

ENSAYO BREVE

PRODUCTIVIDAD

Residual feed intake: un indicador de eficiencia que se instala en la ganadería bovina argentina

Por Anibal Pordomingo

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria Anguil, Ruta Nacional 5 Km 580, Anguil, La Pampa.

pordomingo.anibal@inta.gob.ar

La conversión de alimento a producto –carne o leche– es el principal condicionante del negocio ganadero bovino, en particular en la alimentación a corral con granos y subproductos. En este artículo se revisa el impacto de la eficiencia por diferencial de consumo (RFI) y eficiencia de conversión a partir de las evaluaciones realizadas con animales de distintas razas, entre ellas la Limangus.

La genética cuantitativa ha permitido lograr importantes avances sobre caracteres productivos de los bovinos (eficiencia reproductiva, peso al nacer, ganancia de peso, y rendimiento de res). Sin embargo, los avances sobre otros caracteres asociados con el costo de conversión o la calidad de la carne han sido inferiores por complejidad o costos.

Con el desarrollo de tecnología genómica se cuenta con el potencial para lograr avances más rápidos y precisos, especialmente en estos caracteres genéticos de difícil determinación como la eficiencia de conversión neta y la calidad de la carne. Sin embargo, estas tecnologías requieren de información fenotípica relevada apropiadamente a partir de núcleos de referencia.

En ese sentido, la evaluación de animales por diferencial de consumo (*residual feed intake* - RFI) y eficiencia de conversión (EC) tiene valor para la selección genética por una heredabilidad moderada del carácter (Archer et al., 1999; Alford et al., 2006; Arthur et al., 2001 a,b, 2004, 2005, 2008) y variable en función del tamaño de la población de referencia.

Las implicancias en la productividad y en la gestión ambiental de la huella de carbono ganadera (Herd et al., 2000, 2002, 2004; Hoque et al., 2006; Hegarty et al., 2007; Barwick et al., 2009; Basarab et al., 2003, 2013; Kenny et al., 2018; Johnson et al., 2019; Lancaster et al., 2009; Lowerence et al., 2009, 2012, 2013; Sharma et al., 2018; Smith et al., 2021). Las diferencias en RFI y EC tienen bases fisiológicas de amplio espectro que se describen desde las eficiencias de los procesos metabólicos hasta moleculares. Esa justificación escapa al objetivo de este escrito. A los fines de comprender procesos fisiológicos, metabólicos y funcionales se sugiere al lector recurrir a los trabajos y revisiones de Richardson et al. 2004, Mkrumah et al. 2004, 2006, Arthur et al. 2008, Moore et al. 2009, Cruz et al. 2010, Alende et al. 2016, McDonnell et al. 2016, Baldassinni et al. 2018, Cantalapiedra et al. 2018, Hafila et al. 2013, Potts et al. 2017, Lam et al. 2018, Kenny et al. 2018, Johnson et al. 2019 y Robert et al. 2019.

LAS DETERMINACIONES EN ARGENTINA. EL CASO LA TREGUA SANTA COLOMA

Las primeras pruebas de evaluación de RFI en Argentina se comenzaron en el año 2017 con una iniciativa de CREA Cabañas e INTA Anguil en La Pampa. En sucesivos eventos se han evaluado animales de las razas Angus, Brangus, Braford, Hereford, Bonsmara, San Ignacio y

Limangus. En algunos casos por participación de productores individualmente (no asociados) y en otros a través de las asociaciones correspondientes u otras formas organizacionales. La mayor experiencia (y la de mayor magnitud para un solo productor) ha sido la de La Tregua Santa Coloma, con raza Limangus.

La experiencia internacional (Cuadro 1) indica que el peso inicial y el peso final (el tamaño del animal) y el aumento de peso no deberían correlacionarse con la característica de RFI (justamente el peso metabólico medio y el aumento de peso participan de la ecuación predictiva del consumo estimado, por lo que la fórmula corrige por el efecto de esos factores). Tampoco deberían entonces influir en el indicador el nivel energético de la dieta, por lo que permite evaluar el carácter en animales en dietas fibrosas o concentración energética de crecimiento y no de engorde. No tendría el condicionante de la densidad energética del alimento como ocurre cuando se mide tasa de crecimiento (aumento de peso) como indicador o eficiencia de conversión directa. Lógicamente se esperaría un efecto en la magnitud del consumo absoluto (CMS) y sobretodo en términos relativos al peso medio (CMSPV) y sobre el índice de conversión (IC). Los reportes internacionales indican que la diferencia entre los promedios de grupos de RFI negativo y positivo, sería de 15 a 20 % para consumo y eficiencia, incluso podría ser mayor en algunos casos.

En Argentina, las distancias promedio detectadas entre grupos confirman esas observaciones en todas las pruebas evaluadas. Como ejemplo, en el caso una prueba reciente en La Tregua, en Limangus (Cuadro 2) se verifica las mismas conclusiones. Existe una diferencia significativa de 15 % entre grupos en consumo de materia seca observado tanto en términos absolutos como relativos (CMSo y CMSPV). Por su parte, el grupo RFI positivo consumió (en promedio) un 14 % más que el grupo negativo para producir 1 kg de ADPV (ver IC). En correspondencia también con la bibliografía internacional, no se detectaron efectos de ese agrupamiento sobre parámetros de rendimiento de res, nivel de engrasamiento dorsal (subcutáneo) o intramuscular. Ello sugiere independencia de este indicador sobre parámetros de res y carne. Las diferencias entre promedios de RFI negativo y positivo resultó de 1,471 kg, con valores medios de RFI de -718 y +753 g/d para cada grupo, respectivamente. Se observa también que la inclusión de espesor de grasa dorsal (EGD) en la ecuación de regresión para el cálculo del RFI no afectó sustancialmente los valores, corroborando la similitud de los grupos en EGD y espesor de grasa de cadera (AGC). Tampoco se separaron los grupos en contenido de grasa intramuscular (GI).

Si se profundiza el análisis en 4 grupos por RFI, Grupo 1: aquellos animales con RFI de menos de -1 kg/d, Grupo 2: los de -1 a 0, Grupo 3: los de 0 a 1 y Grupo 4: los de más de 1 kg/d, las distancias entre los extremos son mayores en magnitud de efectos (Cuadro 3). Sin diferenciarse en PV inicial, PV final, o en ADPV, el Grupo 1 utiliza 30 % menos de alimento para aumentar un kg (ver IC), el segundo grupo un 20 % menos y el tercero 9 % menos. Sin detectarse efectos sobre parámetros de res ente grupos. Esta información habla de la oportunidad de selección y presión posible, sin distorsionar otros parámetros de valor. Incluso en las tendencias numéricas el ADPV resultó mayor en el grupo 1 respecto de 4, sin detectarse efecto alguno en EDG (engrasamiento o contenido de grasa intramuscular (GI). Estas experiencias indican el amplio espacio para identificar animales con diferente RFI, sin afectar atributos carniceros.

En la Figura 1 se observa la dispersión de casos ordenados por ADPV y RFI. Se identifica con claridad un grupo de animales con RFI negativo y ADPV superior al promedio (cuadrante inferior derecho), que podría considerarse como un grupo de animales de alto interés por comer menos de lo esperado y producir por encima del promedio. En el otro extremo, cuadrante superior izquierdo, un grupo de individuos consumió más que lo esperado para su performance, con un ADPV inferior al promedio. Estas observaciones permiten calificar con un atributo más a los individuos en un escenario de elección con bases objetivas.

Cuadro 1. Síntesis de compilado de reportes bibliográficos* sobre efectos relativos del agrupamiento por RFI en eficiencia individual de toritos en crecimiento.

| RFI | Negativo | Positivo | Dif. % |
|-------------------|----------|----------|--------|
| Peso vivo inicial | = | = | 0 - 3 |
| Peso vivo final | = | = | 0 - 3 |
| ADPV | = | = | 0 - 4 |

| RFI | Negativo | Positivo | Dif. % |
|----------|----------|----------|---------|
| CMS | - | + | 15 - 20 |
| CMS/ADPV | - | + | 15 - 20 |

* Basarab et al., 2003, 2013; Richardson et al., 2004; Herd & Bishop, 2000; Nkrumah et al., 2004; Nkrumah et al., 2006, 2007; Hegarty et al., 2007; Nkrumah et al., 2007; Moore et al., 2009; Lancaster et al., 2009; Lawrence et al., 2013; Basarab et al., 2013; Hafla et al., 2013; McDonnell et al., 2016; Pots et al., 2017; Lam et al., 2018; Sharma et al., 2018; Cruz et al., 2010; Baldassini et al., 2018; Kenny et al., 2018; Johnson et al., 2019.

Cuadro 2. Performance de toritos Limangus evaluados por RFI clasificados en 2 categorías sobre parámetros de producción, conversión y carcasa.

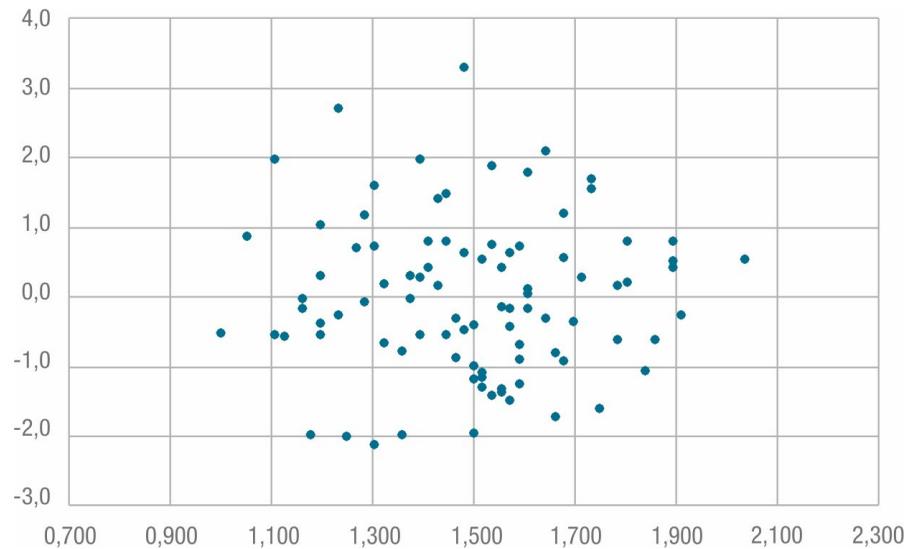
| RFI | Negativo | Positivo | EEM | P |
|---------------------|----------|----------|-------|--------|
| Peso vivo inicial | -0.718 | 0.753 | 0.140 | < 0.01 |
| Peso vivo final | 73 | 70 | | |
| ADPV | 361 | 364 | 3.3 | 0.92 |
| CMS | 434 | 439 | 2.7 | 0.83 |
| CMS/ADPV | 1.434 | 1.472 | 0.065 | 0.56 |
| | 9.2 | 10.8 | 0.31 | < 0.01 |
| | 9.9 | 10.0 | 0.07 | 0.69 |
| | 2.3 | 2.7 | 0.04 | < 0.01 |
| | 6.6 | 7.5 | 0.22 | < 0.01 |
| Parámetros de carne | | | | |
| | 3.0 | 3.1 | 0.08 | 0.75 |
| | 5.1 | 5.1 | 0.07 | 0.92 |
| | 4.2 | 4.2 | 0.10 | 0.71 |
| | 90.7 | 91.2 | 0.29 | 0.57 |
| | -0.716 | 0.759 | 0.082 | < 0.01 |

Cuadro 3. Performance de toritos Limangus evaluados por RFI, clasificados en 4 categorías sobre parámetros de producción, conversión y carcasa.

| RFI | 1 < -1 kg | 2 -1 a 0 kg | 3 0 a 1 kg | 4 > 1 kg | EEM | P |
|---------------------|--------------|----------------|---------------|-------------|-------|--------|
| n | 20 | 54 | 53 | 17 | | |
| RFI, kg | -1.562 | -0.536 | 0.480 | 1.604 | 0.021 | < 0.01 |
| PV inicial, kg | 366 | 360 | 362 | 369 | 6.5 | 0.41 |
| PV final, kg | 440 | 431 | 439 | 440 | 5.2 | 0.38 |
| ADPV, kg | 1.453 | 1.399 | 1.501 | 1.383 | 0.341 | 0.17 |
| CMS observado | 8.5 | 9.3 | 10.5 | 11.6 | 0.53 | < 0.01 |
| CMS esperado | 10.0 | 9.9 | 10.0 | 10.0 | 0.02 | 0.88 |
| CMSPV, % | 2.1 | 2.4 | 2.6 | 2.9 | 0.031 | < 0.01 |
| IC, CMS/ADPV | 5.8 | 6.7 | 7.0 | 8.4 | 0.35 | < 0.01 |
| Parámetros de carne | | | | | | |
| GI, % | 3.1 | 2.9 | 3.1 | 3.0 | 0.09 | 0.79 |
| EGC, mm | 5.3 | 5.0 | 5.1 | 5.0 | 0.18 | 0.61 |

| RFI | 1 | 2 | 3 | 4 | EEM | P |
|----------------------|---------|-----------|----------|--------|------|--------|
| | < -1 kg | -1 a 0 kg | 0 a 1 kg | > 1 kg | | |
| EGD, mm | 4.5 | 4.2 | 4.2 | 4.1 | 0.21 | 0.34 |
| AOB, cm ² | 90.1 | 90.0 | 91.1 | 91.6 | 0.45 | 0.47 |
| RFlgd, kg | -1.519 | -0.540 | 0.485 | 1.595 | | < 0.01 |

Figura 1. Distribución de individuos (toritos) Limangus en función del aumento de peso vivo (ADPV; eje de abscisas) y residual de consumo (RFI; eje de ordenadas) en evaluación 2021 de establecimiento La Tregua – Santa Coloma, 2021 (Se identifica con línea vertical la ubicación del promedio del grupo y resalta la horizontal al nivel de RFI = 0, para delinear 4 cuadrantes).



IMPLICANCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES

La conversión de alimento a producto –carne o leche– es el principal condicionante del negocio ganadero, en particular, en la alimentación a corral con granos y subproductos. Por ello, producir con 20 % menos de alimento la misma cantidad de carne tiene un impacto en la eficiencia que supera cualquier otra tecnología de mejora de la productividad. Pero, en el mismo efecto, el impacto es similar o la huella ambiental de dichas producciones. La magnitud de la acumulación de efectos depende de la heredabilidad genética del carácter y el diseño del sistema de producción para permitir su expresión.

¿POR QUÉ HABLAR DE DIFERENCIAL DE CONSUMO (RFI) Y NO DE EFICIENCIA DE CONVERSIÓN?

El indicador RFI hace referencia a la eficiencia sin tener el efecto condicionante del nivel de producción. La eficiencia de conversión (aumento de peso por unidad de alimento consumido) está condicionada o depende de factores de performance como nivel de aumento de peso, de la composición energética de la dieta, del biotipo y la edad. Consumo residual es menos sensible a estos factores, permitiendo identificar una característica fenotípica de eficiencia, independiente del nivel de producción. Se trata de encontrar a los que produce más por unidad de alimento consumido o los que para producir lo mismo consumen menos, pero que esa característica no esté condicionada por el nivel de producción. Entendiendo, sin embargo, que el alimento no imponga una restricción a la expresión del crecimiento por limitantes severas de calidad.

¿CÓMO SE MIDE ESE CARÁCTER DE DIFERENCIAL DE CONSUMO?

La medida es la diferencia entre el consumo que tiene un animal, efectivamente medido en un comedero apto para ese fin, y el consumo que se estima o predice tendría el mismo senti-

do y posición relativa respecto de los otros animales evaluados. La ecuación de predicción surge de la regresión lineal múltiple consecuente de combinar el peso metabólico medio y el aumento de peso (ADPV) con el consumo voluntario diario medio de individuos evaluados en una misma prueba, en un mismo escenario de alimentación colectiva e igual dieta.

A los fines de clarificar el concepto, si por aplicación de la fórmula predictiva resulta que un animal debería consumir 10 kg de alimento (base seca) por día y la determinación indica que consumió 8 kg, el diferencial residual es -2 kg. Su RFI = -2, ello indicaría que para producir (al nivel en que se encuentra) el consumo real de ese animal es 2 kg inferior al esperado, o sea que su RFI es negativo en 2 kg, indica entonces mayor eficiencia respecto de los animales con valores de RFI más cerca de 0 o de signo positivo. En el mismo sentido, la eficiencia neta de conversión del alimento a peso vivo de ese animal sería mayor.

Dado que el cálculo insume información de cambio de peso del animal y una determinación consistente del consumo voluntario, cada evaluación requiere de una duración de la evaluación de 65 a 70 días, período sobre el que se promedia el consumo diario, luego de un acostumbramiento previo de 15 a 20 días. El período de medición previsto permite un cambio de peso suficientemente amplio para que se puedan generar valores de aumento de peso diario medio (ADPV) que reflejen cambio por crecimiento y se minimicen los efectos del llenado ruminal o la variación del consumo.

Adicionalmente, la cantidad de animales involucrados en la prueba es central a la calidad y significancia estadística de la ecuación de referencia para la definición del consumo esperado. La ecuación de regresión lineal múltiple tiende mayor calidad predictiva (es más confiable) en la medida en que aumenta la cantidad de animales evaluados en un mismo evento. Las pruebas realizadas en Argentina hasta el presente indican como adecuado un mínimo de 50 animales por prueba.

EL SISTEMA DE MEDICIÓN DE CONSUMO

El sistema de medición de consumo se basa en comederos automáticos de registro continuo (SCA), constituidos por una balanza electrónica individual en cada uno de ellos, una antena lectora de caravanas electrónicas que identifican al animal (que se acerca a comer), una computadora de borde que combina el cambio de peso del comedero con el animal previamente detectado. Ese dato se asigna automáticamente a ese animal y se almacena en una memoria del sistema y que, en simultáneo, se comunica vía Wifi a una central en el sitio, que retransmite a un computador conectado a internet.

El proceso es continuo. Todos los comederos operan individualmente, pero transmiten hacia el hardware de comunicación e interpretación desarrollado a tal efecto. Ello permite relevar en tiempo real el consumo de cada animal, el acumulado en períodos definidos (ej. diario, semanal, etc.). Los animales pueden visitar voluntariamente los comederos dentro de un corral y éstos enviarán a la información a compilar por cada caravana electrónica activa, o sea cada animal.



Instalación de comederos electrónicos para determinación de RFI en CENAB, Biofarma, Jesus María, Córdoba, Argentina (Foto: Gentileza Biofarma SA).

La capacidad de evaluación depende de la cantidad de SCA, de las instalaciones de apoyo y la logística asociada. Se sugiere que se instalen como unidad mínima 6 a 8 SCA en cada sitio. Con una capacidad de alimentar 8 animales por SCA, se estima práctico realizar evaluaciones de 50 a 60 animales por evento de evaluación (prueba).

En la foto se observan los sistemas de medición de consumo. En cada uno se incluye un comedero de fibra apoyado sobre celdas de carga (balanza electrónica), con la antena lectora de caravanas electrónicas en cada unidad y el indicador correspondiente, con una caja que incluye una computadora de borde y la conectividad Wifi, local para generar el almacenamiento y el flujo de datos. Los sistemas se apoyan en el software específico para el registro de los datos, el monitoreo remoto de funcionamiento de los SCA (comederos).

BIBLIOGRAFÍA

- ALENDE, M., LANCASTER, P. A., SPANGLER, M. L., PORDOMINGO, A. J. AND ANDRAE, J. G. (2016). Residual feed intake in cattle. Physiological basis: A Review. *Revista Argentina de Producción Animal*, 32:49-56.
- ALFORD A. R., HEGARTY R.S., PARNELL P. F., CACHO O.J., HERD R. M. AND GRIFFITH G. R. (2006). The impact of breeding to reduce residual feed intake on enteric methane emissions from the Australian beef industry. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46: 813-820.
- ARCHER, J. A., RICHARDSON, E. C., HERD, R. M., AND ARTHUR, P. F. (1999). Potential for selection to improve efficiency of feed use in beef cattle: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 50:147-161. doi: 10.1071/A98075.
- ARTHUR, P. F., ARCHER, J. A., JOHNSTON, D. J., HERD, R. M., RICHARDSON, E. C. AND PARNELL, P. F. (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: 2805-2811.
- ARTHUR, P. F. AND HERD, R. M. (2005). Efficiency of feed utilisation by livestock – Implications and benefits of genetic improvement. *Canadian Journal of Animal Science*, 85: 281-290.
- ARTHUR, P. F. AND HERD, R. M. (2008). Residual feed intake in beef cattle. *Revista Brasileira de Zootecnia (Brazilian J. Anim. Sci.)*, 37 (Special Supplement): 269-279.
- ARTHUR, P. F., ARCHER, J. A. AND HERD, R.M. (2004). Feed intake and efficiency in beef cattle: Overview of recent Australian research and challenges for the future. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 44: 361-369.
- ARTHUR, P. F., ARCHER, J. A., HERD, R. M. AND MELVILLE, G. J. (2001b). Response to selection for net feed intake in beef cattle. *Proceedings of the Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics*, 13: 135-138.
- ARTHUR P. F., HERD R. M., WILKINS J. F. AND ARCHER J. A. (2005). Maternal productivity of Angus cows divergently selected for post-weaning residual feed intake. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 45: 985-993.
- ARTHUR P. F., RENAND, G. AND KRAUSS, D. (2001c). Genetic and phenotypic relationships among different measures of growth and feed efficiency in young Charolais bulls. *Livestock Production Science*, 68: 131-139.
- BALDASSINI, W. A., RAMSEY, J. J., BRANCO, R. H., BONILHA, S. F. M., CHIARATTI, M. R., CHAVES, A. S. AND LANNA D. P. D. (2018). Estimated heat production, blood parameters and mitochondrial DNA copy number of Nelore bulls (*Bos indicus*) with high and low residual feed intake. *Livestock Science*, 217:140-147. doi: 10.1016/j.livsci.2018.10.004.
- BARWICK, S. A., WOLCOTT, M. L., JOHNSTONE, D. J., BURROW, H. M. AND SULLIVAN, M. T. (2009). Genetics of steer daily and residual feed intake in two tropical beef genotypes, and relationships among intake, body composition, growth and other post-weaning measures. *Animal Production Science*, 49: 351-366.
- BASARAB, J. A., BEAUCHEMIN, K. A., BARON, V. S., OMINSKI, K. H., GUAN, L. L., MILLER, S. P., AND CROWLEY, J. J. (2013). Reducing GHG emissions through genetic improvement for feed efficiency: Effects on economically important traits and enteric methane production. *Animal*, 7 (Suppl 2):303-315. doi: 10.1017/S1751731113000888.

- BASARAB, J. A., PRICE, M. A., AALHUS, J. L., OKINE, E. K., SNELLING, W. M. AND LYLE, K. L. (2003). Residual feed intake and body composition in young growing cattle. *Canadian Journal of animal Science*, 83: 189-204.
- CANTALAPIEDRA-HIJAR, G., ABO-ISMAIL, M., CARSTENS, G. E., GUAN, L. L., HEGARTY, R., KENNY, D. A., MCGEE, M., PLASTOW, G., RELLING, A., AND ORTIGUES-MARTY, I. (2018). Review: biological determinants of between-animal variation in feed efficiency of growing beef cattle. *Animal*, 12(s2):s321–s335. doi:10.1017/S1751731118001489.
- CRUZ, G. D., RODRIGUEZ-SANCHEZ, J. A., OLTJEN, J. W., AND SAINZ, R. D. (2010). Performance, residual feed intake, digestibility, carcass traits, and profitability of Angus- Hereford steers housed in individual or group pens. *Journal of animal Science*, 88:324–329. doi:10.2527/jas.2009-1932.
- HAFLA, A. N., CARSTENS, G. E., FORBES, T. D., TEDESCHI L. O., BAILEY, J. C., WALTER, J. T., AND JOHNSON, J. R. (2013). Relationships between postweaning residual feed intake in heifers and forage use, body composition, feeding behavior, physical activity, and heart rate of pregnant beef females. *Journal of animal Science*, 91:5353–5365. doi:10.2527/jas.2013-6423.
- HEGARTY, R. S., GOOPY, J. P., HERD, R. M. AND MCCORKELL, B. (2007). Cattle selected for lower residual feed intake have reduced daily methane production. *Journal of animal Science*, 85:1479–1486.
- HERD R. M., ARTHUR, P. F., HEGARTY, R. S. AND ARCHER, J. A. (2002). Potential to reduce greenhouse gas emissions from beef production by selection for reduced residual feed intake, *Proceedings of the seventh World Congress on Genetics Applied to Livestock Production*, 31: 281-284.
- HERD, R. M., DICKER, R. W., LEE, G. J., JOHNSTON, D. J., HAMMOND, A. J. AND ODDY V. H. (2004). Steer growth and feed efficiency on pasture are favorably associated with genetic variation in sire net feed intake. *Animal Production in Australia*, 25: 93-96.
- HERD, R.M. AND BISHOP, S.C. (2000). Genetic variation in residual feed intake and its association with other production traits in British Hereford cattle. *Livestock Production Science* 63: 111–119.
- HOQUE, M. A., ARTHUR, P. F., HIRAMOTO, K. AND OIKAWA, T. (2006). Genetic parameters for carcass traits of field progeny and their relationships with feed efficiency traits of their sire population for Japanese Black (Wagyu) cattle. *Livestock Science*, 99: 111-118. <https://doi.org/10.1093/jas/skab275>.
- JOHNSON, J. R., CARSTENS. G. E., KRUEGER. W. K., LANCASTER. P. A., BROWN. E. G., TEDESCHI, L. O., ANDERSON, R. C., JOHNSON, K. A., AND BROSH, A. (2019). Associations between residual feed intake and apparent nutrient digestibility, in vitro methane-producing activity, and volatile fatty acid concentrations in growing beef cattle. *Journal of animal Science*, 2019.97:3550–3561 doi: 10.1093/jas/skz195.
- KENNY, D. A., FITZSIMONS, C., WATERS, S. M., AND MCGEE, M. (2018). Invited review: improving feed efficiency of beef cattle - the current state of the art and future challenges. *Animal*. 12:1815–1826. doi:10.1017/S1751731118000976.
- LAM, S., MUNRO, J. C., ZHOU, M., GUAN, L. L., SCHENKEL, F. S., STEELE, M. A., MILLER, S. P., AND MONTANHOLI, Y. R. (2018). Associations of rumen parameters with feed efficiency and sampling routine in beef cattle. *Animal*. 12:1442– 1450. doi:10.1017/S1751731117002750.
- LANCASTER, P. A., CARSTENS, G. E., RIBEIRO, F. R., TEDESCHI, L. O., AND CREWS, D. H. JR. (2009). Characterization of feed efficiency traits and relationships with feeding behavior and ultrasound carcass traits in growing bulls. *Journal of animal Science*, 87(4):1528–1539. doi: 10.2527/jas.2008-1352.
- LAWRENCE, P., KENNY, D. A., EARLEY, B., and McGee, M. (2012). Grazed grass herbage intake and performance of beef heifers with predetermined phenotypic residual feed intake classification. *Animal*. 6:1648–1661. doi:10.1017/ S1751731112000559.
- LAWRENCE, P., KENNY, D. A., EARLEY, B., AND MCGEE, M. (2013). Intake of conserved and grazed grass and performance traits in beef suckler cows differing in phenotypic residual feed intake. *Livestock Science*, 152(2–3):154–166. doi: 10.1016/j.livsci.2012.12.024.

- MCDONNELL, R. P., HART, K. J., BOLAND, T. M., KELLY, A. K., MCGEE, M., AND KENNY, D. A. (2016). Effect of divergence in phenotypic residual feed intake on methane emissions, ruminal fermentation, and apparent whole-tract digestibility of beef heifers across three contrasting diets. *Journal of animal Science*, 94(3):1179–1193. doi: 10.2527/jas.2015-0080.
- MOORE, S. S., MUJIBI, F. D., AND SHERMAN, E. L. (2009). Molecular basis for residual feed intake in beef cattle. *Journal of animal Science*, 87:E41–47. doi: 10.2527/jas.2008-1418.
- NKRUMAH, J. D., OKINE, E. K., MATHISON, G. W., SCHMID, K., LI, C., BASARAB, J. A., PRICE, M. A., WANG, Z. AND MOORE, S. S. (2006). Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behaviour with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle, *Journal of Animal Science*, 85: 145-153.
- NKRUMAH, J. D., BASARAB, J. A., PRICE, M. A., OKINE, E. K., AMMOURA, A., GUERCIO, S., HANSEN, C., LI, C., BENKEL, B., MURDOCH, B., ET AL. (2004). Different measures of energetic efficiency and their phenotypic relationships with growth, feed intake, and ultrasound and carcass merit in hybrid cattle. *Journal of animal Science*, 82:2451–2459. doi:10.2527/2004.8282451x.
- NKRUMAH, J. D., OKINE, E. K., MATHISON, G. W., SCHMID, K., LI, C., BASARAB, J. A., PRICE, M. A., WANG, Z. AND MOORE, S. S. (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*, 85:2711–2720.
- POTTS, S. B., BOERMAN, J. P., LOCK, A. L., ALLEN, M. S. AND VANDEHAAR, M. J. (2017). Relationship between residual feed intake and digestibility for lactating Holstein cows fed high and low starch diets. *Journal of Dairy Science*, 100(1):265–278. doi: 10.3168/jds.2016-11079.
- RICHARDSON, E. C., HERD, R. M., ARCHER, J. A. AND ARTHUR, P. F. 2004. Metabolic differences in Angus steers divergently selected for residual feed intake. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 44:441–452.
- HERD, R. M., VELAZCO, J. I., SMITH, H., ARTHUR, P. F., HINE, B., ODDY H., DOBOS, R. C., AND HEGARTY, R. S. (2019). Genetic variation in residual feed intake is associated with body composition, behavior, rumen, heat production, hematology, and immune competence traits in Angus cattle. *Journal of animal Science*, 2019.97:2202–2219. doi: 10.1093/jas/skz077.
- SHARMA, V. K., KUNDU S. S., DATT, C., PRUSTY, S., KUMAR, M., AND SONTAKKE, U. B. (2018). Buffalo heifers selected for lower residual feed intake have lower feed intake, better dietary nitrogen utilisation and reduced enteric methane production. *Journal of Animal Physiology and Nutrition*. 102(2): E607–E614. doi: 10.1111/jpn.12802.
- SMITH, P. E., WATERS, S. M., KENNY, D. A., KIRWAN, S. F., CONROY, S. AND KELLY, A. K. (2021). Effect of divergence in residual methane emissions on feed intake and efficiency, growth and carcass performance, and indices of rumen fermentation and methane emissions in finishing beef cattle. *Journal of Animal Science*, 2021, Vol. 99, No. 11, 1–13.