton MH, Williams SRO, Kindermann M, Duval S. 2016. Short communication: Comparison of the GreenFeed system with the sulfur hexafluoride tracer technique for measuring enteric methane emissions from dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 99 (7): 5461-5465.  
<https://doi.org/10.3168/jds.2016-10897>
- Inoue K, Kobayashi M, Shoji N, Kato K. 2011. Genetic parameters for fatty acid composition and feed efficiency traits in Japanese Black cattle. *Animal*. 5 (7): 987-994. <https://doi.org/10.1017/S1751731111000012>
- Johnson KA, Johnson DE. 1995. Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*. 73 (8): 2483-2492. <https://doi.org/10.2527/1995.7382483x>
- Jones FM, Accioly JM, Copping KJ, Deland MPB, Graham JF, Hebart ML, Herd RM, Laurence M, Lee SJ, Speijers EJ, Pitchford WS. 2017. Divergent breeding values for fatness or residual feed intake in Angus cattle. 1. Pregnancy rates of heifers differed between fat lines and were affected by weight and fat. *Animal Production Science*. 58 (1): 33-42. <https://doi.org/10.1071/AN14583>
- Kelly AK, McGee M, Crews DH, Fahey AG, Wylie AR, Kenny DA. 2010a. Effect of divergence in residual feed intake on feeding behavior, blood metabolic variables, and body composition traits in growing beef heifers. *Journal of Animal Science*. 88 (1): 109-123. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2196>
- Kelly AK, McGee M, Crews DH, Sweeney T, Boland TM, Kenny DA. 2010b. Repeatability of feed efficiency, carcass ultrasound, feeding behavior, and blood metabolic variables in finishing heifers divergently selected for residual feed intake. *Journal of Animal Science*. 88 (10): 3214-3225.  
<https://doi.org/10.2527/jas.2009-2700>
- Koch R, Swiger LA, Chambers D, Gregory KE. 1963. Efficiency of feed use in beef cattle. *Journal of Animal Science*. 22 (2): 486-494.
- Kolath W, Kerley M, Golden JW, Keisler DH. 2006. The relationship between mitochondrial respiration and residual feed intake in Angus steers. *Journal of*

- Animal Science. 84 (4): 861-865.
- 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>
- Manafiazar G, Basarab J, McKeown L, Stewart-Smith J, Baron VS, MacNeil M, Plastow G. 2017. Optimizing feed intake recording and feed efficiency estimation to increase the rate of genetic gain for feed efficiency in beef cattle. *Canadian Journal of Animal Science*. 97 (3): 456-465. <https://doi.org/10.1139/CJAS-2016-0118>
- Manzanilla-Pech CIV, De Haas Y, Hayes BJ, Veerkamp RF, Khansefid M, Donoghue KA, Arthur PF, Pryce JE. 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/jas2016-0431>
- McGee M, Welch CM, Ramirez JA, Carstens GE, Price WJ, Hall JB, Hill RA. 2014. Relationships of feeding behaviors with average daily gain, dry matter intake, and residual feed intake in Red Angus–sired cattle. *Journal of Animal Science*. 92 (11): 5214-5221. <https://doi.org/10.2527/jas2014-8036>
- Mercadante MEZ, De Melo Caliman AP, Canesin RC, Bonilha SFM, Berndt A, Frighetto RTS, Magnani E, Branco RH. 2015. Relationship between residual feed intake and enteric methane emission in Nelore cattle. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 44 (7): 255-262. <https://doi.org/10.1590/S1806-92902015000700004>
- Moe PW, Tyrrell HF. 1979. Methane Production in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. 62 (10): 1583-1586. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(79\)83465-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(79)83465-7)
- MVOTMA (Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Dirección Nacional de Medio Ambiente. Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático). 2019. Inventario nacional de gases de efecto invernadero 2017. Montevideo, Uruguay. 399 p.

- Nkrumah JD, Basarab JA, Price MA, Okine EK, Ammoura A, Guercio S, Hansen C, Benkel B, Moore SS. 2004. Different measures of energetic efficiency and their phenotypic relationships with growth, feed intake, ultrasound, and carcass measurements in hybrid cattle. *Journal of Animal Science*. 82 (8): 2451-2459. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-767>
- Nkrumah JD, Basarab JA, Price MA, Okine EK, Ammoura A, Guercio S, Hansen C, Li C, Benkel B, Murdoch B, Moore SS. 2007a. Genetic and phenotypic relationships of feed intake and measures of efficiency with growth and carcass merit of beef cattle. *Journal of Animal Science*. 85 (10): 2711-2720. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-767>
- Nkrumah JD, Crews DH, Basarab JA, Price MA, Okine EK, Wang Z, Li C, Moore SS. 2007b. Genetic and phenotypic relationships of feeding behavior and temperament with performance, feed efficiency, ultrasound, and carcass merit of beef cattle. *Journal of Animal Science*. 85 (10): 2382-2390. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-657>
- Nkrumah JD, Okine EK, Mathison GW, Schmid K, Li C, Basarab JA, Price MA, Wang Z, Moore SS. 2006. Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. *Journal of Animal Science*. 84 (1): 145-153. <https://doi.org/10.2527/2006.841145x>
- Oliveira LF, Ruggieri AC, Branco RH, Cota OL, Canesin RC, Costa HJU, Mercadante MEZ. 2016. Feed efficiency and enteric methane production of Nelore cattle in the feedlot and on pasture. *Animal Production Science*. 58 (5): 886-893. <https://doi.org/10.1071/AN16303>
- Pickering ANK, de Haas Y, Basarab J, Cammack K, Hayes B, Hegarty RS, Lassen J, McEwan JC, Miller S, Pinares-Patino S, Shackell G, Vercoe P, Oddy VH. 2013. Consensus methods for breeding low methane emitting animals. *Animal Selection, Genetics & Genomics Network White Paper*. Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases. 57 p. [www.asggn.org](http://www.asggn.org).

- Pinares-Patiño CS, Hickey SM, Young EA, Dodds KG, MacLean S, Molano G, Sandoval E, Kjestrup H, Harland R, Hunt C, Pickering NK, McEwan JC. 2013. Heritability estimates of methane emissions from sheep. *Animal*. 7 (2): 316-321.  
<https://doi.org/10.1017/S1751731113000864>
- Pinares-Patiño CS, McEwan JC, Dodds KG, Cárdenas EA, Hegarty RS, Koolaard JP, Clark H. 2011. Repeatability of methane emissions from sheep. *Animal Feed Science and Technology*. 166-167 (26): 210-218.  
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.068>
- Pinares-Patiño CS, Ulyatt MJ, Lassey KR, Barry TN, Holmes CW. 2003. Rumen function and digestion parameters associated with differences between sheep in methane emissions when fed chaffed lucerne hay. *The Journal of Agricultural Science*. 140 (2): 205-214.  
<https://doi.org/10.1017/S0021859603003046>
- Pinares-Patiño CS, Waghorn GC, Machmüller A, Vlaming B, Molano G, Cavanagh A, Clark H. 2007. Methane emissions and digestive physiology of non-lactating dairy cows fed pasture forage. *Canadian Journal of Animal Science*. 87 (4): 601-613. <https://doi.org/10.4141/cjas06023>
- Pravia MI, Navajas EA, Macedo FL, Clariget J, Luzardo S. 2018. Association between feed efficiency and carcass and meat quality traits in Hereford steers. En: *World Congress on Genetics Applied to Livestock Production (11<sup>o</sup>, 2018, Auckland, Nueva Zelandia)*. Proceedings.
- Pravia MI, Navajas EA, Aguilar I, Ravagnolo O. 2022. Evaluation of feed efficiency traits in different Hereford populations and their effect on variance component estimation. *Animal Production Science*. 62 (17): 1652-1660.  
<https://doi.org/10.1071/AN21420>
- Ravagnolo O, Aguilar I, Crowley JJ, Pravia MI, Lema M, Macedo FL, Scott S, Navajas EA. 2018. Accuracy of genomic predictions of residual feed intake in Hereford with Uruguayan and Canadian training populations. *Canadian Journal of Animal Science*. 91(4): 573-584.

- Renand G, Vinet A, Decruyenaere V, Maupetit D, Dozias D. 2019. Methane and carbon dioxide emission of beef heifers in relation with growth and feed efficiency. *Animals*. 9 (12): 1-17. <https://doi.org/10.3390/ani9121136>
- Richardson EC, Herd RM, Archer JA, Arthur PF. 2004. Metabolic differences in Angus steers divergently selected for residual feed intake. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 44 (5): 441. <https://doi.org/10.1071/EA02219>
- Richardson EC, Herd RMB. 2004. Biological basis for variation in residual feed intake in beef cattle . 2 . Synthesis of results following divergent selection Cooperative Research Centre for Cattle and Beef Quality. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 44 (5): 431-440. <https://doi.org/10.1071/EA02221>
- Richardson EC, Herd RM, Oddy VH, Thompson JM, Archer JA, Arthur PF. 2001. Body composition and implications for heat production of Angus steer progeny of parents selected for and against residual feed intake. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 41 (7): 1065-1072. <https://doi.org/10.1071/EA97144>
- Robinson DL, Oddy VH. 2004. Genetic parameters for feed efficiency, fatness, muscle area and feeding behaviour of feedlot finished beef cattle. *Livestock Production Science*. 90 (2-3): 255-270. <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2004.06.011>
- Shaffer KS, Turk P, Wagner WR, Felton EED. 2011. Residual feed intake, body composition, and fertility in yearling beef heifers. *Journal of Animal Science*. 89 (4): 1028-1034. <https://doi.org/10.2527/jas.2010-3322>
- Smith WB, Galvayan ML, Kallenbach RL, Greenwood PL, Scholljegerdes EJ. 2021. Understanding intake on pastures: How, why, and a way forward. *Journal of Animal Science*. 99 (6): 1-28.
- Solomon SD, Qin M, Manning RB, Alley T, Berntsen NL, Bindoff Z, Chen A. 2007. Technical Summary. En: Solomon, S., Quin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, K.B., Averyt, M. and Miller, H.L. (Eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report

- of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido. 91 p.
- Trujillo AI, Casal A, Peñagaricano F, Carriquiry M, Chilbroste P. 2013. Association of SNP of neuropeptide Y, leptin, and IGF-1 genes with residual feed intake in confinement and under grazing condition in Angus cattle. *Journal of Animal Science*. 91 (9): 4235-4244. <https://doi.org/10.2527/jas2013-6254>
- Van Soest PJ. 1994. *Nutritional ecology of the ruminant*. 2<sup>nd</sup> edition. Cornell University Press. USA. pp. 253-316.
- Vargas JE, Cárdenas M, Pabón JC. 2012. Emisión de metano entérico en rumiantes en pastoreo. *Archivos de Zootecnia*. 61 (237): 51-66.
- Veerkamp RF, Emmans GC, Cromie AR, Simm G. 1995. Variance components for residual feed intake in dairy cows. *Livestock Production Science*. 41 (2): 111-120. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(94\)00056-D](https://doi.org/10.1016/0301-6226(94)00056-D)
- Velazco JI, Herd RM, Cottle DJ, Hegarty RS. 2016a. Daily methane emissions and emission intensity of grazing beef cattle genetically divergent for residual feed intake. *Animal Production Science*. 57 (4): 627-635. <https://doi.org/10.1071/AN15111>
- Velazco JI, Mayer DG, Zimmerman S, Hegarty RS. 2016b. Use of short-term breath measures to estimate daily methane production by cattle. *Animal*. 10(1): 25-33. <https://doi.org/10.1017/S1751731115001603>
- Vlaming JB. 2008. Quantifying variation in estimated methane emission from ruminants using the SF6 tracer technique. Thesis Doctor of Philosophy in Animal Science. Palmerston North, New Zealand. Massey University. 186 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5052.7440>
- Wang Z, Colazo MG, Basarab JA, Goonewardene LA, Ambrose DJ, Marques E, Plastow G, Miller SP, Moore SS. 2012. Impact of selection for residual feed intake on breeding soundness and reproductive performance of bulls on pasture-based multisire mating. *Journal of Animal Science*. 90 (9): 2963-2969. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4521>

Wolcott ML, Johnston DJ, Barwick SA, Iker CL, Thompson JM, Burrow HM. 2009.  
Genetics of meat quality and carcass traits and the impact of tenderstretching  
in two tropical beef genotypes. *Animal Production Science*. 49 (6): 383-398.  
<https://doi.org/10.1071/EA08275>