

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

BALANCE ENERGÉTICO Y PROTEICO, EMISIÓN DE METANO Y
REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS EN GANADO VACUNO MESTIZO
SUPLEMENTADO CON RECURSOS ARBÓREOS Y AGROINDUSTRIALES

CARLOS SANTIAGO ESCOBAR RESTREPO

Medellín, Colombia
2020

BALANCE ENERGÉTICO Y PROTEICO, EMISIÓN DE METANO Y
REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS EN GANADO VACUNO MESTIZO
SUPLEMENTADO CON RECURSOS ARBÓREOS Y AGROINDUSTRIALES

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Agrarias de la
Universidad de Antioquia, como requisito para obtener el
grado de Doctor en Ciencias Animales
Área: Nutrición Animal

ORIENTADOR

Sandra Lucía Posada Ochoa, Zoot., Dr.Sc.

COMITÉ ASESOR

Jaime Ricardo Rosero Noguera, Zoot., Dr.Sc.

Liliana Mahecha Ledesma, Zoot., Dr.Agr.

Medellín Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
2020

Dedico este trabajo a:

A mis padres y hermanos, por hacer de este mundo el
lugar más especial para mí y por la motivación de
seguir adelante con sus ejemplos de vida,
perseverancia y respeto.

A mi esposa, por darme la tranquilidad, felicidad y el
empuje en cada situación de mi vida.

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Antioquia por su apoyo en el proceso doctoral y brindar las herramientas para llevarlo a cabo.

A mi asesora, la profesora Sandra Lucía Posada Ochoa, por su acompañamiento continuo, su pasión por lo que hace, su orientación y amistad. Además, por su sinceridad y por ser un ejemplo de respeto y rectitud.

A mi co-asesor, el profesor Jaime Ricardo Rosero Noguera, por su ayuda incondicional en este proceso, su entrega por la ciencia y la educación y por ser un ejemplo de respeto y rectitud.

A mi co-asesora, la profesora Liliana Mahecha Ledesma, por su ayuda en la construcción de este trabajo y sus valiosas recomendaciones.

Al profesor Juan Carlos Ku-Vera, por su asesoría, recomendaciones, pasión, recibimiento y grandes enseñanzas en este proceso doctoral.

A mi familia y esposa, por su apoyo incondicional en este proceso doctoral y por su acompañamiento.

A todos los compañeros de posgrados, Sebastián Bedoya, Fredy Ramírez, Elizabeth Rendón, Gustavo Villegas, Jeyder Arceo y otros, que me ayudaron muchísimo en las labores generales.

A todas las personas con quien pude contar directa o indirectamente para la realización del doctorado y para el desarrollo de este trabajo. A ustedes expreso mi gratitud.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
RESUMEN GENERAL	8
CAPÍTULO 1.	12
REVISIÓN DE LITERATURA	12
Resumen.....	12
Energía.....	13
Calorimetría: Técnica para el estudio del metabolismo energético	21
Cambio climático y gases de efecto invernadero.....	28
Producción de metano entérico.....	31
Mitigación de metano entérico.....	33
Balance proteico en rumiantes	39
Utilización del nitrógeno por los microorganismos	40
Utilización del nitrógeno por el animal.....	43
Bibliografía.....	46
CAPÍTULO 2.	63
BALANCE ENERGÉTICO Y PROTEICO Y EMISIÓN DE METANO EN GANADO VACUNO MESTIZO CONSUMIENDO RECURSOS ARBÓREOS Y AGROINDUSTRIALES.....	63
Resumen.....	63
Introducción	64
Materiales y métodos	66
Resultados	72
Discusión	78
Conclusiones.....	86
Bibliografía	87
CAPÍTULO 3.	96
DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA PARA EL MANTENIMIENTO Y LA GANANCIA DE PESO EN GANADO MESTIZO MEDIANTE CALORIMETRÍA INDIRECTA	96
Resumen.....	96
Introducción	97
Materiales y métodos	98
Resultados	108
Discusión	115

Conclusiones.....	125
Bibliografía	126
CONCLUSIONES GENERALES	134

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 1. REVISIÓN DE LITERATURA

Tabla 1. Contribución de los principales gases de efecto invernadero al calentamiento global.....	30
Tabla 2. Vida media atmosférica y potencial de calentamiento relativo al CO ₂ de los principales gases de efecto invernadero antropogénicos.....	30
Tabla 3 Principales reacciones de producción y consumo de H ₂ en el rumen.....	32
Tabla 4. Efecto de los taninos condensados (TC) sobre la producción de metano.....	37

CAPÍTULO 2. BALANCE ENERGÉTICO Y PROTEICO Y EMISIÓN DE METANO EN GANADO VACUNO MESTIZO CONSUMIENDO RECURSOS ARBÓREOS Y AGROINDUSTRIALES

Tabla 1. Materias primas y composición química de los tratamientos experimentales..	68
Tabla 2. Efecto de la inclusión de recursos arbóreos y agroindustriales sobre el consumo de materia seca en vacunos mestizos.....	73
Tabla 3. Efecto de la inclusión de recursos arbóreos y agroindustriales sobre la digestibilidad aparente en vacunos mestizos.....	74
Tabla 4. Efecto de la inclusión de recursos arbóreos y agroindustriales sobre el balance de nitrógeno en vacunos mestizos.....	75
Tabla 5. Efecto de la inclusión de recursos arbóreos y agroindustriales sobre la emisión de metano (CH ₄) entérico.....	76
Tabla 6. Partición de la energía en vacunos mestizos consumiendo recursos arbóreos y agroindustriales.....	77

CAPÍTULO 3. DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA PARA EL MANTENIMIENTO Y LA GANANCIA DE PESO EN GANADO MESTIZO MEDIANTE CALORIMETRÍA INDIRECTA

Tabla 1. Composición química del heno de Pangola (<i>Digitaria decumbens</i>) y del suplemento.....	101
Tabla 2. Ecuaciones de regresión relacionando el peso corporal vacío (PCV) y peso vivo (PV) de los animales al nivel de alimentación <i>ad libitum</i> y restringido.....	109
Tabla 3. Peso vivo, consumo de materia seca y desempeño de bovinos mestizos al nivel de alimentación <i>ad libitum</i> y restringido.....	110
Tabla 4. Balance energético de animales mestizos al nivel de alimentación <i>ad libitum</i> y restringido.....	111
Tabla 5. Intercambio gaseoso y producción de calor en animales mestizos a diferentes niveles de alimentación.....	113
Tabla 6. Requerimiento de energía y eficiencia de utilización de la energía metabolizable para el mantenimiento (k_m) en ganado mestizo.....	113
Tabla 7. Requerimiento de energía y eficiencia de utilización de la energía metabolizable para la ganancia de peso (k_g) en ganado mestizo.....	114

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. REVISIÓN DE LITERATURA

- Figura 1.** Diagrama de un sistema de aire empujado (A) y de aire succionado (B).....23
- Figura 2.** Diagrama de sistema de cámaras de respiración de circuito abierto.....25

CAPÍTULO 3. DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA PARA EL MANTENIMIENTO Y LA GANANCIA DE PESO EN GANADO MESTIZO MEDIANTE CALORIMETRÍA INDIRECTA

- Figura 1.** Componentes de las cámaras de respiración de circuito abierto de la Universidad de Antioquia, Colombia.....100
- Figura 2.** Relación entre el consumo de diferentes tipos de energía (Mcal/día), conforme la partición energética al nivel de alimentación *ad libitum* y restringido.....112
- Figura 3.** Relación entre el consumo de energía metabolizable (CEM, Mcal/kg PCV^{0,75}/día) y la energía retenida (ER, Mcal/PCV^{0,75}/día).....114

LISTA DE ABREVIATURAS

AA: Aminoácidos
AGV: Ácidos grasos volátiles
ATP: Adenosín trifosfato
Bay: Estadística bayesiana
BE: Balance de energía
BN: Balance de nitrógeno
BP: Presión barométrica
BCM: Bromoclorometano
C: Dieta control
CA: Dieta con pulpa de café (*Coffea arabica*)
CE: Carbohidratos estructurales
CEB: Consumo de energía bruta
CED: Consumo de energía digestible
CEM: Consumo de energía metabolizable
CEM_m: CEM para mantenimiento
CEN: Consumo de energía neta
CH₄: Metano
CH₄^ˆ = CH₄ seco
CHO: Carbohidratos
CMS: Consumo de materia seca
CMSd: Consumo de materia seca digestible
CMS_h: CMS de heno
CMS_m: CMS para mantenimiento
CMS_s: CMS de suplemento
CMS_t: CMS total
CNE: Carbohidratos no estructurales
CO₂: Dióxido de carbono
CO₂^ˆ = CO₂ seco
CR: Coeficiente respiratorio

CRA: Consumo residual de alimento
CT: Constante de tiempo
CVA: Conversión alimenticia
DA: Digestibilidad aparente
EB: Energía bruta
EBc: EB consumida
ED: Energía digestible
ED/EB: Digestibilidad de la energía
EE: Error estándar
EF: Energía fecal
EG: Energía en gases
EM: Energía metabolizable
EM/EB: Metabolicidad de la energía
EM_g: EM para ganancia de peso
EM_m: EM para mantenimiento
EN: Energía neta
EN_g: EN de ganancia
EN_m: EN de mantenimiento
EN_r: EN retenida
EO: Energía en orina
ER: Energía retenida
FDN: Fibra en detergente neutro
FDNc: FDN consumida
FDNd: FDN digestible
FDNe: FDN efectiva
feO₂: Volumen de salida de O₂
feCO₂: Volumen de salida de CO₂
feCH₄: Volumen de salida de CH₄
feH₂O: Volumen de salida de H₂O
fiCH₄: Volumen entrante de CH₄
fiCO₂: Volumen entrante de CO₂

fiH₂O: Volumen entrante de H₂O
fiO₂: Volumen entrante de O₂
FK: Medidor de flujo de masas
FR: Flujo de aire
FRc: flujo corregido por vapor de agua
FRe: Flujo de salida de aire
FRe` : Flujo de salida de aire seco
FRe`` : Flujo de salida de aire seco y sin CO₂
FRi: Flujo de entrada de aire.
G: Dieta con algodón (*Gossypium sp.*)
GEI: Gases de efecto invernadero
GDP: Ganancia diaria de peso
GDPV: Ganancia diaria de peso vacío
GPV: Ganancia de peso vacío
GS: Dieta con matarratón (*Gliricidia sepium*)
H₂: Hidrógeno
H₂O: Agua
HR: Humedad relativa
IT: Incremento térmico
Kcal: Kilocalorías
k_g: Eficiencia de utilización de la EM para ganancia
k_m: Eficiencia de utilización de la EM para mantenimiento
L: Litros
Log: Logaritmo
Mcal: Megacalorías
MCO: Mínimos cuadrados ordinarios
MI: Materia inorgánica
MO: Materia orgánica
MOc: MO consumida
MOd: MO digestible
MOF: Materia orgánica fermentable

MS: Materia seca
MSc: Materia seca consumida.
MSd: MS digestible
MSs: MS del suplemento
MUX: Multiplexer
N: Nitrógeno
N₂O: Óxido nitroso
NC: N consumido
ND: N digestible
NH: N en heces
NH₄⁺: Amonio
NNP: N no proteico
NO: N en orina
NR: N retenido
O₂: Oxígeno
O₂`: O₂ seco
O₃: Ozono
PB: Proteína bruta
PC: Producción de calor
PCa: PC por actividad
PCay24: PC en ayuno correspondiente a 24 horas
PCay6: PC en ayuno de 00:00 a 06:00 h
PCay24 ajustado: PC en ayuno de 00:00 a 06:00 horas extrapolada a 24 horas
PCd: PC por digestión, absorción y asimilación del alimento
PCdes: PC por desechos
PCf: PC por fermentación
PCmb: PC de metabolismo basal
PCp: PC por formación de producto.
Pct: PC por termorregulación
PCV: Peso corporal vacío
PCV^{0.75}: Peso corporal vacío metabólico.

PDR: Proteína degradable en rumen

PER: Peso estándar de referencia esperado para la grasa corporal final

PM: Proteína metabolizable.

PMo: Proteína microbiana.

PNDR: Proteína no degradable en rumen

PRc: PB consumida

PRd: Proteína digestible

PV: Peso vivo

PV^{0.75}: Peso vivo metabólico

PVA: Presión de vapor de agua

R²: Coeficiente de determinación

SS4: Sub-muestreo

SF₆: Hexafluoruro de azufre

STP: Temperatura y presión estándar

TC: Taninos condensados

UI-3: Interfase

VCH₄: Volumen producido de CH₄

VCO₂: Volumen producido de CO₂

VO₂: Volumen consumido de O₂

VV: Dieta con orujo de uva (*Vitis vinífera*)

Ym: Porcentaje de la EBc que se pierde en forma de CH₄

INTRODUCCIÓN GENERAL

En Colombia, la ganadería representa alrededor del 1,4% del producto interno bruto (PIB), el 21,8% del PIB agropecuario y el 48,7% del sector pecuario, siendo de gran importancia para el crecimiento económico (Fedegan, 2016). En el año 2019 el inventario vacuno alcanzó un total de 27.234,027 cabezas (ICA, 2019). Lo anterior demuestra la importancia de la ganadería en la economía del país, sin embargo, aún predominan los sistemas de pastoreo extensivo tradicional o de pastoreo extensivo mejorado, donde el nivel de tecnificación es mínimo y la competitividad, productividad y sostenibilidad es baja. Desde el punto de vista nutricional, estos sistemas se caracterizan por la limitada cantidad y calidad del forraje, especialmente durante períodos climáticos adversos, siendo la proteína y la energía los factores más limitantes.

Adicionalmente, bajo sistemas de producción extensivos, la ganadería genera un impacto ambiental negativo. El deterioro del suelo, la deforestación, la contaminación de los cuerpos de agua, la degradación de las pasturas y la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) son algunos de los efectos resultantes. El dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) son los principales GEI generados por la actividad ganadera. Entre las fuentes de producción de CH_4 antropogénico, el sector agropecuario aporta el 14,5% de las emisiones totales mundiales, donde el 39% de este es generado por la ganadería (Gerber et al., 2013). El CH_4 entérico contribuye al calentamiento global, con un poder 25 veces superior al CO_2 (IPCC, 2007), y afecta el balance energético del animal. Las pérdidas de energía a partir de este gas representan 5,5–6,5% de la energía bruta consumida (Johnson y Ward, 1996). Por consiguiente, se hace necesario buscar alternativas alimenticias que disminuyan la producción de CH_4 sin afectar los parámetros productivos.

Dentro de las fuentes de energía, el maíz (*Zea mays*) es el grano más consumido por el ser humano; además, es la base de la producción de alimentos concentrados para animales, con niveles de inclusión que alcanzan el 70%. Debido a la demanda mundial,

la producción de biocombustibles y los cambios climáticos, los precios del maíz han incrementado y, consecuentemente, los costos de producción de alimentos para animales. A lo anterior se suma los altos costos de la soya (*Glycine max*), fuente de proteína que también compite con la alimentación humana. Esta situación conlleva a la búsqueda de materias primas alternativas para la alimentación animal, que puedan sustituir parcial o totalmente las fuentes tradicionales sin afectar la productividad. En Colombia, la agroindustria del café (*Coffea arabica*), uva (*Vitis vinífera*) y algodón (*Gossypium sp.*) genera una gran cantidad de desechos, entre ellos pulpa de café, semilla de algodón y orujo de uva, respectivamente. Estas materias primas pueden participar de un programa de suplementación animal, en lugar de generar contaminación ambiental cuando su disposición final no es la adecuada. Estos subproductos aportan fibra, grasa, azúcares, energía y proteína (Noriega et al., 2008; Rondeau et al., 2013; Grainger et al., 2010). Las condiciones tropicales en que se encuentra el país también le permiten disponer de árboles forrajeros que representan una fuente de proteína para la alimentación de los animales domésticos. En el caso del matarratón (*Gliricidia sepium*) se han obtenido producciones de forraje verde de 13-16 ton/ha/corte, con contenidos de proteína fluctuando entre 29 y 32% (Gómez et al., 2002). Boadi et al. (2004) indicaron que los taninos condensados disminuyen la acción de los metanógenos y de los protozoos ruminales, consecuentemente, la producción de CH₄. El contenido de taninos puede variar entre 0,84-5,2% para el orujo de uva (Alipour y Rouzbehan, 2007; Baumgärtel et al., 2007; Vasta et al., 2010), 1,8-8,6% para la pulpa de café (Leifa et al., 2000; Bressani, 1987; Noriega et al., 2008), 0,78-5,2% para la semilla de algodón (Terril et al., 1992; Yu et al., 1996ab) y 0,04-4,3% para el matarratón (Lara et al., 2000; Varón y Granados, 2012; Onwuka, 1992) (valores expresados en la materia seca total).

En los sistemas de producción de carne, la rentabilidad depende en gran medida del uso eficiente de los alimentos para el mantenimiento y el crecimiento, siendo la energía y la proteína los componentes que más limitan la productividad. Para la formulación de dietas que busquen corregir deficiencias de la pastura a través de la suplementación estratégica es fundamental conocer los requerimientos de los animales en el trópico,

donde se destacan los trabajos realizados en Brasil (Valadares et al., 2006ab; Valadares et al., 2016). Ello conlleva a la utilización de modelos matemáticos foráneos (NRC, 1996; NRC, 2016; AFRC, 1993; INRA, 1989), desarrollados en condiciones templadas, donde los factores ambientales, los recursos alimenticios y la base genética de los animales son diferentes. A nivel latinoamericano, el volumen de información debe aumentar para lograr establecer modelos matemáticos más consolidados a nivel tropical. Esfuerzos de investigación encaminados a la estimación directa de los requerimientos nutricionales permitirá la elaboración de suplementos adecuados que complementen el aporte nutricional de los forrajes disponibles, potenciando la viabilidad productiva, económica y ambiental de los sistemas de producción de carne.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, los objetivos planteados en esta propuesta de investigación fueron los siguientes:

- Determinar el balance energético y proteico en ganado mestizo suplementado con arbóreas y subproductos agroindustriales.
- Evaluar el efecto de la inclusión de arbóreas y subproductos agroindustriales sobre la producción de metano entérico en ganado mestizo.
- Establecer el valor energético de raciones para ganado mestizo incluyendo arbóreas y subproductos agroindustriales.
- Determinar los requerimientos de energía neta para el mantenimiento y la ganancia de peso de ganado mestizo en la etapa de ceba.
- Determinar la eficiencia de utilización de energía metabolizable para el mantenimiento y la ganancia de peso de ganado mestizo en la etapa de ceba.

En el presente trabajo se formularon dos hipótesis: 1) La inclusión de arbóreas (*Gliricidia sepium*) y subproductos agroindustriales del café (*Coffea arabica*), uva (*Vitis vinífera*) y algodón (*Gossypium sp.*) en la dieta de ganado mestizo disminuye la

producción de CH₄ sin afectar el balance energético y proteico; 2) Los requerimientos de energía neta para el mantenimiento (EN_m) y la ganancia de peso (EN_g) están en función del potencial genético de los animales para la producción. Se espera que el ganado mestizo (*Bos taurus* x *Bos indicus*) presente un potencial intermedio entre taurinos y cebuínos, por lo cual los requerimientos de EN_m y EN_g serán menores que los reportados en la literatura para ganado puro *Bos taurus*, pero mayores que los reportados para ganado puro *Bos indicus*.

Referencias

Agricultural and Food Research Council (Great Britain). Technical Committee on Responses to Nutrients. Energy and protein requirements of ruminants: an advisory manual. CAB international; 1993.

Alipour D, Rouzbehan Y. Effects of ensiling grape pomace and addition of polyethylene glycol on in vitro gas production and microbial biomass yield. *Animal Feed Science and Technology*. 2007 Sep 1;137(1-2):138-49.

Baumgärtel T, Kluth H, Epperlein K, Rodehutschord M. A note on digestibility and energy value for sheep of different grape pomace. *Small Ruminant Research*. 2007 Feb 1;67(2-3):302-6.

Boadi D, Benchaar C, Chiquette J, Massé D. Mitigation strategies to reduce enteric methane emissions from dairy cows: update review. *Canadian Journal of Animal Science*. 2004 Sep 1;84(3):319-35.

Bressani R. Anti-physiological factors in coffee pulp. Composition, technology and utilization. Guatemala City: Institute of Nutrition of Central America and Panama. 1987. p. 83-88.

FEDEGAN. 2016. Disponible en: <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/inventario-ganadero>; consulta: junio 2019.

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

Gómez MH, Rodríguez L, Murgueitio E, Ríos CI, Rosales Méndez M, Molina CH, Molina CH, Molina E, Molina JP. Árboles y arbustos forrajeros utilizados en alimentación animal como fuente proteica: Matarratón (*Gliricidia sepium*), Nacadero (*Trichanthera gigantea*), Pízano (*Erythrina sp.*) y Botón de oro (*Tithonia diversifolia*). Fundación Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria-CIPAV; 2002

Grainger C, Williams R, Clarke T, Wright AD, Eckard RJ. Supplementation with whole cottonseed causes long-term reduction of methane emissions from lactating dairy cows offered a forage and cereal grain diet. *Journal of Dairy Science*. 2010 Jun 1;93(6):2612-9.

ICA. Instituto Colombiano Agropecuario. Censo población de Bovinos en Colombia. 2019. Recuperado en noviembre 6, 2019 de <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>.

IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Core Writing Team, Pachauri, R.K., Reisinger, A. (Eds.), IPCC, Geneva, Switzerland. 2007: 104 pp.

INRA. Ruminant Nutrition. Libbey Eurotext, Montrouge, France. 1989.

Johnson DE, Ward GM. Estimates of animal methane emissions. *Environmental monitoring and assessment*. 1996 Sep 1;42(1-2):133-41.

Lara CE, García JM, López J. Influencia del pastoreo en la concentración de fenoles totales y taninos condensados en *Gliricidia sepium* en el trópico seco. *Livestock Research for Rural Development*. 2000;12:4.

Leifa F, Pandey A, Soccol CR. Solid state cultivation—an efficient method to use toxic agro-industrial residues. *Journal of Basic Microbiology: An International Journal on Biochemistry, Physiology, Genetics, Morphology, and Ecology of Microorganisms*. 2000 Jul;40(3):187-97.

Noriega Salazar A, Silva Acuña R, García de Salcedo M. Revisión: Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal. *Zootecnia Tropical*. 2008 Dec;26(4):411-9.

NRC (National Research Council). *Nutrient requirements of beef cattle*. 7th ed. Washington, D.C: National Academy Press. 1996.

NRC (National Research Council). *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. 8th ed. National Academy Press, Washington, D.C. 2016.

Onwuka CF. Tannin and saponin contents of some tropical browse species fed to goats. *Tropical Agriculture*. 1992 Apr 1;69(2):176-80.

Rondeau P, Gambier F, Jolibert F, Brosse N. Compositions and chemical variability of grape pomaces from French vineyard. *Industrial Crops and Products*. 2013 May 1;43:251-4.

Terrill TH, Rowan AM, Douglas GB, Barry TN. Determination of extractable and bound condensed tannin concentrations in forage plants, protein concentrate meals and cereal grains. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1992;58(3):321-9.

Valadares Filho SC, Paulino PV, Valadares RF. Exigências nutricionais de zebuínos no Brasil. II. Proteína. Exigências nutricionais de zebuínos e tabelas de composição de alimentos BR-Corte. 2006a;1:75-84.

Valadares Filho SD, Paulino PV, Magalhães KA. Exigências nutricionais de zebuínos e tabelas de composição de alimentos BR-CORTE. Viçosa, MG: UFV, Suprema Gráfica Ltda. 2006b.

Valadares Filho SC, Costa y Silva LF, Gionbelli MP, Rotta PP, Marcondes MI, Chizzotti ML, Prados LF. Exigências nutricionais de zebuínos puros e cruzados. BR-Corte. 3 ed. Brasil: Editorial UFV. 2016; 327 p.

Varón LE, Granados JE. Interrelación entre el contenido de metabolitos secundarios de las especies *Gliricidia sepium* y *Tithonia diversifolia* y algunas propiedades físicoquímicas del suelo. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*. 2012 Jan 16;3(1):53-62.

Vasta V, Jerónimo E, Brogna DM, Dentinho MT, Biondi L, Santos-Silva J, Priolo A, Bessa RJ. The effect of grape seed extract or *Cistus ladanifer* L. on muscle volatile compounds of lambs fed dehydrated lucerne supplemented with oil. *Food Chemistry*. 2010 Apr 15;119(4):1339-45.

Yu F, Moughan PJ, Barry TN. The effect of cottonseed condensed tannins on the ileal digestibility of amino acids in casein and cottonseed kernel. *British Journal of nutrition*. 1996a May;75(5):683-98.

Yu F, Moughant PJ, Barry TN, McNabb WC. The effect of condensed tannins from heated and unheated cottonseed on the ileal digestibility of amino acids for the growing rat and pig. *British Journal of Nutrition*. 1996b Sep;76(3):359-71.

RESUMEN GENERAL

El trabajo se desarrolla en tres capítulos. El primero de ellos corresponde a una revisión bibliográfica sobre energía y proteína en rumiantes. En el aparte de energía se aborda la partición energética, las pérdidas de energía en forma de metano (CH₄), las exigencias de energía para mantenimiento y ganancia de peso y finalmente la calorimetría como metodología para estudiar el metabolismo energético. En el aparte de proteína se relacionan las diferentes formas de clasificar las fuentes de nitrógeno consumidas por el rumiante, y los factores que afectan su utilización por los microorganismos y el animal.

El segundo capítulo tuvo por objetivo determinar el balance de energía (BE) y de nitrógeno (BN), así como la emisión de CH₄ entérico en ganado mestizo consumiendo recursos arbóreos y agroindustriales. Para tal efecto se emplearon diez animales Brangus, que se alimentaron con cinco dietas basadas en heno de pangola (*Digitaria decumbens*) (60%) y un suplemento (40%) basado en maíz-soya (control), matarratón, semilla de algodón, pulpa de café y orujo de uva. Los recursos arbóreos y agroindustriales representaron el 37,5% del suplemento. La evaluación se realizó en dos períodos experimentales, asignando dos animales por dieta en cada período. La producción de CH₄ no difirió entre las dietas cuando se expresó en L/kg de materia seca, materia orgánica y fibra detergente neutra ($p > 0,05$). El valor medio de producción de CH₄ fue 118,6 L/animal/d y representó el 4,2 y 5,9% de la energía bruta (EB) y digestible (ED), respectivamente. En el BE, sólo se registraron diferencias en la EB consumida; el menor valor se observó en el tratamiento con pulpa de café, respecto la dieta control y con orujo de uva. La ED, la energía metabolizable (EM) y la energía retenida (ER) promediaron el 71,4, 65,9 y 33,3% de la EB, correspondientemente. La pérdida de N en la orina fue menor ($p < 0,05$) en la dieta incluyendo semilla de algodón respecto el control. El 55,8% del N consumido fue retenido. La incorporación de los recursos evaluados fue comparable con la dieta control, lo que supone que una inclusión del 15% de la dieta no altera el BE, el BN, ni la emisión de CH₄.

Finalmente, en el capítulo 3, se presentan los requerimientos de energía neta para el mantenimiento (EN_m) y la ganancia de peso (EN_g), así como la eficiencia de utilización de la EM para ambas funciones (k_m y k_g). Para tal efecto se emplearon diez animales Brangus (peso vivo $240,7 \pm 23,1$ kg) que recibieron una dieta basada en heno de pangola (*Digitaria decumbens*) y suplemento, en proporción 70: 30, aproximadamente. La producción de calor (PC) se cuantificó a diferentes niveles de alimentación (*ad libitum*, restricto y ayuno) a través del empleo de cámaras de respiración de circuito abierto. La EN_m se determinó a partir de tres aproximaciones: 1) El valor de PC de ayuno entre las 00:00 y 06:00 horas, extrapolado a 24 horas (PCay24 ajustado); 2) A partir del intercambio respiratorio durante 24 horas de ayuno (PCay24); 3) Desde modelos de regresión lineal entre el logaritmo de la PC (y) y el consumo de EM (CEM) (x) (kcal/kg PCV^{0,75}/día) en los niveles de alimentación *ad libitum* y restricto (PCV^{0,75}: peso corporal vacío metabólico). El requerimiento de EN_g (kcal/kg PCV^{0,75}/día) se determinó a partir de tres aproximaciones: 1) A partir de la diferencia entre el CEM y la PC determinadas al nivel de alimentación *ad libitum*; 2) Desde la ecuación exponencial: $EN_g = aXb$, donde a y b correspondieron al antilogaritmo del intercepto y la pendiente de la regresión lineal entre el logaritmo de la ganancia de peso vacío (GPV) (x) (kg) y el logaritmo de la energía retenida (ER) (kcal/kg PCV^{0,75}/día) (y); 3) Desde la ecuación parabólica $EN_g = (b*z) + (c*z^2)$, donde b y c se obtuvieron de la relación entre la GPV (kg) (x) y la ER (kcal/kg PCV^{0,75}/día) (y). La eficiencia de utilización de la EM se calculó a partir de la relación EN/EM para mantenimiento y ganancia. Los requerimientos de EN_m fueron 95,01, 80,4 y 83,3 kcal/kg PCV^{0,75}, cuando determinados desde PCay24, PCay24 ajustado y por regresión, respectivamente. Los requerimientos de EN_g fueron 104,5, 98,6 y 206,1 kcal/kg PCV^{0,75}, cuando determinados por la diferencia EM-PC, la ecuación exponencial y parabólica, respectivamente. El k_m y el k_g en promedio fue de 0,75 y 0,40, respectivamente. Se concluye que el requerimiento de EN_m fue mayor al propuesto por la NRC, 77 kcal/PVC^{0,75}, y que los requerimientos de EN_g se encuentran por encima de lo reportado en la literatura.

Abstract

The work is developed in three chapters. The first corresponds to a literature review on energy and protein in ruminants. In the energy section, the energy partition, the energy losses in the form of methane (CH₄), the energy requirements for maintenance and weight gain and finally the calorimetry as a methodology for studying energy metabolism are addressed. In the protein section, the different ways of classifying the sources of nitrogen consumed by the ruminant are related, and the factors that affect their use by microorganisms and the animal.

The second chapter aimed to determine the energy (EB) and nitrogen (NB) balance, as well as the emission of enteric CH₄ in crossbred cattle consuming shrubs and agroindustrial resources. For this purpose, ten Brangus animals were used, which were fed with five diets based on pangola hay (*Digitaria decumbens*) (60%) and a supplement (40%) based on corn-soybean (control), matarratón, cottonseed, coffee pulp and grape marc. shrubs and agroindustrial resources accounted for 37,5% of the supplement. The evaluation was carried out in two experimental periods, assigning two animals per diet in each period. The production of CH₄ did not differ between diets when expressed in L/kg of dry matter, organic matter and neutral detergent fiber ($p > 0,05$). The average production of CH₄ was 118,6 L/animal/d and represented 4,2 and 5,9% of the gross energy (GE) and digestible energy (DE), respectively. In the EB, only differences in the GE consumed were recorded; the lowest value was observed in the coffee pulp treatment, with respect to the control diet and grape marc. The DE, metabolizable energy (ME) and retained energy (RE) averaged 71,4, 65,9 and 33,3% of the GE, correspondingly. The loss of N in the urine was lower ($p < 0.05$) in the diet including cottonseed compared to the control. The 55,8% of the N consumed was retained. The incorporation of the evaluated resources was comparable with the control diet, which means that an inclusion of 15% of the diet does not alter the EB, the NB, or the emission of CH₄.

Finally, in chapter 3, the net energy requirements for maintenance (NE_m) and weight gain (NE_g) are presented, as well as the efficiency of use of ME for both functions (k_m and k_g). For this purpose, ten Brangus animals were used (live weight $240,7 \pm 23,1$ kg).

Animals were fed a diet based on pangola hay (*Digitaria decumbens*) and supplement, in a proportion of 70:30, approximately. Heat production (HP) was quantified at different feeding levels (*ad libitum*, restricted and fasting) through the use of open circuit respiration chambers.

The NE_m was determined by three methods: 1) The fasting HP value between 00:00 and 06:00 hours, extrapolated to 24 hours (adjusted PCay24); 2) From the respiratory exchange during 24 hours of fasting (PCay24); 3) From linear regression models between the logarithm of the HP (y) and the ME intake (MEI) (x) (kcal/kg PCV^{0.75}/day) at *ad libitum* and restricted feeding levels (EBW^{0.75}: empty metabolic body weight). The NE_g requirement (kcal/kg EBW^{0.75}/day) was determined by three methods: 1) From the difference between the MEI and the HP determined at the *ad libitum* feeding level; 2) From the exponential equation: $NE_g = aXb$, where *a* and *b* corresponded to the intercept antilogarithm and the slope of the linear regression between the logarithm of the empty weight gain (EWG) (x) (kg) and the logarithm of the retained energy (RE) (kcal/kg EBW^{0.75}/day) (y); 3) From the parabolic equation $NE_g = (b * z) + (c * z^2)$, where *b* and *c* were obtained from the relationship between the EWG (kg) (x) and the RE (kcal/kg EBW^{0.75}/day) (Y).

The efficiency of ME utilization was calculated from the NE/ME ratio for maintenance and gain. The requirements of NE_m were 95,01, 80,4 and 83,3 kcal/kg EBW^{0.75}, when determined from PCay24, adjusted PCay24 and by regression, respectively. The NE_g requirements were 104,5, 98.6 and 206,1 kcal/kg EBW^{0.75}, when determined by the ME - HP difference, the exponential and parabolic equation, respectively. The k_m and k_g on average were 0,75 and 0,40, respectively. It is concluded that the requirement of NE_m was greater than that proposed by the NRC, 77 kcal/EBW^{0.75}, and that the requirements of NE_g are above those reported in the literature.

CAPÍTULO 1.

REVISIÓN DE LITERATURA

Resumen

La energía es liberada del alimento una vez que todos los constituyentes orgánicos (carbohidratos, proteínas y lípidos) son susceptibles a la oxidación. La energía es utilizada por el rumiante para todas sus funciones metabólicas basales y para producir. Durante el proceso de transformación de la energía consumida en producto final se registran pérdidas, dando lugar a la partición energética. Todos los procesos metabólicos pueden cuantificarse en función de la producción de calor, y este puede ser determinado por calorimetría. Una de las formas a través de las cuáles el rumiante pierde energía corresponde a la producción entérica de metano, uno de los gases de efecto invernadero de mayor importancia. La metanogénesis ruminal es directamente afectada por la relación acetato/propionato, y ésta a su vez por la calidad de la dieta. Conjuntamente con el estudio del balance energético, resulta importante determinar la eficiencia de utilización del N en las dietas para rumiantes. Conocer el efecto de los microorganismos y del animal sobre el nitrógeno consumido es fundamental para comprender la utilización del N. La proteína microbiana puede suplir desde el 50% hasta el 100% de la proteína metabolizable requerida por los animales, evidenciando la importancia de su síntesis para suplir los requerimientos de una manera económica. En este capítulo se revisa la partición energética, las pérdidas de energía en forma de metano (CH₄) y algunas estrategias para su mitigación, los requerimientos de energía para el mantenimiento y la ganancia de peso, y la calorimetría como metodología para estudiar el metabolismo energético. Igualmente, se aborda el balance proteico en rumiantes, las diferentes formas de clasificar las fuentes de nitrógeno y los factores que afectan su utilización por los microorganismos y el animal.

Palabras claves: calorimetría indirecta, balance energético, balance de nitrógeno, eficiencia de utilización, gases de efecto invernadero

Energía

La energía no es considerada nutriente, ella es liberada del alimento una vez que todos los constituyentes orgánicos (carbohidratos, proteínas y lípidos) son susceptibles a la oxidación (Resende et al., 2006). La energía derivada de los nutrientes es utilizada en el rumiante para todas sus funciones metabólicas basales, mantener la temperatura corporal, desplazarse y producir. Este último proceso es el primero que se ve comprometido cuando hay pérdidas o ineficiencias en la utilización de energía por el animal. Por ende, conocer la densidad energética de los alimentos y su eficiencia de utilización es importante para atender la formulación de raciones que optimicen el desempeño productivo.

Durante el proceso de transformación de la energía consumida en producto final (carne, leche, lana etc.) se registran pérdidas, dando lugar a la partición energética. La energía contenida en un alimento es definida como energía bruta (EB) y corresponde a la energía liberada en forma de calor cuando una sustancia orgánica es completamente oxidada a dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O) (Kleiber, 1972). Parte de la EB consumida (EBc) se pierde en forma de energía fecal (EF) y la diferencia EB-EF representa la energía digestible (ED). La ED, a diferencia de la EB, tiene importancia para expresar el valor energético del alimento para el animal, ya que es directamente proporcional a su digestibilidad. La ED en relación a la EB puede variar entre 0,30 para forrajes muy maduros a 0,90 para concentrados de alta calidad (NRC, 1996).

Además de las pérdidas energéticas a través de las heces, también se pierde energía por la orina (EO) y los gases producidos (EG) durante la fermentación de los alimentos, especialmente metano (CH_4). Cuando se sustrae de la ED, la EO y EG se obtiene la energía metabolizable (EM). La EM es aquella energía que queda disponible para los procesos metabólicos y la producción. En un aparte posterior de esta revisión de literatura se tratará el tema de gases de efecto invernadero (GEI), con énfasis en la producción de CH_4 y diferentes aproximaciones para su mitigación.

Partiendo de la EM, finalmente se debe considerar la pérdida de energía a través de procesos metabólicos que conducen a la producción de calor (PC), a saber, termorregulación (PCt), digestión, absorción y asimilación del alimento (PCd), fermentación (PCf), producción de desechos (PCdes), actividad (PCa) y formación de producto (PCp). Por ende, la EM también puede definirse como la sumatoria de la energía retenida (ER) y la PC, $EM=ER+PC$ (Lofgreen y Garrett, 1968). El aumento en la PC posterior al consumo de alimento se denomina incremento térmico (IT) e incluye la PCd, PCf, PCp y PCdes (Church, 1993). La EM corresponde al 81-86% de la ED, variación atribuida a factores del animal y del alimento (AFRC, 1993). Un aspecto importante de la EM es su valor como unidad de referencia para los sistemas basados en el concepto de energía neta (EN). Así, la ecuación $EM=ER+PC$ puede ser escrita en términos de EN como $EM = EN_r + EN_m + IT$, donde EN_r y EN_m son, respectivamente, la energía neta retenida y de mantenimiento (NRC, 1996).

Requerimientos de energía para el mantenimiento

El metabolismo basal es la producción de calor obtenida del animal en ayuno, mantenido en un ambiente termoneuro con un mínimo de actividad (Lawrence y Fowler, 2012). El metabolismo basal también es denominado metabolismo en ayuno, metabolismo mínimo, metabolismo postabsortivo o tasa metabólica basal (Cannas et al., 2010). El concepto nutricional de mantenimiento es diferente al de metabolismo basal porque el animal está comiendo y no en ayuno (Resende et al., 2006). La energía metabolizable para mantenimiento (EM_m) corresponde al consumo de EM en el cual la $ER=0$. En este punto, la EM_m es equivalente a la PC durante el ayuno o PC de metabolismo basal (PC_{mb}) más el IT, esto es, $EM=PC$ (CSIRO, 1990). Un animal está en mantenimiento cuando es alimentado y no presenta ganancia o pérdida de peso, ni modificaciones en su composición corporal. La EM_m es siempre mayor que el metabolismo basal, porque los procesos de alimentación, digestión y metabolismo del alimento requieren energía y ésta aparece en la forma de calor. El calor derivado de las funciones de mantenimiento y el desperdiciado como IT puede medirse por calorimetría

directa e indirecta, que es una técnica no invasiva, reproducible y fiable (Herselman et al., 1998).

Toda vez que la eficiencia de síntesis del adenosín trifosfato (ATP) difiere entre nutrientes, las exigencias de EM_m serán dependientes de la ración, lo cual es superado cuando se utiliza el concepto de exigencia neta (Resende et al., 2006). En los rumiantes resulta más indicado trabajar bajo el sistema de EN, y no el de EM, porque el IT es grande y variable.

Alrededor de la mitad de la energía utilizada para mantenimiento es utilizada por la pared gastrointestinal y el hígado debido a su alta participación en la absorción y metabolismo de los nutrientes digeridos. La piel, riñones y tejido nervioso utilizan alrededor de un tercio de la energía de mantenimiento y el restante por la actividad muscular (Seal y Reynolds, 1993). El nivel de actividad de todos estos tejidos varía según el genotipo, sexo, edad, temperatura, estado fisiológico y nivel de alimentación previa, por ende, también los requerimientos de mantenimiento del animal. Posada et al. (2011) revisaron los factores que determinan las exigencias energéticas para el mantenimiento, destacando que las mismas representan del 65-70% de la energía total necesaria para la producción de carne.

A partir del estudio de Armsby y Fries (1911) se concluyó que entre especies había animales que utilizaban la energía de una manera más eficiente, con lo cual muchos autores comenzaron a investigar las diferencias en los requerimientos energéticos y en la eficiencia de utilización de la energía entre razas bovinas. Los métodos utilizados para la determinación de estas diferencias y la variabilidad entre razas dificulta la estandarización de un requerimiento generalizado de mantenimiento. La mayoría de estudios realizados y descritos en el NRC (2000) indican que los animales en crecimiento de las razas *Bos indicus* requieren 10% menos energía para el mantenimiento que las razas *Bos taurus*, mientras que los cruces se ubican en un nivel intermedio, 5% inferior. Además, se concluye que las razas lecheras o doble propósito requieren 20% más energía para el mantenimiento que las razas de carne,

aproximadamente. Lo que sugiere esto, es que entre razas existen diferencias en el mérito genético, lo cual genera diferencias en su potencial productivo para crecimiento y producción de leche. Similarmente, Sainz et al. (2006) reportaron que los requerimientos de EN_m son menores para *Bos indicus* que para *Bos taurus*, y sugieren que esta menor necesidad de EN_m se puede deber al menor recambio proteico reportado en animales *Bos indicus*.

En la revisión de literatura realizada por Posada et al. (2011) se destaca que las diferencias en los requerimientos de EN_m entre grupos genéticos pueden ser explicadas por diferencias en el tamaño de los órganos internos, en el contenido de proteína corporal (masa muscular) y en el recambio proteico, que son mayores en los animales taurinos y cruzados europeo x cebu que en los cebuínos. Finalmente, se indica que los cebuínos, respecto los taurinos, presentan mayor grasa periférica, en detrimento del depósito de grasa interna, por lo que sus requerimientos de mantenimiento son menores.

El NRC (2000) utiliza el valor reportado por Lofgreen y Garrett (1968), correspondiente a un requerimiento de 77 kcal $EN_m/kg PCV^{0,75}/día$ para animales *Bos taurus*. Otros autores no han encontrado diferencias marcadas entre este valor y aquel registrado en animales *Bos indicus* o cruzados. Tedeschi et al. (2002), trabajando con bovinos Nellore, encontraron un requerimiento de 77 kcal/kg $PCV^{0,75}/día$. Freitas et al. (2006) no encontraron diferencias entre animales *Bos indicus* y cruces, reportando para ambos un valor de 79 kcal/kg $PCV^{0,75}/día$. Ferrell y Jenkins (1998), por otro lado, encontraron valores ligeramente inferiores, 74,5 kcal/kg $PCV^{0,75}/día$, en animales cruzados. Chizzotti et al. (2008) estimaron el requerimiento de EN_m en 75 kcal/kg $PCV^{0,75}/día$ para animales puros Nellore o cruzados con *Bos taurus*, no encontrando diferencias entre ellos.

Requerimientos de energía para la ganancia de peso

La energía que queda disponible luego de sustraer el IT de la EM es la EN, la cual, como se mencionó anteriormente, corresponde a la EN_r y la EN_m . Por ende, la substracción de la PC de la EM corresponde a la EN_r (Wenk et al., 2001). La EN_r , o lo

que es lo mismo, la EN para la ganancia (EN_g) se define como la energía contenida en el tejido depositado. Los requerimientos energéticos para la ganancia de peso están en función de la proporción de grasa y proteína en el tejido depositado (Fox y Black, 1984); la grasa contiene 9,367 kcal/g y la materia orgánica no grasa 5,686 kcal/g (Garrett et al., 1959). Si los requerimientos de EN_g dependen de la proporción de grasa y proteína depositada, entonces también dependen de los diferentes factores que afectan esta proporción. Los factores que afectan la composición corporal incluyen ganancia de peso, tamaño corporal, raza, sexo, promotores de crecimiento, consumo y manejo alimenticio (Fox y Black, 1984). Los animales varían de peso cuando alcanzan una composición química dada. Koch et al. (1976) reportaron que vacas de diferentes razas diferían en peso cuando alcanzaban 5% de grasa en el músculo *longissimus*.

La variación en el tejido depositado puede afectar la eficiencia de utilización de la energía para ganancia de peso (Ferrell, 2003). La eficiencia teórica de deposición de proteína, que podría ser de 75-84%, se reduce por causa de su reciclaje, de tal forma que la eficiencia neta de deposición de este componente fluctúa entre 10-40%. Cuando la energía se almacena en forma de grasa, la tasa de reciclaje es menor y se genera menor cantidad de calor, por lo cual la eficiencia oscila entre 60-80% (Posada et al., 2011). La eficiencia de utilización de la energía también depende del género, raza, edad y ambiente (Marcondes et al., 2010). Además, hay una variación adicional en el contenido de agua de los tejidos asociado a la deposición o catabolismo de la proteína. Garrett (1980) identificó los límites inferiores y superiores en animales en crecimiento para energía (MJ/kg de ganancia de peso vacío, GPV), grasa (g/kg GPV) y proteína (g/kg GPV), los cuales son 8,4 y 29,3, 100 y 700 y de 60-80 y 200, respectivamente. Esto significa que un animal joven con una ganancia de 1 kg puede contener 200 g de proteína, 100 g de grasa y 700 g de agua más cenizas.

Debido a que la deposición de grasa y proteína depende de la raza, sexo y tasa de ganancia, aparece el término Peso Estándar de Referencia (PER) que, teniendo en cuenta las condiciones propias de cada raza, especifica el peso vivo (PV) en el cual el animal completa su desarrollo esquelético y su condición corporal está en el rango medio (ejemplo 3 de 5). Por ende, el PER en las razas descritas como pequeñas (ARC,

1980), de contextura pequeña (NRC, 1984), o de madurez temprana (Robelin y Daenicke, 1980) es menor que en las razas medias, de contextura larga o de madurez tardía. Además, entre las razas también hay diferencias entre macho castrado, macho entero y hembras. Se determina que un animal llegó a su madurez cuando el peso adicional contiene muy poca proteína adicional. El CSIRO (2007), teniendo en cuenta el PER, considera que un animal es maduro cuando el porcentaje de grasa en el peso corporal vacío (PCV) es 25%, mientras que el NRC (2000) asigna un porcentaje de 28%.

Eficiencia de utilización de la energía

La eficiencia de la utilización de la energía en el ganado es el principal determinante de la conversión alimenticia (CVA), de la rentabilidad de la empresa ganadera y, de su impacto ambiental. La variación entre animales en la CVA puede tener componentes genéticos, lo que permite la selección de animales con mayor eficiencia y menor impacto ambiental. Una fuente importante de variación en la CVA es la digestibilidad del alimento. De las pérdidas de energía consumida, la más variable es la pérdida fecal, por lo que la digestibilidad de la energía representa la mayor fuente de variación de la EN entre dietas. Considerando que la ED representa entre 40 y 90% de la energía consumida, la digestibilidad representa un importante medio para mejorar la eficiencia de utilización de la energía en rumiantes (Reynolds et al., 2011).

Una vez los nutrientes son absorbidos, ingresan al torrente sanguíneo y son transportados al hígado por el sistema porta. El sistema visceral (hígado y vísceras drenadas por la vena porta) representa una interfase entre la dieta y el animal y, actúa como el principal lugar de regulación de los nutrientes utilizados para el mantenimiento, crecimiento, lactancia, reproducción y actividades físicas de los animales. Sin embargo, las funciones desarrolladas por estos órganos tienen un costo energético significativo y son influenciadas por factores como el nivel de consumo y la composición de la dieta. Como resultado, una cantidad variable de sustancias son metabolizadas por ellos y, de

este modo, el perfil y cantidad de nutrientes disponibles para los tejidos periféricos puede ser muy diferente de aquel absorbido en el lumen intestinal. Probablemente, la mayor parte de la variación en la eficiencia de utilización de la EM entre los alimentos está asociada con el metabolismo visceral, no con el metabolismo de los tejidos periféricos, y es improbable que la relación entre las sustancias cetogénicas/glucogénicas absorbidas tenga un efecto determinante en condiciones fisiológicas (Kozloski et al., 2001).

Para la determinación de los requerimientos de EN para el mantenimiento y la ganancia de peso es necesario conocer la eficiencia de utilización de la EM, es decir, k_m y k_g , respectivamente. Esta eficiencia se define como el aumento en la retención de energía por unidad de aumento en el CEM y, es menor de 1 como resultado de la producción de calor. De acuerdo con Posada et al. (2011), entre los factores que afectan k se tiene la composición de la dieta y con ello, los nutrientes disponibles a nivel celular, la metabolibilidad de la energía y el tejido depositado por el animal.

De acuerdo con el NRC (1984), los valores de k_m fluctúan entre 57,6 y 68,6% y, los de k_g entre 29 y 47,3%, para dietas con diferente relación forraje: concentrado, cuya concentración de EM varía entre 2,0 a 3,2 Mcal/kg MS. Igualmente, Tolkamp (2010) indica que la eficiencia de la utilización de EM es mayor para el mantenimiento respecto la producción y que el rendimiento de EN de un alimento varía, por lo tanto, con la ingesta de EM.

Se ha demostrado que la eficiencia de utilización de la EM para mantenimiento y crecimiento se afecta por la calidad de la dieta (metabolibilidad). También se reconoce que el consumo voluntario de EM aumenta con la calidad de la dieta en rumiantes alimentados *ad libitum*. No obstante, casi toda la variación en la eficiencia energética desaparece cuando se estima o mide en animales alimentados *ad libitum*. La causa de esta notable consistencia en la eficiencia energética es clara. En dietas de calidad moderada, la EM se utiliza con eficiencias relativamente bajas para el mantenimiento y la ganancia, los niveles de EM consumida son menores y, por tanto, la mayoría de la

EM se utiliza con eficiencia k_m , que es relativamente alta en comparación con k_g . En dietas de mejor calidad, la EM se utiliza con eficiencias relativamente altas para el mantenimiento y la ganancia, los niveles de EM consumidos también son altos y, por lo tanto, la mayoría de los EM se utiliza con eficiencia k_g , que es relativamente baja en comparación con el k_m . Esto es, los animales consumen más EM de dietas en las cuales la EM se utiliza con mayor eficiencia para mantenimiento y ganancia y, consecuentemente, utiliza una gran proporción de la EM consumida con eficiencia k_g . Como los rumiantes en la mayoría de los sistemas de producción se alimentan *ad libitum*, este es el nivel de ingesta más apropiado para estimar la eficiencia energética. En definitiva, los datos sugieren que la alimentación *ad libitum* elimina los efectos de la calidad de la dieta sobre la eficiencia energética (casi) por completo y da como resultado eficiencias energéticas generales que están cerca de 0,6. La eficiencia notablemente constante de la utilización de EM en rumiantes alimentados *ad libitum* podría ser el resultado de un efecto directo de la eficiencia energética en la regulación de la ingesta de alimento (Tolkamp, 2010).

De acuerdo con Old et al. (2018), si bien el sistema de EN ha sido muy útil para predecir el desempeño animal y mejorar la eficiencia de la alimentación, muchos estimadores dentro de él se desarrollaron como soluciones matemáticas a problemas matemáticos y no pretendieron conducir a estimaciones finales directamente relacionadas con el proceso metabólico. En consecuencia, los autores indican que los modelos lineales estáticos de utilización de la energía no hacen predicciones adecuadas porque limitan las descripciones termodinámicamente relevantes, especialmente cuando se trata del mantenimiento. Tomando tres bases de datos independientes, Old et al. (2018) estimaron k_m y k_g utilizando mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y estadística bayesiana (Bay). Para k_m encontraron valores de 0,59 por MCO y 0,42 por Bay, último valor que fue consistente con la eficiencia de síntesis de ATP. La estimación de k_g por MCO (0,379) fue diferente a la determinada por Bay (0,676). Así, las estimaciones de MCO dieron como resultado $k_m > k_g$, mientras que las estimaciones determinadas en un marco bayesiano condujeron a $k_m < k_g$, lo que en concepto de los autores, es consistente con la favorabilidad termodinámica de las reacciones subyacentes al mantenimiento y la

ganancia. La base para este cambio de paradigma radica en que el NRC (1984) describe que k_m y k_g varían con la densidad de EM de la dieta, pero provee estimaciones estáticas de producción de calor a $CEM=0$ (lo que corresponde a la EN_m) y de CEM a $ER=0$ (lo que corresponde a EM_m), cuando ambos parámetros son dinámicos y varían con el estado metabólico, el nivel de alimentación y el tipo de dieta. Además, en cualquier animal, el mantenimiento y la ganancia son procesos concomitantes, mientras que Lofgreen y Garrett (1968) describieron el mantenimiento y la ganancia como procesos jerárquicos.

La producción de calor se produce por las funciones de servicio y reparación (EM_m) y por la formación de productos (ER), por lo tanto, $PC = ME_m + ER$. Los modelos clásicos, según lo descrito por Lofgreen y Garrett (1968), dividen inapropiadamente la PC y no se ajustan a las leyes de la termodinámica. En consecuencia, los k_m y k_g estimados clásicamente están en desacuerdo con la favorabilidad termodinámica del ATP (k_m) o la síntesis de biomasa (k_g). En un marco bayesiano, el punto en el que la $ER=0$ es dinámico, el mantenimiento es una función continua del CEM y las estimaciones de k_m y k_g son más similares a las eficiencias determinadas a partir de las vías bioquímicas.

Los autores sostienen que una mejor comprensión de las vías bioquímicas y la estequiometría, conjuntamente con el aprovechando del actual poder de cómputo y el crecimiento inevitable del almacenamiento e intercambio de datos proporcionan una base convincente para que las restricciones impuestas por los enfoques empíricos lineales y monotónicos utilizados desde mediados del siglo XX sean reevaluados como descriptores de la utilización de energía por los animales. El uso de tales herramientas debería alentar el trabajo colaborativo de los investigadores para integrar y expandir modelos bioquímicos ya disponibles y desarrollar nuevos modelos para su uso en sistemas de alimentación prácticos Old et al. (2018).

Calorimetría: Técnica para el estudio del metabolismo energético

El animal utiliza un porcentaje de la energía de los carbohidratos, las grasas, y las proteínas para los procesos que requieren energía, mientras que el resto se pierde en forma de calor. Parte de la energía transferida a los compuestos ricos en energía (ATP)

también se convertirá en calor. Lo anterior significa que todos los procesos metabólicos pueden cuantificarse en función de la producción de calor, y este puede ser determinado por calorimetría o estimado por sacrificio comparativo. En la calorimetría directa, el calor desprendido por el animal es medido por el aumento de la temperatura de un volumen conocido de agua o por medio de corriente eléctrica. En la calorimetría indirecta, que puede ser de circuito abierto o cerrado, la PC se obtiene a través del intercambio respiratorio. En el sacrificio comparativo, a diferencia de la calorimetría, se cuantifica directamente la ER, y por diferencia se obtiene la PC (Posada et al., 2011).

Cámaras de respiración

Las cámaras de respiración consisten en espacios cerrados en los cuales se puede determinar la cantidad de gases producidos o consumidos por un ser vivo. La diferencia entre los volúmenes de los diferentes gases dentro y afuera de las cámaras ayudan a determinar indirectamente el metabolismo energético de un ser vivo. En los rumiantes, por las cantidades generadas, se deben considerar las pérdidas energéticas que se registran a través de la producción del CH₄. Debido a que las cámaras de respiración miden con alta precisión los volúmenes de los diferentes gases, se han convertido en el “método estándar”.

Existen diferentes tipos de cámaras de respiración, las de circuito abierto y las de circuito cerrado. La diferencia de estos dos tipos de cámaras consiste en que las de circuito cerrado comienzan con un volumen inicial conocido y que solo es modificado por el consumo y producción de gases de un ser vivo. Por otro lado, las cámaras de circuito abierto, son aquellas en las que hay una entrada constante de aire al sistema y en algún punto habrá un recambio total del aire al interior de la cámara. Debido a que el aire es totalmente recambiado este aire debe ser medido y analizado.

Dentro de las cámaras de circuito abierto, el aire de recambio o “basal” puede ser empujado o succionado. La diferencia de estos dos sistemas radica en la posición donde se encuentra la bomba de aire. En el caso de la cámara de aire empujado, la

bomba se encuentra antes de la cámara; en el caso donde el aire es succionado, la bomba se encuentra después de la cámara (Figura 1). Para estos dos tipos de cámaras el principio es el mismo, y la diferencia radica en la practicidad del sistema. Las cámaras que usan aire empujado son más utilizadas para animales pequeños (Lighton y Halsey, 2011). Se debe tener en cuenta que si el sistema presenta fugas de aire puede que el animal exhale al lado de éstas y parte de los gases salgan de la cámara sin ser medidos. El sistema de succión de aire elimina el problema de las posibles fugas si se garantiza presión negativa dentro de la cámara, lo que sugiere que la totalidad del aire dentro de la cámara está escapando solo por el sitio de succión. Debido a que los gases presentan diferentes densidades y pueden estratificarse, es importante que dentro de la cámara haya un sistema de mezcla y homogenización, con el fin de que el aire de salida sea representativo de los diferentes gases.

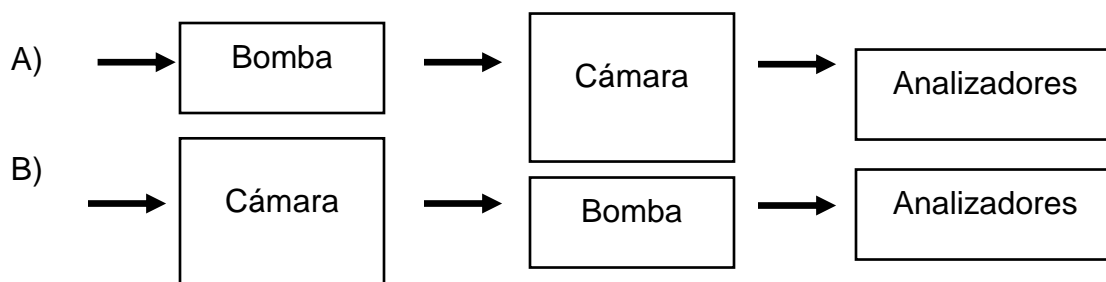


Figura 1. Diagrama de un sistema de aire empujado (A) y de aire succionado (B).

La selección de lugar del cual proviene el aire que entra a la cámara es útil. Si las instalaciones se encuentran en un lugar donde el aire que ingresa a la cámara contiene altas y variables concentraciones de CO₂, oxígeno (O₂) o CH₄, las mediciones pueden ser erradas. En un sistema de aire empujado se puede manipular el aire que ingresa a la cámara a través de un contenedor con concentraciones o combinaciones conocidas de los gases. En las cámaras en que el aire es succionado, éste usualmente se obtiene del medio ambiente circundante (Lighton, 2008).

Funcionamiento de las cámaras de respiración de circuito abierto

Las cámaras de respiración de circuito abierto utilizadas en la Universidad de Antioquia de Medellín-Colombia, son del tipo de aire succionado. Todos los instrumentos de medición y software, sin incluir las cámaras, provienen de la empresa Sable Systems (USA, Nevada). Se cuenta con un medidor de flujo de masas para cada cámara (FK 1 y 2), los cuales miden con alta precisión el volumen que está siendo succionado. Estos FK tienen una capacidad de succión desde 0 hasta 2000 L/minuto. El aire que es succionado de las cámaras es sub-muestreado pasando por cuatro analizadores. El primer analizador, identificado como RH-300, mide la presión de vapor de agua, la humedad relativa y la presión barométrica (PVA, HR y BP, respectivamente). Los otros tres analizadores son el de CO₂, O₂ y CH₄, identificados como CA-10, FC-10 y MA-10, respectivamente. Toda la información proveniente de estos analizadores pasa a un sistema operativo llamado ExpeData, en el cual se tabulan y analizan los datos. El multiplexer (MUX), situado entre los FK y los analizadores, es un sistema de válvulas que permite el paso de las sub-muestras provenientes ya sea de las cámaras o del ambiente. El MUX permite programar el tiempo de sub-muestreo dentro y fuera de la cámara. Además, se cuenta con una interface (UI-3), situada entre el MUX y el computador. La finalidad de la interface es convertir las señales de los diferentes analizadores y FK a voltios para su posterior registro en el software. Por último, se encuentra el sub-muestreo (SS4). Este equipo es una bomba pequeña que garantiza que el flujo de sub-muestreo sea constante y estable para mejorar las mediciones (Figura 2).

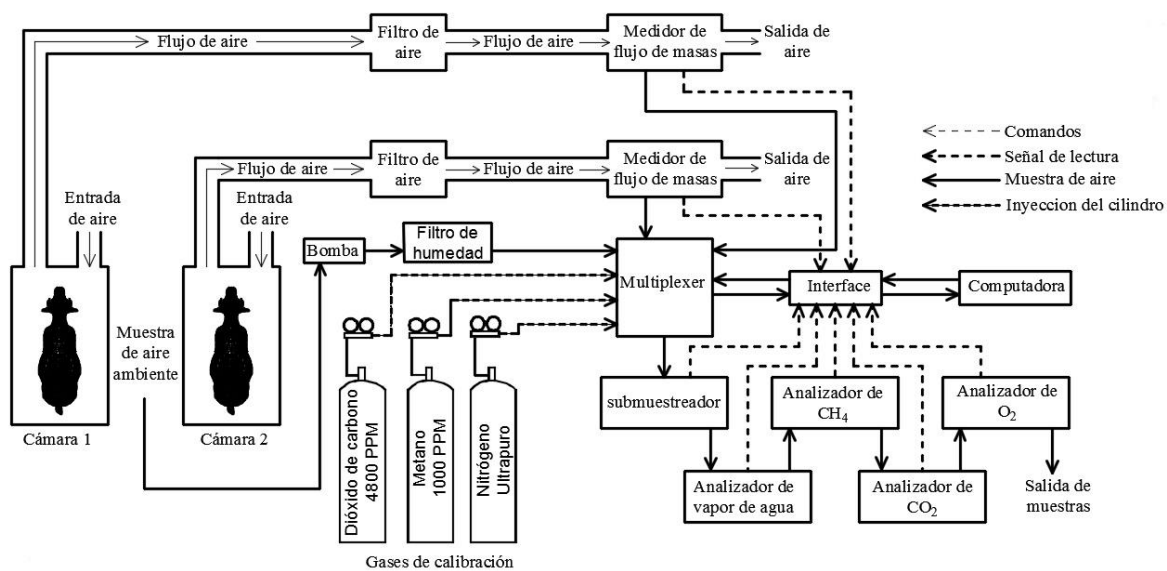


Figura 2. Diagrama de sistema de cámaras de respiración de circuito abierto. Todos los equipos, sin incluir las cámaras, provienen de la empresa Sable System (USA, Nevada). (Ku-Vera et al., 2018)

Ecuaciones para el procesamiento de la información

Como se indicó anteriormente, la finalidad de las cámaras de circuito abierto es cuantificar el volumen consumido de O₂ (VO₂) y los volúmenes producidos de CO₂ y CH₄ (VCO₂ y VCH₄, respectivamente). Una vez el aire ingresa a la cámara, como resultado de la actividad respiratoria del animal, la concentración de O₂ disminuye, y las concentraciones de CO₂ y CH₄ aumentan; además, el contenido de vapor de agua también aumenta. Por consiguiente, para cuantificar su variación se debe conocer el volumen (FRI) y la concentración de gases (fiO₂, fiCO₂, fiCH₄ y fiH₂O) en el aire que ingresa a la cámara (línea base), que usualmente es del ambiente, y el volumen (FRe) y la concentración de gases (feO₂, feCO₂, feCH₄ y feH₂O) en el aire que sale de la cámara, ya modificado por la presencia del animal. Las ecuaciones que se indican a continuación son un extracto del libro “Measuring Metabolic Rates, a manual for scientists” (Lighton, 2008). La letra “f” corresponde al valor fraccional de cada uno de los gases por ejemplo fiO₂ = 0,2095 y fiCO₂ = 0,0005. Considerando que el O₂ es consumido y el CO₂, CH₄ y H₂O producidos:

$$VO_2 = FRi (fiO_2) - FRe (feO_2) \quad (1.1)$$

$$CO_2 = FRe (feCO_2) - FRi (fiCO_2) \quad (1.2)$$

$$CH_4 = FRe (feCH_4) - FRi (fiCH_4) \quad (1.3)$$

$$H_2O = FRe (feH_2O) - FRi (fiH_2O) \quad (1.4)$$

Para calcular los volúmenes de los diferentes gases se parte del principio que el nitrógeno (N) presente en el aire no es modificado por el animal, es decir, el N que entra y sale de la cámara es el mismo. Este principio nos indica que el flujo de entrada y salida del N es el mismo, lo que conlleva a:

$$FRi = (1 - fiO_2 - fiCO_2 - fiCH_4 - fiH_2O) = FRe = (1 - feO_2 - feCO_2 - feCH_4 - feH_2O) \quad (1.5)$$

Estas dos ecuaciones son equivalentes, por ende, se puede determinar el volumen de entrada o de salida, ya sea para un sistema de aire empujado o de succión, respectivamente. En el caso de un sistema de succión, se calcula el flujo de entrada, ya que el de salida es medido por los FK.

$$FRi = FRe (1 - feO_2 - feCO_2 - feCH_4 - feH_2O) / (1 - fiO_2 - fiCO_2 - fiCH_4 - fiH_2O) \quad (1.6)$$

Calcular el FRi a partir del FRe es un poco más complicado y se puede hacer de tres formas:

1. Directamente (FRe)
2. Filtrando el vapor de agua presente (FRe[`]). No es necesario filtrarlo si se cuenta con la medición del PVA y la BP. Para calcularlo se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$FRc = FR (BP - PVA) / BP \quad (1.7)$$

Donde, FRc = flujo corregido por vapor de agua.

3. Filtrando el vapor de agua y el CO₂ presente (FRe^{``}). Filtrar el vapor de agua y el CO₂ producidos por animales de gran tamaño como los bovinos es poco práctico y costoso, dada su cuantía. En este caso se considera útil considerar para los

cálculos que el FRe contiene CO₂ y CH₄ y el vapor de agua ha sido eliminado. Los gases que entran a la cámara (línea base), el flujo de aire de entrada (FRi), los gases de salida y el flujo de salida (FRe) deben ser corregidos por el contenido de vapor de agua utilizando la ecuación 1.7 de la siguiente manera:

$$O_2^{\text{`}} = O_2 \times BP / (BP - PVA) \quad (1.8)$$

$$CO_2^{\text{`}} = CO_2 \times BP / (BP - PVA) \quad (1.9)$$

$$CH_4^{\text{`}} = CH_4 \times BP / (BP - PVA) \quad (1.10)$$

Donde O₂[`], CO₂[`] y CH₄[`] corresponden a la concentración de los gases sin humedad.

Estas ecuaciones son inversas a la 1.7 debido a que los gases se concentran cuando el vapor de agua es retirado, a comparación del flujo que se reduce.

Para cuantificar VO₂ hay que considerar que hay una compleja interacción entre el CO₂ y el O₂. No solo se produce CO₂ por el animal, diluyendo la concentración de O₂, sino que también el O₂ a su vez está siendo consumido, lo cual lo diluye más. A su vez, la producción de CH₄ diluye tanto el CO₂ como el O₂. Esta problemática se elimina cuando el CO₂ y el vapor de agua son filtrados antes de que pasen por los medidores de flujos de masas y analizadores.

Para determinar el VO₂, sin filtrar el CO₂, se puede considerar el coeficiente de respiración (CR) así:

$$VO_2 = FRe (fiO_2 - f^{\text{`}}eO_2) / [1 - fiO_2 (1 - CR)] \quad (1.11)$$

Sin embargo, el coeficiente de respiración no se conoce y se debe suponer. Si se supone un CR de 0,8 y en realidad es 0,7 se puede estar incurriendo en un error del 3%.

En lugar de suponer el CR se puede utilizar la concentración fraccional de O₂, CO₂ y CH₄ para calcular VO₂, VCO₂ y VCH₄, así:

$$VO_2 = FRe [(fiO_2 - f^{\text{`}}eO_2) - fiO_2 (f^{\text{`}}eCO_2 - fiCO_2) - fiO_2 (f^{\text{`}}eCH_4 - fiCH_4)] / (1 - fiO_2) \quad (1.12)$$

$$V_{CO_2} = F_{Re} [(f'_{eCO_2} - f_{iCO_2}) + f_{iCO_2} (f_{iO_2} - f'_{eO_2}) + f_{iCO_2} (f'_{eCH_4} - f_{iCH_4})] / (1 - f_{iCO_2})$$

(1.13)

$$V_{CH_4} = F_{Re} [(f'_{eCH_4} - f_{iCH_4}) + f_{iCH_4} (f_{iO_2} - f'_{eO_2}) + f_{iCH_4} (f'_{eCO_2} - f_{iCO_2})] / (1 - f_{iCH_4})$$

(1.14)

En este caso, el aire que sale de la cámara (F_{Re}) y entra al medidor de flujo de masas es corregido por vapor de agua con la ecuación 1.7 y luego una sub-muestra sale a los analizadores sin filtrar el CO_2 .

Debido a que en estas ecuaciones se utiliza la fracción entre el O_2 , el CO_2 y el CH_4 , los tiempos de respuesta de los respectivos analizadores deben ser corregidos para hacerlos los más similar posible. Esto es crítico cuando los valores cambian rápidamente en respuesta al metabolismo del animal. Si no se hacen las correcciones en el tiempo de respuesta, alternativamente se pueden promediar las concentraciones fraccionales en periodos lo suficientemente largos para hacer que las diferencias entre los tiempos de respuestas sean insignificantes.

Cambio climático y gases de efecto invernadero

Por definición, el cambio climático es la variación del estado del clima y supone un incremento de la temperatura media, que está asociado con un incremento de la frecuencia de fenómenos climáticos extremos (IPCC, 2007). El cambio climático global no es un fenómeno nuevo, el planeta tierra ha presentado diferentes cambios de temperatura a través de la historia. No obstante, en las últimas décadas hay un incremento inusual y acelerado de la temperatura en la corteza terrestre, en promedio de $0,6^{\circ}C$. La década de los 90 fue la más cálida del milenio y los tres años más calurosos del siglo fueron 1998, 2001 y 2003 (IPCC, 2007). Como consecuencia del calentamiento global, el nivel del mar ha incrementado, los casquetes polares y los glaciares se están derritiendo y, los patrones en el clima y las corrientes oceánicas son altamente variables (Steinfeld et al., 2006). Desde la revolución industrial la emisión de diferentes gases a la atmosfera ha aumentado considerablemente.

Los GEI son aquellos gases presentes en la atmósfera terrestre que absorben y emiten radiación de onda larga dentro del rango infrarrojo. La atmósfera es un recubrimiento delgado de gases, partículas y nubes alrededor del planeta. Todos los gases contaminantes producidos por los humanos están siendo depositados en esta capa, dando como resultado una alta concentración de CO₂ en la atmósfera. Sin embargo, el CO₂ cumple un papel importante en mantener el planeta a una temperatura adecuada para la conservación de la vida. Sin la capa de CO₂, y otros gases, la temperatura terrestre promedio sería de -6°C y no de 15°C, como lo es actualmente (Riebeek, 2011). Muchos de los gases presentes en la atmósfera tienen la capacidad de vibrar cuando son estimulados por ciertas longitudes de onda. La vibración hace que los átomos de los diferentes gases en la atmósfera colisionen emitiendo calor (Ramanathan y Feng, 2009). La mayor parte de este calor generado por las partículas no se escapa del planeta, por el contrario, permanece generando un exceso de calor proporcional a la cantidad de CO₂ producido en el planeta. Las ondas emitidas por la corteza terrestre no solo estimulan el CO₂ sino un gran número de otros gases. La capacidad de calentamiento que tiene los diferentes gases depende principalmente de su capacidad de vibración, la cantidad de frecuencias a las que son estimulados y su vida media en la atmósfera (Watson et al., 1992).

Entre los GEI hay algunos que generan mayor preocupación, ya sea por su alta producción o alto potencial de calentamiento. Entre los GEI más importantes se encuentran el vapor de H₂O, el ozono (O₃), el CO₂, el CH₄, el óxido nitroso (N₂O) y los que contienen sulfuros (SF₆). El vapor de H₂O es uno de los principales GEI responsable del calentamiento global (Tabla 1) (Kiehl y Trenberth, 1997); sin embargo, la mayoría se genera a partir de ciclos naturales y su vida media en la atmósfera es poca.

Los principales GEI provenientes de actividades antropogénicas, a saber, CO₂, CH₄ y N₂O, son los que pueden modificarse cambiando los sistemas en los cuales se producen.

Tabla 1. Contribución de los principales gases de efecto invernadero al calentamiento global.

Compuesto	Fórmula	Concentración en la atmósfera (ppm)	Contribución (%)
Vapor de agua	H ₂ O	10 – 50.000	36 - 72
Dióxido de carbono	CO ₂	400	9 – 26
Metano	CH ₄	1,8	4 – 9
Ozono	O ₃	2 - 8	3 – 7

Modificado de Kiehl y Trenberth (1997)

La capacidad de permanencia en la atmósfera de los diferentes GEI es altamente variable, ya que es totalmente dependiente de las condiciones ambientales. Sin embargo, los estudios muestran que la permanencia del CH₄, CO₂ y N₂O puede llegar a 12, 95 y 114 años, respectivamente (IPCC, 2007). Por otro lado, el CH₄ posee 72 veces más potencial de calentamiento que el CO₂ en un periodo de 20 años, sin embargo, ese potencial se reduce a 25 veces en un periodo de 100 años. En comparación, el N₂O posee 298 veces más potencial de calentamiento que el CO₂ en un periodo de 100 años (Tabla 2).

Tabla 2. Vida media atmosférica y potencial de calentamiento relativo al CO₂ de los principales gases de efecto invernadero antropogénicos.

Gas	Vida media (años)	Potencial de calentamiento para un periodo determinado	
		20 años	100 años
Dióxido de carbono	30 - 95	1	1
Metano	12	72	25
Óxido nitroso	114	289	298
Hexafluoruro de azufre	3,200	16,300	22,800

IPCC, 2007.

Producción de metano entérico

Entre las actividades antropogénicas, el CH₄ es el segundo GEI que genera mayor impacto sobre el calentamiento global. Aproximadamente, 25% del total de las emisiones de CH₄ provienen de la minería y la combustión de recursos fósiles, un 6% de la producción química de material vegetal y un 69% de procesos microbianos (Conrad, 2009). Esto indica que la mayoría del CH₄ producido proviene de la fermentación microbiana, específicamente del metabolismo de las archeas metanogénicas (Mackie y Bryant, 1994). Las archeas metanogénicas son encontradas en sitios donde la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno o algún otro oxidante como nitratos, sulfatos o hierro férrico. Por ende, los cultivos de arroz son una de las actividades antropogénicas que más produce CH₄. Entre las fuentes antropogénicas, el 28% de las emisiones de CH₄ corresponden a la fermentación entérica de los rumiantes, con una producción global de 80 millones de toneladas por año (Beauchemin et al., 2008).

La celulosa es el polisacárido más abundante en la biosfera. Los microorganismos causantes de la degradación ruminal de la celulosa producen ácidos grasos volátiles (AGV) y otros gases como CO₂ y CH₄ (Lana et al., 1998). Al ser el ambiente ruminal altamente anaeróbico, los microorganismos utilizan la vía glucolítica para la obtención de energía. Consecuentemente, aumenta la concentración de NADH+H⁺ y disminuye la velocidad de fermentación (Beauchemin et al., 2008; Doré y Gouet, 1991) (Tabla 3). Para que la fermentación ruminal no se detenga, debe haber sumideros de hidrogeno que oxiden nuevamente el NADH en NAD e hidrógeno (H₂). El sumidero con mayor importancia en el ambiente ruminal es el CO₂, generando CH₄ (Moss et al., 2000). Los hidrógenos también participan en la formación de ácido propiónico, ácido butírico (Tabla 3) etanol, lactato y en la biohidrogenación de los ácidos grasos insaturados (Van Soest, 1994).

La mayoría del CH₄ producido por los rumiantes es eructado. Aproximadamente, un 87% del CH₄ proviene del rumen y un 13% del tracto digestivo posterior, el cual se reabsorbe al torrente sanguíneo y pasa a los pulmones. Solamente el 1,5% del CH₄ se elimina por las excretas (Berra y Finister, 2002).

Tabla 3 Principales reacciones de producción y consumo de H₂ en el rumen

Reacciones productoras de H ₂ :	Reacciones sumideros de H ₂ :
Glucosa → 2 Piruvatos + 4H ₂	Piruvato + 4H → Propionato (C3) + H ₂ O
Piruvato + H ₂ O → Acetato (C2) + CO ₂ + 2H	2 C2 + 4H → Butirato (C4) + 2 H ₂ O
	CO ₂ + 8H → Metano (CH ₄) + 2 H ₂ O

Modificado de Moss et al. (2000)

La metanogénesis ruminal es directamente afectada por la relación acetato/propionato, y ésta a su vez por la calidad de la dieta. Para que no ocurran pérdidas energéticas por producción de CH₄, la relación entre estos AGV debe ser 0,5, sin embargo, en condiciones de alimentación, la misma puede variar entre 0,9 a 4,0 (Carmona et al., 2005). Sistemas de producción extensivos, basados exclusivamente en el pastoreo, con mínima o nula suplementación, aumentan la producción de acetato y CH₄. La producción anual aproximada de CH₄ fluctúa entre 60 y 126 kg para un bovino adulto (Johnson y Johnson, 1995), 32 y 83 kg para novillas de carne y, 60 y 95 kg para vacas adultas (DeRamus et al., 2003).

La producción de CH₄ entérico depende directamente de los microorganismos productores de H₂, a saber, los hongos, bacterias fibrolíticas y protozoarios. Estos microorganismos viven en simbiosis, especialmente los protozoarios con las *archaea* metanogénicas, principales productores de CH₄ en el ambiente ruminal (Kobayashi, 2010; Bodas et al., 2012).

Mitigación de metano entérico

Los principales factores a tener en cuenta cuando se implementen estrategias de mitigación de CH₄ entérico son la producción de hidrógenos, su utilización y la comunidad de metanógenos. Por ende, se deben alcanzar las siguientes metas: que la reducción de la producción de hidrógenos no comprometa la digestibilidad del alimento; que los subproductos producidos por las rutas metabólicas que utilicen hidrógenos sean benéficos para el animal; y/o, que se inhiban en cantidad y/o actividad las *archeas* metanogénicas (Martin et al., 2010). Entre las diferentes estrategias para mitigar el CH₄ se encuentran la manipulación de los animales, del rumen y de la dieta.

Manipulación animal

La estrategia de manipulación animal para disminuir la producción de CH₄ se basa en que hay un componente genético en dicha producción. Factores como la producción de CH₄ por cada kg de materia seca consumida, el consumo residual de alimento (CRA), y la eficiencia de utilización de los nutrientes es diferente entre razas e individuos, posibilitando la selección de animales con menor producción de CH₄. Información obtenida ha demostrado que la selección genética de animales más eficientes puede disminuir del 10 al 20% las pérdidas de CH₄ durante la digestión (Waghorn et al., 2006).

Manipulación ruminal

La estrategia consiste en manipular las poblaciones microbianas a través del control biológico o la adición de químicos. El control biológico es la inclusión de bacteriófagos o bacteriocinas que inhiban a los metanógenos y redireccionen el hidrógeno a otras rutas metabólicas (McAllister y Newbold, 2008). En el caso de los agentes químicos implica la adición de compuestos como vacunas, análogos halogenados como bromoclorometano (BCM) y cloroformo o ionóforos como la monensina. Estudios con vacunas han mostrado reducciones del 7,7% (con base en el consumo de materia seca-CMS), sin embargo, el estudio no fue repetible con vacunas realizadas después (Wright et al.,

2004). Las poblaciones ruminales difieren en cada zona, por ende, desarrollar una vacuna para un amplio número de casos es complicado (Wright et al., 2007). Por otro lado, con la utilización de BCM se han logrado disminuciones de 57, 84 y 91% (Tomkins y Hunter, 2003). A través de la disminución del número de protozoarios utilizando este agente, se ha logrado una reducción del 26% (McAllister y Newbold, 2008). A pesar de estos resultados, el efecto de este químico es transitorio y la aceptabilidad de su uso en dietas animales es difícil. Por último, con la utilización de ionóforos como la monensina los resultados son variables, desde ningún efecto hasta reducciones de 25%. Adicionalmente, el efecto de este ionóforo en el corto y largo plazo también es muy variable. Hay estudios que sugieren una adaptación de los microorganismos ruminales a este agente (Rumpler et al., 1986; Odongo et al., 2007). El uso de ionóforos no es permitido en muchos países, incluyendo la Unión Europea.

Manipulación de la dieta

La producción de CH₄ se puede modificar a partir del tipo de carbohidrato consumido, el nivel y frecuencia de consumo, la adición de lípidos y el contenido de metabolitos secundarios, entre otros.

Tipo de carbohidratos. La naturaleza y tasa de fermentación de los carbohidratos determina la proporción y producción de AGV, consecuentemente la producción de CH₄. La fermentación de paredes celulares produce más CH₄ que la fermentación de azúcares, que a su vez produce más CH₄ que el almidón (Johnson y Ward, 1996). Dietas basadas en pastos favorecen la producción de acetato e incrementan la producción de CH₄ por unidad de materia orgánica fermentable (MOF) (Johnson y Johnson, 1995). Cuando el consumo de concentrados se incrementó de 40 a 68 g MS/kg PV^{0,75} (MS: materia seca; PV^{0,75}: peso vivo metabólico), la producción de CH₄ se disminuyó de 9,2 a 5,3% de la EBc (McAllister et al., 1996). Con el suministro de fuentes fibrosas altamente digestibles como la pulpa de remolacha a niveles altos de CMS, Kujawa (1994) reportó una reducción de CH₄ correspondiente al 4-5% de la EBc.

Cuando se suministran dietas altas en carbohidratos estructurales, las pérdidas de EBc en forma de CH₄ son mayores que cuando se suministran azúcares y almidones. Esto es consecuencia de la disminución de la tasa fermentativa y la tasa de pasaje, que favorece mayor proporción acética:propionica (Hegarty y Gerdes, 1999). Por otro lado, dietas altas en granos, suministradas a elevados niveles de CMS, son asociadas con alta digestibilidad y tasas de pasaje, que promueven la producción de ácido propiónico. Además, la mayor digestibilidad disminuye el pH ruminal, inhibiendo el crecimiento de metanógenos y protozoos (Hegarty, 1999)

Nivel y frecuencia de consumo. El aumento en el nivel de consumo disminuye las pérdidas de CH₄ como porcentaje de la EBc. Por cada múltiplo de incremento en consumo, la producción de CH₄ disminuye 1,6% de EBc (Johnson y Johnson, 1995). Esta disminución se le adjudica al aumento en la tasa de pasaje del alimento por el rumen. Al aumentar la tasa de pasaje, el acceso de las bacterias a la materia orgánica (MO) disminuye, lo que a su vez disminuye la tasa de fermentación ruminal (Mathison et al. 1998). Okine et al. (1989) observaron una disminución de CH₄ del 29% aumentando la tasa de pasaje un 63%. Alrededor del 28% de la variación en la producción de CH₄ se le atribuye a la tasa de pasaje. Además, una alta tasa de pasaje promueve la producción de ácido propiónico que a su vez disminuye el CH₄.

Adición de lípidos. La suplementación de lípidos que no son protegidos de la degradación ruminal reduce las emisiones de CH₄. Se han encontrado reducciones mayores al 40% con alto nivel de suplementación de lípidos (Machmüller y Kreuzer 1999). Sin embargo, con inclusiones que no superan el 6-7%, la reducción es del 10-25% (Jordan et al. 2006).

La suplementación de lípidos en la dieta reduce las emisiones de CH₄ a través de la disminución en la digestibilidad de la fibra (McGinn et al. 2004) y la MS (Jordan et al. 2006), la fermentación de la MO y la actividad de los metanógenos y protozoarios. Además, la presencia de ácidos grasos insaturados, capta hidrógenos a partir de la biohidrogenación (Johnson y Johnson, 1995). De acuerdo con Machmüller et al. (2003),

el mecanismo más importante por el cual las grasas disminuyen el CH₄ es a través la toxicidad que generan en los metanógenos.

Metabolitos secundarios. Los árboles tropicales contienen una gama de metabolitos secundarios (Goel et al., 2008; Soliva et al., 2008; Bodas et al., 2012), entre ellos los taninos, que son compuestos polifenólicos que difieren en peso molecular y tienen la habilidad de modificar la fermentación ruminal debido a sus diferentes mecanismos de acción sobre los microorganismos y los compuestos estructurales de la ración. Particularmente, los taninos condensados (TC) crean complejos con las proteínas y los carbohidratos contenidos en los alimentos, haciéndolos menos digeribles y fermentables, reduciendo la formación de hidrógeno metabólico (H₂) (Rira et al., 2015). Adicionalmente, los TC tienen la capacidad de reducir la población protozoaria (Soliva et al., 2008; Puchala et al., 2012) y pueden afectar las poblaciones metanogénicas, específicamente *Methanobrevibacter ruminantium*, reduciendo su población hasta en un 12% (Tavendale et al., 2005; Bhatta et al., 2013). Se plantea que los taninos disminuyen la actividad y el crecimiento de los metanógenos ruminales, posiblemente por la adhesión a proteínas y enzimas del microorganismo (Liu et al., 2011).

Algunos autores indican que el peso molecular del TC tiene un impacto directo sobre la producción de CH₄, siendo mayor el impacto con pesos moleculares mayores (Rira et al., 2015). En la mayoría de estudios que incorporan TC se observa disminución en la emisión de CH₄ en relación con las dietas control (Tabla 4). Naumann et al. (2013) reportaron que concentraciones de TC superiores al 3% de la MS disminuyeron las emisiones de CH₄ *in vitro*, y que por debajo de este nivel la variación es alta y no consistente.

En el trópico se han identificado un número considerable de fuentes forrajeras y subproductos agroindustriales con presencia de TC en su composición. Dentro de este grupo están los subproductos agroindustriales como el orujo de uva (*Vitis vinífera*), derivado de la industria del vino y de la producción de jugos; la semilla de algodón (*Gossypium sp.*), como desecho de la extracción de la fibra de algodón; la pulpa de café

(*Coffea arabica*), como residuo de la producción del café y el matarratón (*Gliricidia sepium*), como recurso arbóreo. El contenido de TC puede variar entre 0,84-5,2% para el orujo de uva (Alipour y Rouzbehan, 2007; Baumgärtel et al., 2007; Vasta et al., 2010), 1,8-8,6% para la pulpa de café (Leifa et al., 2000; Bressani, 1987; Noriega et al., 2008), 0,78-5,2% para la semilla de algodón (Terril et al., 1992; Yu et al., 1996ab) y 0,04-4,3% para el matarratón (Lara et al., 2000; Varón y Granados, 2012; Onwuka, 1992) (valores expresados en la MS total).

Tabla 4. Efecto de los taninos condensados (TC) sobre la producción de metano.

Especie	TC (%MS)	Disminución en las emisiones de metano respecto al control (%)	Referencia
Caprinos	4	25,7	Moreira et al., 2013
Ovinos	1,53	47,5	Puchala et al., 2012
Bovinos	2,6	23,4	Woodward et al., 2002
Bovinos	2,6	66	Woodward, 2004
Bovinos	1 y 2	NA	Beauchemin et al., 2007
Bovinos	0,9-1,5	17- 30	Grainger et al., 2009
Bovinos	12,1	68,8	Poungchompu et al., 2009
Bovinos	0,2-1	25,7- 30	De Oliveira et al., 2007

Foiklang et al. (2016), si bien no midieron producción de CH₄, encontraron que el orujo de uva redujo la población de protozoarios en vacas lecheras, reducción que se atribuyó a los TC. En otro estudio realizado *in vitro* con diferentes tipos de uva y extractos provenientes del orujo de uva se encontró menor producción de CH₄ en comparación con la dieta control, sin embargo, esta disminución se adjudicó a la baja producción total de gases y no a un efecto directo sobre el CH₄ (Hixson et al., 2018). En dos estudios en que se utilizó orujo de uva en cantidades de 23% (Moate et al., 2014a) y 27% (Moate et al., 2014b) del total de la MS se reportó reducción en la producción de CH₄ del 14 y del 18%, respectivamente.

Con respecto al efecto de la pulpa de café sobre la producción de CH₄ entérico, la información es escasa. Sin embargo, algunos estudios evaluando la producción de biogas a partir de líquido ruminal y pulpa de café determinaron que hay una disminución en la producción de CH₄ debido a la presencia de taninos (Widjaja et al., 2017; Selvankumar et al., 2017).

La capacidad de la semilla de algodón para disminuir la producción de CH₄ se ha relacionado más con su composición oleica que con su contenido de TC. Chuntrakort et al. (2014) encontraron disminuciones hasta del 50,1% utilizando dietas oleosas, incluyendo semilla de algodón, en comparación con una dieta control en animales cebuinos. Grainger et al. (2010), alimentando vacas lecheras con semilla de algodón observaron una disminución persistente de la producción de CH₄ en el tiempo, del 13% en la semana 3 y del 23% en la semana 12, en comparación con una dieta control. Lamba et al. (2014) en un estudio realizado *in vitro* encontraron menor producción de CH₄ (ml/g de MS) con semilla de algodón respecto la dieta control, reducción atribuída a la presencia de gosispol.

Gliricidia sepium es un recurso arbóreo que ha mostrado tener efecto sobre los protozoarios del rumen (Galindo et al., 2016; Galindo et al., 2001). En un estudio *in vitro* se evidenció menor producción de CH₄, expresada en mg/g de MS, sin comprometer la digestión del forraje (Meale et al., 2012). Molina-Botero et al. (2019), utilizando ganado mestizo, evaluaron niveles crecientes de *Gliricidia sepium* y *Enterolonium cyclocarpum* juntos y en iguales proporciones (15, 30 y 45% de la MS). La adición de la mezcla al 15 y 30% disminuyó la emisión de CH₄ en 0,10 kg de CH₄/kg ganancia diaria de peso/año en comparación con el nivel del 45%. Sin embargo, la producción de CH₄ por CMS, consumo de materia seca digestible-CMSd y fibra detergente neutra digestible-FDNd fue estadísticamente igual en todos los niveles de inclusión.

Balance proteico en rumiantes

Conjuntamente con el estudio del balance energético, resulta importante determinar la eficiencia de utilización del N en las dietas para rumiantes. Para ello, es necesario introducir los conceptos de N consumido (NC), N digestible (ND) y N retenido (NR). El NC hace referencia al N total dietario que es consumido por el animal. Luego de sustraer las pérdidas de N en las heces se obtiene el ND, correspondiente al que alcanza el torrente sanguíneo. Finalmente, el NR resulta de la diferencia entre el ND y las pérdidas de N en la orina (Galo et al., 2003).

El N presente en las dietas de rumiantes puede provenir de compuestos solubles (aminoácidos libres, nitratos, amidas, aminos y ácidos nucleicos), compuestos insolubles degradables en rumen (principalmente N proteico), compuestos no degradables en el rumen, pero digestibles a nivel del intestino y, compuestos nitrogenados indigestibles (compuestos caramelizados o ligados a la lignina) (Haro y Haro, 2007). Otra forma de clasificar las fuentes de N en las dietas de rumiantes es dividirla en dos categorías. La primera categoría es la proteína verdadera y la segunda es el N no proteico (NNP). La proteína verdadera en los forrajes constituye entre el 60 al 80% del N total, el resto está conformado por NNP y por pequeñas cantidades de N lignificado (Van Soest, 1994).

Conocer el efecto de los microorganismos y del animal sobre el NC es fundamental para comprender la utilización del N. La proteína dietaria es degradada hasta péptidos, aminoácidos y amoniaco por bacterias y protozoarios en el retículo-rumen. Estos tres elementos son utilizados para la síntesis de proteína microbiana (PMo). La porción proteica no degradable en rumen (PNDR) más la PMo que son digestibles, son las fuentes que proveen de aminoácidos al animal (Church, 1993), denominada proteína metabolizable (PM). Cuando la degradación proteica en el rumen es rápida, los microorganismos no alcanzan a utilizar los diferentes subproductos proteicos para la síntesis de PMo. Este N no utilizado se pierde en forma de amoniaco, alcanza el torrente sanguíneo y debido a su toxicidad, debe ser convertido en urea por el hígado,

con el respectivo gasto energético (Huntington, 1999). Los microorganismos pueden utilizar la urea reciclada al rumen a través de la saliva y la pared ruminal. Por ende, la cantidad de proteína que llega al abomaso y al intestino puede exceder a la proteína dietaria (Broderick, 1996).

Utilización del nitrógeno por los microorganismos

Algunos de los factores que afectan la degradación y utilización de las proteínas o compuestos nitrogenados incluye la celulolisis, producción de AGV, metanogénesis, cinética de pasaje de la digesta, degradación del almidón, pH ruminal, potencial redox, osmolaridad ruminal e hidrogenación de ácidos grasos (Jouany, 1996). Debido a la complejidad de la utilización del N, se sugiere expresar los requerimientos para ruminantes en términos de proteína degradable y PM. La proteína degradable es aquella disponible para los microorganismos y la metabolizable es la que es utilizada por el animal.

La degradabilidad de la proteína depende del tipo de proteína que ingresa al rumen. La solubilidad de la proteína es un factor que determina el acceso de las proteasas microbiales. Las glutelinas y prolaminas, que son insolubles, se degradan lentamente; por otro lado, las globulinas son solubles y altamente degradables (Romagnolo et al., 1994). Además de la solubilidad, la estructura también determina la degradabilidad. Por ejemplo, algunas albúminas son solubles, sin embargo, la presencia de enlaces disulfuro las hace lentamente degradables (Schwingel y Bates, 1996). Adicionalmente, los productos finales de la degradación de los aminoácidos (AA) regulan la tasa de degradación. Velle et al. (1997) ingresaron niveles crecientes de AA al rumen (75, 150, 300 y 600 mmol) y encontraron que la tasa de degradación disminuyó a medida que aumentó la concentración de AA.

La degradación proteica en rumen es inversamente proporcional a la tasa de pasaje (Ørskov y McDonald, 1979). Otros de los factores determinantes de la degradación proteica son el pH ruminal y el sustrato. El pH óptimo para las enzimas proteolíticas varía entre 5,5 y 7,0 (Kopečný y Wallace, 1982), sin embargo, en el límite inferior la

degradabilidad se disminuye (Cardozo et al., 2002). Según Siddons y Paradine (1981) y Wallace et al. (1997), las bacterias amilolíticas tienden a ser más proteolíticas que las celulolíticas, sin embargo, los estudios por Cardozo et al. (2000, 2002) indican que la degradabilidad de la proteína se disminuye cuando el sustrato para la bacteria proviene de dietas altas en concentrado, independiente del pH.

Otro de los factores que afecta la degradación de la proteína en el rumen es la interacción con otros nutrientes. (Assoumani et al. (1992) demostraron que la adición de amilasas incrementó la degradación ruminal entre 6 y 29%, lo que sugiere que el almidón interfiere en la degradación. Otros autores encontraron que la proteína que está ligada a la fibra detergente neutra (FDN) únicamente se degrada por bacterias proteolíticas después de la despolimerización de la celulosa (Debroas y Blanchart, 1993). Este último hallazgo fue soportado por el estudio de Kohn y Allen (1995), quienes reportaron un incremento de 42,2 a 53,1% en la degradación proteica con la adición de celulasas. La interacción entre nutrientes se evidencia claramente en un estudio donde encontraron una reducción en la digestión de la proteína bruta (PB) y FDN cuando el pH disminuyó de 6,3 a 5,9. En este caso, el conteo de bacterias proteolíticas no se afectó, sin embargo, el conteo de bacterias celulolíticas disminuyó un 50% (Endres y Stern, 1993). Esto indica la necesidad de una interacción de nutrientes y poblacional para la degradación proteica.

La PMo puede suplir más del 50% (AFRC, 1993) de los aminoácidos requeridos por los animales, dependiendo de la PNDR. Claramente, se evidencia la importancia de la síntesis PMo para suplir los requerimientos de proteína de una manera económica.

Los carbohidratos (CHO) son la fuente principal de energía para las bacterias, sin embargo, las cadenas de carbono provenientes de los CHO en combinación con el amonio (NH_4^+) del rumen también se pueden utilizar para síntesis proteica. Los CHO de rápida fermentación como almidones y azúcares son más efectivos para la síntesis proteica que otros CHO de lenta fermentación como la celulosa (Stern y Hoover, 1979). La inclusión de CHO altamente fermentables resulta en una disminución del NH_4^+ ruminal debido al aumento en el consumo de N por las bacterias (Cameron et al., 1991). La proporción de carbohidratos no estructurales (CNE) y N proveniente del NH_4^+ no ha

sido determinada. En condiciones de pH controlado, Hoover y Stokes (1991) proponen una proporción CNE:PDR (proteína degradable en rumen) de 2:1.

Cuando la tasa de degradación de las proteínas excede la tasa de fermentación de los CHO, altas cantidades de N se pueden perder en forma de NH_4^+ . Cuando la tasa de fermentación de los CHO supera la tasa de degradación de las proteínas, la síntesis de PMo disminuye (Nocek y Russell, 1988).

Una de las mayores dificultades para determinar los requerimientos energéticos y proteicos que garanticen el máximo potencial ruminal, es que los estudios son muy disímiles en dietas e ingredientes, lo que conlleva a resultados variables y difíciles de agrupar. Las bases teóricas de la sincronía entre proteína y energía existen, sin embargo, el rumen es un ecosistema muy complejo y cuando se determina una proporción, una población específica se beneficia y otra no. Estas situaciones son variables por región. Algunos autores han intentado proponer modelos simples para determinar requerimientos energéticos y proteicos basados en subpoblaciones bacterianas. Los microorganismos que degradan carbohidratos estructurales (CE) tienen altos requerimientos en mantenimiento, crecen despacio y usan el N amoniacal como su principal fuente de N. Por otro lado, los microorganismos que degradan CNE (amilolíticos) tienen bajos requerimientos de mantenimiento, crecen rápido y usan amonio, péptidos y AA como sus fuentes de N (Russell et al., 1992).

Las bacterias celulolíticas, a pesar de que su principal fuente de N es el amoniacal, también utilizan los AA y péptidos. En cultivos puros de bacterias celulolíticas se demostró que a medida que se incrementó la concentración de AA, la incorporación de N amoniacal en las células microbianas disminuyó, sugiriendo la utilización de los AA. Además, en ese mismo experimento, se reportó una preferencia de las bacterias celulolíticas por la utilización de los AA como fuente de N comparado con los péptidos (Atasoglu et al. 2001).

Las bacterias que fermentan CNE derivan hasta el 66% de su proteína de péptidos y AA, el resto proviene de N amoniacal. Por ende, asumiendo que las bacterias transforman los péptidos disponibles en PMo con una eficiencia del 80%, y que pueden usar el 66% del N disponible en forma de péptidos, se puede concluir que, para

maximizar la síntesis de PMo, las bacterias necesitan 1,2 g de N a partir de péptidos por kg de MO fermentada en rumen (Russell et al., 1983). Igualmente, se ha demostrado que la acumulación de NH_4^+ en el rumen aumenta la utilización de péptidos y AA, ya sea como fuente de N, o como fuente de energía (cadenas de carbonos). Debido a esto, la utilización de N a partir de NH_4^+ es variable y la proporción 1,2 g/kg de MO fermentada no aplica para todas las dietas (Siddons et al., 1985; Firkins et al., 1987).

Cuando las dietas presentan alta y baja digestibilidad hay disminución en la síntesis de PMo. Las dietas con alta digestibilidad, generalmente basadas en granos, reducen el pH, el recambio proteico y la eficiencia de conversión de la PDR a PMo. En este tipo de dietas, una reducción del 1% en la fibra detergente neutra efectiva (FDNe), cuando la concentración de este nutriente es menor al 20%, disminuye la producción de PMo 2,2% (Russell et al., 1992). Cuando las dietas presentan baja digestibilidad, disminuye la tasa de pasaje, aumenta la demanda de energía digestible para el mantenimiento microbiano y se reduce la síntesis de PMo.

Utilización del nitrógeno por el animal

Los requerimientos de proteína pueden ser determinados por balances de N (INRA, 1989; CSIRO, 2007), o a partir del crecimiento animal (NRC, 2000). Wilkerson et al. (1993) encontró que terneros en crecimiento necesitaron 3,8 g PM/kg $\text{PV}^{0,75}$, valor adoptado por el NRC (2000) para estimar los requerimientos de mantenimiento.

El BR-CORTE (2016) (Rotta et al., 2016), considerando un requerimiento neto de proteína para mantenimiento de 2,69 g/kg $\text{PC}^{0,75}$ y un factor de 0,667 para convertir los requerimientos netos en requerimientos de PM, propone un requerimiento diario de 4,0 g PM/kg $\text{PC}^{0,75}$, próximo al valor recomendado por el NRC (2000), no observando efecto del grupo genético y del grupo sexual en animales en confinamiento. Para animales en pastoreo, las exigencias son 8% superiores.

Con respecto a los requerimientos de proteína para la ganancia, dependen de la proporción y la velocidad con que los tejidos se acumulan en el cuerpo. La proporción de tejidos y su composición química depende de varios factores, entre ellos el grupo genético. Los requerimientos netos de proteína tienden a ser menores para bovinos en crecimiento con madurez precoz, como aquellos de las razas Angus y Hereford, ya que ocurre menor retención de energía en forma de proteína (Rotta et al, 2016).

La síntesis neta de proteína en los tejidos representa un equilibrio entre la síntesis y la degradación. La tasa de síntesis y degradación de la proteína supera la tasa a la cual se deposita la proteína como tejido en el cuerpo del animal. En el experimento de Davis et al. (1981) se estimó que la síntesis de proteína en corderos era aproximadamente 600 g/d y sólo 20 a 30 g/d eran depositados en el tejido, equivalente a una ganancia de 190 g/d. Un novillo de 500 kg con una acumulación neta diaria de 150 g de proteína, degrada y vuelve a sintetizar, al menos, 2550 g. Por lo tanto, la acumulación neta representa sólo alrededor del 5,5% de la síntesis de proteína diaria total. El metabolismo de las proteínas es muy dinámico, y se necesita un enfoque cinético para predecir con precisión los requerimientos de AA. Pequeños cambios en la tasa de síntesis o degradación pueden causar grandes alteraciones en la tasa de ganancia (NRC, 2000). El recambio proteico no es completamente eficiente y se registra pérdida de AA. La capacidad de almacenamiento de AA en el cuerpo del animal es baja y muchos son desaminados y oxidados. Además, otros AA se convierten en compuestos que no pueden ser reutilizados, o hacen parte del pelo, lana, tejido epitelial, cuernos, entre otros. Las eficiencias de utilización de los AA absorbidos son amplias e inciertas. La máxima eficiencia en la utilización de los AA se da cuando estos son el primer nutriente limitante. Además, la proteína es usada por los tejidos como AA individuales y la mayor eficiencia de utilización se registra cuando el pool de AA disponibles corresponda a las cantidades requeridas por el tejido.

Ahora, el recambio de proteínas en los tejidos consume energía y, en consecuencia, reduce la eficiencia de la retención corporal de proteína. Como los tejidos proteicos tienen mayor actividad metabólica y requieren más energía que el tejido adiposo, se

puede inferir que la eficiencia decrece como la proporción de proteína en la ganancia de masa corporal incrementa. Henrique et al. (2009) estimaron la eficiencia energética de la retención corporal de proteínas en ganado *Bos indicus* y *Bos indicus***Bos taurus* en condiciones tropicales y no encontrando diferencia entre ellos. Los valores estuvieron muy próximos ($k_p=20\%$) a los encontrados por otros autores (Geay, 1984; Williams y Jenkins, 2003)

Para convertir las exigencias de proteína neta en exigencias de proteína metabolizable se requiere conocer la eficiencia de utilización de la PM para la ganancia de peso (k), la cual depende del perfil de AA aportados por la proteína microbiana y la PNDR digestibles y del peso corporal (la eficiencia disminuye con aumento del peso). El sistema BR-CORTE (2016) (Rotta et al., 2016) evaluó la proteína retenida en función del consumo de PM y no encontró efecto del grupo genético o la condición sexual sobre el valor de k , proponiendo un valor de 46,9% para animales cebuínos y cruzados productores de carne, siendo este valor próximo al del NRC (2000), de 49,2%.

Respecto el N consumido, la utilización por el rumiante es ineficiente. Se reporta que solo el 30% del N es convertido en tejido y el resto es excretado en la orina y las heces (Tamminga, 1992). La eficiencia de la utilización del N puede mejorar reduciendo su concentración en la dieta. Esto fue evidenciado por Kalscheur et al. (2006), quienes reportaron eficiencias de 28,2 y 36,5% para 17,1 y 12,3% PB. También Ipharraguerre y Clark (2005) reportaron que aumentos en la PB, de 14,8 a 19,0%, se acompañaron de reducción en la eficiencia de utilización de N, de 32 a 25%, y de aumento en las pérdidas de N urinario como proporción del N consumido, de 27 a 33%. La disminución en la PB disminuye el N excretado, principalmente por orina, ya que la pérdida de N por las heces es relativamente constante (NRC, 2001).

Bibliografía

Agricultural and Food Research Council (Great Britain). Technical Committee on Responses to Nutrients. Energy and protein requirements of ruminants: an advisory manual. CAB international; 1993.

Agricultural Research Council (Great Britain), Commonwealth Agricultural Bureaux. The nutrient requirements of ruminant livestock: technical review. CAB Intl; 1980.

Alipour D, Rouzbehan Y. Effects of ensiling grape pomace and addition of polyethylene glycol on in vitro gas production and microbial biomass yield. *Animal Feed Science and Technology*. 2007 Sep 1;137(1-2):138-49.

Armsby HP, Fries JA. The influence of type and of age upon the utilization of feed by cattle. US Department of Agriculture, Bureau of Animal Industry; 1911.

Assoumani MB, Vedeau F, Jacquot L, Sniffen CJ. Refinement of an enzymatic method for estimating the theoretical degradability of proteins in feedstuffs for ruminants. *Animal feed science and technology*. 1992 Nov 30;39(3-4):357-68.

Atasoglu C, Newbold CJ, Wallace RJ. Incorporation of [¹⁵N] Ammonia by the Cellulolytic Ruminant Bacteria *Fibrobacter succinogenes* BL2, *Ruminococcus albus* SY3, and *Ruminococcus flavefaciens* 17. *Appl. Environ. Microbiol.* 2001 Jun 1;67(6):2819-22.

Baumgärtel T, Kluth H, Epperlein K, Rodehutschord M. A note on digestibility and energy value for sheep of different grape pomace. *Small Ruminant Research*. 2007 Feb 1;67(2-3):302-6.

Beauchemin KA, Kreuzer M, O'mara F, McAllister TA. Nutritional management for enteric methane abatement: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 2008 Jan 21;48(2):21-7.

Beauchemin KA, McGinn SM, Martinez TF, McAllister TA. Use of condensed tannin extract from quebracho trees to reduce methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*. 2007 Aug 1;85(8):1990-6.

- Berra G, Finster L. Emisión de gases de efecto invernadero. IDIA XXI-INTA. 2002 Jul.
- Bhatta R, Enishi O, Yabumoto Y, Nonaka I, Takusari N, Higuchi K, Tajima K, Takenaka A, Kurihara M. Methane reduction and energy partitioning in goats fed two concentrations of tannin from Mimosa spp. *The Journal of Agricultural Science*. 2013 Feb;151(1):119-28.
- Bodas R, Prieto N, García-González R, Andrés S, Giráldez FJ, López S. Manipulation of rumen fermentation and methane production with plant secondary metabolites. *Animal Feed Science and Technology*. 2012 Sep 21;176(1-4):78-93.
- Bressani R. Anti-physiological factors in coffee pulp. Composition, technology and utilization. Guatemala City: Institute of Nutrition of Central America and Panama. 1987p. 83-88.
- Broderick GA. Altering ruminal nitrogen metabolism to improve protein utilization. Introduction. *The Journal of nutrition*. 1996 Apr;126(4 Suppl):1324S.
- Cameron MR, Klusmeyer TH, Lynch GL, Clark JH, Nelson DR. Effects of urea and starch on rumen fermentation, nutrient passage to the duodenum, and performance of cows. *Journal of Dairy Science*. 1991 Apr 1;74(4):1321-36.
- Cannas A, Atzori AS, Teixeira IA, Sainz RD, Oltjen JW. The energetic cost of maintenance in ruminants: from classical to new concepts and prediction systems. *Energy and protein metabolism and nutrition*. Netherlands: Wageningen Academic Publishers. 2010 Dec 1:531-42.
- Cardozo P, Calsamiglia S, Ferret A. Effect of pH on microbial fermentation and nutrient flow in a dual flow continuous culture system. *J. Dairy Sci*. 2000;83(Suppl 1):265.
- Cardozo P, Calsamiglia S, Ferret A. Effects of pH on nutrient digestion and microbial fermentation in a dual flow continuous culture system fed a high concentrate diet. *J. Dairy Sci*. 2002;85(Suppl 1):182.

Carmona JC, Bolívar DM, Giraldo LA. El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 2005;18(1):49-63.

Chizzotti ML, Tedeschi LO, Valadares Filho SC. A meta-analysis of energy and protein requirements for maintenance and growth of Nellore cattle. *Journal of Animal Science*. 2008. 86: 1588–97.

Chuntrakort P, Otsuka M, Hayashi K, Takenaka A, Udchachon S, Sommart K. The effect of dietary coconut kernels, whole cottonseeds and sunflower seeds on the intake, digestibility and enteric methane emissions of Zebu beef cattle fed rice straw based diets. *Livestock Science*. 2014 Mar 1;161:80-9.

Church DC. *El Rumiante: fisiología digestiva y nutrición*. Ed. Acribia. Zaragoza, España. 1993.

Conrad R. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved. *Environmental microbiology reports*. 2009 Oct;1(5):285-92.

Davis SR, Barry TN, Hughson GA. Protein synthesis in tissues of growing lambs. *British Journal of Nutrition*. 1981 Nov;46(3):409-19.

De Oliveira SG, Berchielli TT, dos Santos Pedreira M, Primavesi O, Frighetto R, Lima MA. Effect of tannin levels in sorghum silage and concentrate supplementation on apparent digestibility and methane emission in beef cattle. *Animal Feed Science and Technology*. 2007 Jun 15;135(3-4):236-48.

Debroas D, Blanchart G. Interactions between proteolytic and cellulolytic rumen bacteria during hydrolysis of plant cell wall protein. *Reproduction Nutrition Development*. 1993;33(3):283-8.

DeRamus HA, Clement TC, Giampola DD, Dickison PC. Methane emissions of beef cattle on forages. *Journal of environmental quality*. 2003 Jan 1;32(1):269-77.

Doré J, Gouet P. *Microbial interactions in the rumen. Rumen microbial metabolism and ruminant digestion*. Paris, France. 1991:71-88.

Endres MI, Stern MD. Effects of pH and diets containing various levels of lignosulfonate-treated soybean meal on microbial fermentation in continuous culture. *J. Dairy Sci.* 1993;76(Suppl 1):177.

Ferrell CL. Energy partitioning in ruminants as related to feed intake. *Proceedings of the Canadian Society of Animal Science.* 2003 Jul 10.

Ferrell CL, Jenkins TG. Body composition and energy utilization by steers of diverse genotypes fed a high- concentrate diet during the nishing period: II. Angus, Boran, Brahman, Hereford, and Tuli Sires. *Journal of Animal Science.* 1998. 76: 647–57.

Firkins JL, Berger LL, Merchen NR, Fahey Jr GC, Mulvaney RL. Ruminant nitrogen metabolism in steers as affected by feed intake and dietary urea concentration. *Journal of Dairy Science.* 1987 Nov 1;70(11):2302-11.

Foiklang S, Wanapat M, Norrapoke T. Effect of grape pomace powder, mangosteen peel powder and monensin on nutrient digestibility, rumen fermentation, nitrogen balance and microbial protein synthesis in dairy steers. *Asian-Australasian journal of animal sciences.* 2016 Oct;29(10):1416.

Fox DG, Black JR. A system for predicting body composition and performance of growing cattle. *Journal of Animal Science.* 1984 Mar 1;58(3):725-39.

Freitas JA, Queiroz AC, Dutra AR, Vieira RAM, Lana RP, Leonel FP, Henrique DS, Lima AV, Souza JC. Body composition and net energy requirements for maintenance of feedlot purebred and crossbred Nelore young bulls. *Brazilian Journal of Animal Science,* 2006. 35, 878–85.

Galindo J, González N, Marrero Y, Sosa A, Ruiz T, Febles G, Torres V, Aldana AI, Achang G, Moreira O, Sarduy L. Effect of tropical plant foliage on the control of methane production and in vitro ruminal protozoa population. *Cuban Journal of Agricultural Science.* 2016 Mar 9;48(4).

Galindo J, Marrero Y, González N, Aldama AI. Effect of *Gliricidia sepium* on rumen protozoa population and cellulolytic organisms. *Cuban Journal of Agricultural Science.* 2001 Sep 1;35(3):223-8.

- Galo E, Emanuele SM, Sniffen CJ, White JH, Knapp JR. Effects of a polymer-coated urea product on nitrogen metabolism in lactating Holstein dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 2003 Jun 1;86(6):2154-62.
- Garrett WN, Meyer JH, Lofgreen GP. The comparative energy requirements of sheep and cattle for maintenance and gain. *Journal of Animal Science*. 1959 May 1;18(2):528-47.
- Garrett WN. Factors influencing energetic efficiency of beef production. *Journal of Animal Science*. 1980 Dec 1;51(6):1434-40.
- Geay Y. Energy and protein utilization in growing cattle. *Journal of Animal Science*. 1984 Mar 1;58(3):766-78.
- Goel G, Makkar HP, Becker K. Effects of *Sesbania sesban* and *Carduus pycnocephalus* leaves and Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) seeds and their extracts on partitioning of nutrients from roughage-and concentrate-based feeds to methane. *Animal Feed Science and Technology*. 2008 Nov 14;147(1-3):72-89.
- Grainger C, Clarke T, Auld MJ, Beauchemin KA, McGinn SM, Waghorn GC, Eckard RJ. Potential use of *Acacia mearnsii* condensed tannins to reduce methane emissions and nitrogen excretion from grazing dairy cows. *Canadian Journal of Animal Science*. 2009 Jun 1;89(2):241-51.
- Grainger C, Williams R, Clarke T, Wright AD, Eckard RJ. Supplementation with whole cottonseed causes long-term reduction of methane emissions from lactating dairy cows offered a forage and cereal grain diet. *Journal of Dairy Science*. 2010 Jun 1;93(6):2612-9.
- Haro JM, Haro IM. Nutrición proteica de bovinos productores de carne en pastoreo. *Acta Universitaria*. 2007;17(2):45-54.
- Hegarty RS, Gerdes R. Hydrogen production and transfer in the rumen. *Recent Advances in Animal Nutrition in Australia*. 1999;12:37-44.

Hegarty RS. Reducing rumen methane emissions through elimination of rumen protozoa. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1999;50(8):1321-8.

Henrique DS, Queiroz CD, Vieira RA, Botelho MF. Energetic efficiency of protein and body fat retention in crossbred *Bos indicus* and *Bos Taurus* x *Bos indicus* raised under tropical conditions. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2009 Aug;38(8):1581-6.

Herselman MJ, Sahlu T, Hart SP, Goetsch AL. Energy expenditure by dry and lactating Alpine does estimated by entry rate of carbon dioxide. *Journal of dairy science*. 1998 Sep 1;81(9):2469-74.

Hixson J, Durmic Z, Vadhanabhuti J, Vercoe P, Smith P, Wilkes E. Exploiting Compositionally Similar Grape Marc Samples to Achieve Gradients of Condensed Tannin and Fatty Acids for Modulating In Vitro Methanogenesis. *Molecules*. 2018 Jul;23(7):1793.

Hoover WH, Stokes SR. Balancing carbohydrates and proteins for optimum rumen microbial yield. *Journal of dairy science*. 1991 Oct 1;74(10):3630-44.

Huntington GB. Nutrient metabolism by gastrointestinal tissues of herbivores. *Nutritional ecology of herbivores* (HG Jung and GC Fahey, Jr., eds.). American Society of Animal Science, Savoy, Illinois. 1999:312-36.

INRA. Ruminant Nutrition. Libbey Eurotext, Montrouge, France. 1989.

IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Core Writing Team, Pachauri, R.K., Reisinger, A. (Eds.), IPCC, Geneva, Switzerland. 2007: 104 pp.

Ipharraguerre IR, Clark JH. Varying protein and starch in the diet of dairy cows. II. Effects on performance and nitrogen utilization for milk production. *Journal of Dairy Science*. 2005 Jul 1;88(7):2556-70.

Johnson KA, Johnson DE. Methane emissions from cattle. *Journal of animal science*. 1995 Aug 1;73(8):2483-92.

Johnson DE, Ward GM. Estimates of animal methane emissions. *Environmental monitoring and assessment*. 1996 Sep 1;42(1-2):133-41.

Jordan E, Lovett DK, Hawkins M, Callan JJ, O'Mara FP. The effect of varying levels of coconut oil on intake, digestibility and methane output from continental cross beef heifers. *Animal Science*. 2006 Dec;82(6):859-65.

Jouany JP. Effect of rumen protozoa on nitrogen utilization by ruminants. *The Journal of nutrition*. 1996 Apr 1;126(suppl_4):1335S-46S.

Kalscheur KF, Vi RB, Glenn BP, Kohn RA. Milk production of dairy cows fed differing concentrations of rumen-degraded protein. *Journal of dairy science*. 2006 Jan 1;89(1):249-59.

Kiehl JT, Trenberth KE. Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1997 Feb;78(2):197-208.

Kleiber M. *Bioenergética animal: el fuego de la vida*. Zaragoza: Acribia; 1972 pp, 428.

Kobayashi Y. Abatement of methane production from ruminants: trends in the manipulation of rumen fermentation. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2010 Feb 22;23(3):410-6.

Koch RM, Dikeman ME, Allen DM, May M, Crouse JD, Champion DR. Characterization of biological types of cattle III. Carcass composition, quality and palatability. *Journal of Animal Science*. 1976 Jul 1;43(1):48-62.

Kohn RA, Allen MS. In vitro protein degradation of feeds using concentrated enzymes extracted from rumen contents. *Animal Feed Science and Technology*. 1995 Mar 1;52(1-2):15-28.

Kopečný J, Wallace RJ. Cellular location and some properties of proteolytic enzymes of rumen bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 1982 May 1;43(5):1026-33.

Kozloski GV, Rocha JB, Ciocca MD. Visceral metabolism and efficiency of energy use by ruminants. *Ciência Rural*. 2001 Oct;31(5):903-8.

Kujawa MA. Energy partitioning in steers fed cottonseed hulls and beet pulp. Fort Collins (CO): Colorado State University. 1994.

Ku-Vera JC, Valencia-Salazar SS, Piñeiro-Vázquez AT, Molina-Botero IC, Arroyave-Jaramillo J, Montoya-Flores MD, Lazos-Balbuena FJ, Canul-Solís JR, Arceo-Castillo JI, Ramírez-Cancino L, Escobar-Restrepo CS. Determination of methane yield in cattle fed tropical grasses as measured in open-circuit respiration chambers. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018 Aug 15;258:3-7.

Lamba JS, Hundal JS, Wadhwa M, Bakshi MP. In-vitro methane production potential and in-sacco degradability of conventional and non-conventional protein supplements. *Indian Journal of Animal Sciences*. 2014 May 1;84(5):539-43.

Lana RP, Russell JB, Van Amburgh ME. The role of pH in regulating ruminal methane and ammonia production. *Journal of animal science*. 1998 Aug 1;76(8):2190-6.

Lara CE, García JM, López J. Influencia del pastoreo en la concentración de fenoles totales y taninos condensados en *Gliricidia sepium* en el trópico seco. *Livestock Research for Rural Development*. 2000;12:4.

Lawrence TL, Fowler VR, Novakofski JE. *Growth of farm animals*. Cabi; 2012.

Leifa F, Pandey A, Soccol CR. Solid state cultivation—an efficient method to use toxic agro-industrial residues. *Journal of Basic Microbiology: An International Journal on Biochemistry, Physiology, Genetics, Morphology, and Ecology of Microorganisms*. 2000 Jul;40(3):187-97.

Lighton JR, Halsey LG. Flow-through respirometry applied to chamber systems: pros and cons, hints and tips. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. 2011 Mar 1;158(3):265-75.

Lighton JR. *Measuring metabolic rates: a manual for scientists*. Oxford University Press; 2008 Dec 6.

Liu H, Vaddella V, Zhou D. Effects of chestnut tannins and coconut oil on growth performance, methane emission, ruminal fermentation, and microbial populations in sheep. *Journal of dairy science*. 2011 Dec 1;94(12):6069-77.

Lofgreen GP, Garrett WN. A system for expressing net energy requirements and feed values for growing and finishing beef cattle. *Journal of animal science*. 1968 May 1;27(3):793-806.

Machmüller A, Kreuzer MC. Methane suppression by coconut oil and associated effects on nutrient and energy balance in sheep. *Canadian Journal of Animal Science*. 1999 Mar 1;79(1):65-72.

Machmüller A, Soliva CR, Kreuzer M. Methane-suppressing effect of myristic acid in sheep as affected by dietary calcium and forage proportion. *British Journal of Nutrition*. 2003 Sep;90(3):529-40.

Mackie RI, Bryant MP. Acetogenesis and the rumen: syntrophic relationships. In *Acetogenesis 1994* (pp. 331-364). Springer, Boston, MA.

Marcondes MI, Tedeschi LO, Valadares Filho SD, Gionbelli MP, Chizzotti ML. Prediction of partial efficiency of use of metabolizable energy to net energy for gain and maintenance. *Energy and protein metabolism and nutrition*. 2010:543.

Martin C, Morgavi DP, Doreau M. Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. *Animal*. 2010 Mar;4(3):351-65.

Mathison GW, Okine EK, McAllister TA, Dong Y, Galbraith J, Dmytruk OI. Reducing methane emissions from ruminant animals. *Journal of Applied Animal Research*. 1998 Sep 1;14(1):1-28.

McAllister TA, Cheng KJ, Okine EK, Mathison GW. Dietary, environmental and microbiological aspects of methane production in ruminants. *Canadian Journal of Animal Science*. 1996 Jun 1;76(2):231-43.

McAllister TA, Newbold CJ. Redirecting rumen fermentation to reduce methanogenesis. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 2008 Jan 21;48(2):7-13.

McGinn SM, Beauchemin KA, Coates T, Colombatto D. Methane emissions from beef cattle: Effects of monensin, sunflower oil, enzymes, yeast, and fumaric acid. *Journal of animal science*. 2004 Nov 1;82(11):3346-56.

Meale SJ, Chaves AV, Baah J, McAllister TA. Methane production of different forages in in vitro ruminal fermentation. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2012 Jan;25(1):86.

Moate PJ, Williams SR, Deighton MH, Wales WJ, Jacobs JL. Effects of red and white grape marc on milk production and methane yield from dairy cows. In *Proceedings of the 5th Australasian dairy science symposium 2014a* Nov (pp. 19-21).

Moate PJ, Williams SR, Torok VA, Hannah MC, Ribaux BE, Tavendale MH, Eckard RJ, Jacobs JL, Auldish MJ, Wales WJ. Grape marc reduces methane emissions when fed to dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2014b Aug 1;97(8):5073-87.

Molina-Botero IC, Arroyave-Jaramillo J, Valencia-Salazar S, Barahona-Rosales R, Aguilar-Pérez CF, Burgos AA, Arango J, Ku-Vera JC. Effects of tannins and saponins contained in foliage of *Gliricidia sepium* and pods of *Enterolobium cyclocarpum* on fermentation, methane emissions and rumen microbial population in crossbred heifers. *Animal feed science and technology*. 2019 May 1;251:1-1.

Moreira GD, Lima PD, Borges BO, Primavesi O, Longo C, McManus C, Abdalla A, Louvandini H. Tropical tanniniferous legumes used as an option to mitigate sheep enteric methane emission. *Tropical animal health and production*. 2013 Mar 1;45(3):879-82.

Moss AR, Jouany JP, Newbold J. Methane production by ruminants: its contribution to global warming. In *Annales de zootechnie* 2000 May 1 (Vol. 49, No. 3, pp. 231-253). EDP Sciences.

Naumann HD, Muir JP, Lambert BD, Tedeschi LO, Kothmann MM. Condensed tannins in the ruminant environment: a perspective on biological activity. *J. Agric. Sci*. 2013 Jan;1:8-20.

Nocek JE, Russell JB. Protein and energy as an integrated system. Relationship of ruminal protein and carbohydrate availability to microbial synthesis and milk production. *Journal of Dairy Science*. 1988 Aug 1;71(8):2070-107.

Noriega Salazar A, Silva Acuña R, García de Salcedo M. Revisión: Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal. *Zootecnia Tropical*. 2008 Dec;26(4):411-9.

NRC (National Research Council). *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. 6th ed. National Academy Press, Washington, D.C. 1984.

NRC (National Research Council). *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. 7th ed. National Academy Press, Washington, D.C. 2000.

NRC (National Research Council). *Nutrient requirements of beef cattle*. 7th ed. Washington, D.C: National Academy Press. 1996.

NRC. (National Research Council. *Nutrient requirements of dairy cattle*). 7th ed. Washington, DC: National Academy Press. 2001.

Odongo NE, Bagg R, Vessie G, Dick P, Or-Rashid MM, Hook SE, Gray JT, Kebreab E, France J, McBride BW. Long-term effects of feeding monensin on methane production in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2007 Apr 1;90(4):1781-8.

Okine EK, Mathison GW, Hardin RT. Effects of changes in frequency of reticular contractions on fluid and particulate passage rates in cattle. *Journal of Animal Science*. 1989 Dec 1;67(12):3388-96.

Old CA, Rossow HA, Lean IJ, Famula TR. Energetic efficiency and the first law: the California net energy system revisited. *Journal of Animal Science*. 2018 Nov 21;96(11):4882-901.

Onwuka CF. Tannin and saponin contents of some tropical browse species fed to goats. *Tropical Agriculture*. 1992 Apr 1;69(2):176-80.

Ørskov ER, McDonald I. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *The Journal of Agricultural Science*. 1979 Apr;92(2):499-503.

Posada SL, Noguera RR, Rodríguez NM, Borges AL, Reis R. Exigências energéticas para gado de corte: conceitos e resultados experimentais em condições tropicais. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 2011;24(4):623-33.

Poungchompu O, Wanapat M, Wachirapakorn C, Wanapat S, Cherdthong A. Manipulation of ruminal fermentation and methane production by dietary saponins and tannins from mangosteen peel and soapberry fruit. *Archives of Animal Nutrition*. 2009 Oct 1;63(5):389-400.

Puchala R, Animut G, Patra AK, Detweiler GD, Wells JE, Varel VH, Sahlu T, Goetsch AL. Methane emissions by goats consuming *Sericea lespedeza* at different feeding frequencies. *Animal feed science and technology*. 2012 Jul 20;175(1-2):76-84.

Ramanathan V, Feng Y. Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric environment*. 2009 Jan 1;43(1):37-50.

Resende KT, Teixeira IA, Fernandes MH. *Metabolismo de energia. Nutrição de Ruminantes*. São Paulo: FUNEP. 2006.

Reynolds CK, Crompton LA, Mills JA. Improving the efficiency of energy utilisation in cattle. *Animal Production Science*. 2011 Jan 12;51(1):6-12.

Riebeek, H. Global Warming. <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GlobalWarming/>.2011.

Rira M, Morgavi DP, Archimède H, Marie-Magdeleine C, Popova M, Bousseboua H, Doreau M. Potential of tannin-rich plants for modulating ruminal microbes and ruminal fermentation in sheep. *Journal of Animal Science*. 2015 Jan 1;93(1):334-47.

Robelin J, Daenicke R. Variations of net requirements for cattle growth with liveweight, liveweight gain, breed and sex. 1980.

Romagnolo D, Polan CE, Barbeau WE. Electrophoretic analysis of ruminal degradability of corn proteins. *Journal of dairy science*. 1994 Apr 1;77(4):1093-9.

Rotta PP, Baião AC, Costa LF, Valadares Filho SC, Prados LF, Marcondes MI. Exigências de proteína para bovinos de corte. Em: Valadares Filho SC, Costa y Silva LF, Gionbelli MP, Rotta PP, Marcondes MI, Chizzotti ML, Prados LF. Exigências

nutricionais de zebuínos puros e cruzados: BR-Corte. 3 ed. Brasil: Editorial UFV. 2016; p. 191-220.

Rumpler WV, Johnson DE, Bates DB. The effect of high dietary cation concentration on methanogenesis by steers fed diets with and without ionophores. *Journal of Animal Science*. 1986 Jun 1;62(6):1737-41.

Russell JB, O'connor JD, Fox DG, Van Soest PJ, Sniffen CJ. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: I. Ruminal fermentation. *Journal of animal science*. 1992 Nov 1;70(11):3551-61.

Russell JB, Sniffen CJ, Van Soest PJ. Effect of carbohydrate limitation on degradation and utilization of casein by mixed rumen bacteria. *Journal of Dairy Science*. 1983 Apr 1;66(4):763-75.

Sainz RD, Barioni LG, Paulino PV, Valadares Filho SC, Oltjen JW. Growth patterns of Nellore vs. British beef cattle breeds assessed using a dynamic, mechanistic model of cattle growth and composition. *Kebreab E, Dijkstra J, Bannink A*. 2006:160-70.

Schwingel WR, Bates DB. Use of sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis to measure degradation of soluble soybean proteins by *Prevotella ruminicola* GA33 or mixed ruminal microbes in vitro. *Journal of animal science*. 1996 Feb 1;74(2):475-82.

Scientific C. Industrial Research Organization–CSIRO. Feeding Standards for Australian Livestock, Ruminants. CSIRO Publications, East Melbourne, Victoria, Australia. 266 p. 1990.

Scientific C. Industrial Research Organization–CSIRO. Nutrient requirements of domesticated ruminants. Collingwood, Australia: CSIRO Publishing. 2007.

Seal CJ, Reynolds CK. Nutritional implications of gastrointestinal and liver metabolism in ruminants. *Nutrition research reviews*. 1993 Jan;6(1):185-208.

Selvankumar T, Sudhakar C, Govindaraju M, Selvam K, Aroulmoji V, Sivakumar N, Govarthanan M. Process optimization of biogas energy production from cow dung with alkali pre-treated coffee pulp. *3 Biotech*. 2017 Aug 1;7(4):254.

Siddons RC, Nolan JV, Beever DE, MacRae JC. Nitrogen digestion and metabolism in sheep consuming diets containing contrasting forms and levels of N. *British Journal of Nutrition*. 1985 Jul;54(1):175-87.

Siddons RC, Paradine J. Effect of diet on protein degrading activity in the sheep rumen. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1981 Oct;32(10):973-81.

Soliva CR, Zeleke AB, Clement C, Hess HD, Fievez V, Kreuzer M. In vitro screening of various tropical foliage, seeds, fruits and medicinal plants for low methane and high ammonia generating potentials in the rumen. *Animal feed science and technology*. 2008 Nov 14;147(1-3):53-71.

Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar TD, Castel V, Rosales M, Rosales M, de Haan C. *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. Food & Agriculture Org.; 2006.

Stern MD, Hoover WH. Methods for determining and factors affecting rumen microbial protein synthesis: a review. *Journal of Animal Science*. 1979 Dec 1;49(6):1590-603.

Tamminga S. Nutrition management of dairy cows as a contribution to pollution control. *Journal of Dairy Science*. 1992 Jan 1;75(1):345-57.

Tavendale MH, Meagher LP, Pacheco D, Walker N, Attwood GT, Sivakumaran S. Methane production from in vitro rumen incubations with *Lotus pedunculatus* and *Medicago sativa*, and effects of extractable condensed tannin fractions on methanogenesis. *Animal Feed Science and Technology*. 2005 Sep 30;123:403-19.

Tedeschi LO, Boin C, Fox DG, Leme PR, Alleoni GF, Lanna DP. Energy requirement for maintenance and growth of Nelore bulls and steers fed high-forage diets. *Journal of Animal Science*. 2002 Jun 1;80(6):1671-82.

Terrill TH, Rowan AM, Douglas GB, Barry TN. Determination of extractable and bound condensed tannin concentrations in forage plants, protein concentrate meals and cereal grains. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1992;58(3):321-9.

Tolkamp BJ. Efficiency of energy utilisation and voluntary feed intake in ruminants. *Animal*. 2010 Jul;4(7):1084-92.

Tomkins NW, Hunter RA. Methane mitigation in beef cattle using a patented anti-methanogen. In 'Proceedings of the 2nd joint Australia and New Zealand forum on non-CO₂ greenhouse gas emission from agriculture, October 2003'. Lancemore Hill. (Eds RJ Eckard, W Slattery) p. F3. (Australian Greenhouse Office: Canberra).

Varón LE, Granados JE. Interrelación entre el contenido de metabolitos secundarios de las especies *Gliricidia sepium* y *Tithonia diversifolia* y algunas propiedades físicoquímicas del suelo. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*. 2012 Jan 16;3(1):53-62.

Van Soest PJ. Nutritional ecology of the ruminant. Cornell university press; 1994.

Vasta V, Jerónimo E, Brogna DM, Dentinho MT, Biondi L, Santos-Silva J, Priolo A, Bessa RJ. The effect of grape seed extract or *Cistus ladanifer* L. on muscle volatile compounds of lambs fed dehydrated lucerne supplemented with oil. *Food Chemistry*. 2010 Apr 15;119(4):1339-45.

Velle W, Sjaastad ØV, Aulie A, Grønset D, Feigenwinter K, Framstad T. Rumen escape and apparent degradation of amino acids after individual intraruminal administration to cows. *Journal of dairy science*. 1997 Dec 1;80(12):3325-32.

Waghorn GC, Woodward SL, Tavendale M, Clark DA. Inconsistencies in rumen methane production—effects of forage composition and animal genotype. In *International Congress Series 2006 Jul 1 (Vol. 1293, pp. 115-118)*. Elsevier.

Wallace RJ, Onodera R, Cotta MA. Metabolism of nitrogen-containing compounds. In *The rumen microbial ecosystem 1997 (pp. 283-328)*. Springer, Dordrecht.

Watson RT, Meira Filho LG, Sanhueza E, Janetos A. Greenhouse gases: sources and sinks. *Climate change*. 1992;92:25-46.

Wenk C., Colombani P.C., van Milgen J., Lemme A. . Glossary: Terminology in animal and human energy metabolism. En: A. Chwalibog, K. Jakobsen (Eds.) *Proc. 15th Symp.*

Energy Metabolism in Animals, Sneekkersten, Denmark. Wageningen Perss, Wageningen, the Netherlands. 2001, pp 409–421.

Widjaja T, Iswanto T, Altway A, Shovitri M, Juliastuti SR. Methane production from coffee pulp by microorganism of rumen fluid and cow dung in co-digestion. Chemical Engineering Transactions. 2017 Mar 20;56:1465-70.

Wilkerson VA, Klopfenstein TJ, Britton RA, Stock RA, Miller PS. Metabolizable protein and amino acid requirements of growing cattle. Journal of Animal Science. 1993 Oct 1;71(10):2777-84.

Williams CB, Jenkins TG. A dynamic model of metabolizable energy utilization in growing and mature cattle. III. Model evaluation. Journal of Animal Science. 2003. 81(6):1390-8.

Woodward SL. Condensed tannins in birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*) reduce methane emissions from dairy cows. In PROCEEDINGS-NEW ZEALAND SOCIETY OF ANIMAL PRODUCTION 2004 (Vol. 64, pp. 160-164). New Zealand Society of Animal Production; 1999.

Woodward SL, Waghorn GC, Lasseby KR, Laboyrie PG. Does feeding sulla (*Hedysarum coronarium*) reduce methane emissions from dairy cows?. In Proceedings-New Zealand society of animal production 2002 (Vol. 62, pp. 227-230). New Zealand Society of Animal Production; 1999.

Wright AD, Auckland CH, Lynn DH. Molecular diversity of methanogens in feedlot cattle from Ontario and Prince Edward Island, Canada. Appl. Environ. Microbiol.. 2007 Jul 1;73(13):4206-10.

Wright AD, Kennedy P, O'Neill CJ, Toovey AF, Popovski S, Rea SM, Pimm CL, Klein L. Reducing methane emissions in sheep by immunization against rumen methanogens. Vaccine. 2004 Sep 28;22(29-30):3976-85.

Yu F, Moughan PJ, Barry TN. The effect of cottonseed condensed tannins on the ileal digestibility of amino acids in casein and cottonseed kernel. *British Journal of nutrition*. 1996a May;75(5):683-98.

Yu F, Moughant PJ, Barry TN, McNabb WC. The effect of condensed tannins from heated and unheated cottonseed on the ileal digestibility of amino acids for the growing rat and pig. *British Journal of Nutrition*. 1996b Sep;76(3):359-71.

CAPÍTULO 2.

BALANCE ENERGÉTICO Y PROTEICO Y EMISIÓN DE METANO EN GANADO VACUNO MESTIZO CONSUMIENDO RECURSOS ARBÓREOS Y AGROINDUSTRIALES

Resumen

El metano (CH₄) liberado por los rumiantes es producto de la fermentación del alimento en el tracto digestivo y representa pérdidas de la energía bruta consumida (EBc). Es necesario implementar programas de suplementación que busquen reducir las emisiones de metano y mejoren el balance energético y nitrogenado del animal. El objetivo de este trabajo fue determinar el balance energético (BE) y nitrogenado (BN) y cuantificar las emisiones de CH₄ en ganado vacuno mestizo consumiendo recursos arbóreos y agroindustriales. Para tal efecto se emplearon diez animales Brangus, que se alimentaron con cinco dietas basadas en heno de pangola (*Digitaria decumbens*) (60%) y un suplemento (40%) basado en maíz-soya (control), matarratón, semilla de algodón, pulpa de café y orujo de uva. Los recursos arbóreos y agroindustriales representaron el 37,5% del suplemento. La evaluación se realizó en dos períodos experimentales, asignando dos animales por dieta en cada período. La producción de CH₄ no difirió entre las dietas cuando se expresó en L/kg de materia seca, materia orgánica y fibra detergente neutra ($p > 0,05$). El valor medio de producción de CH₄ fue 118,6 L/animal/d y representó el 4,2 y 5,9% de la energía bruta (EB) y digestible (ED), respectivamente. En el BE, sólo se registraron diferencias en la EBc; el menor valor se observó en el tratamiento con pulpa de café, respecto la dieta control y con orujo de uva. La ED, la energía metabolizable (EM) y la energía retenida (ER) promediaron el 71,4, 65,9 y 33,3% de la EB, correspondientemente. La pérdida de N en la orina fue menor ($p < 0,05$) en la dieta incluyendo semilla de algodón respecto el control. El 55,8% del N consumido fue retenido. La incorporación de los recursos evaluados fue comparable con la dieta control, lo que supone que una inclusión del 15% de la dieta no altera el BE, el BN, ni la emisión de CH₄.

Palabras claves: balance de nutrientes, ganado mestizo, metano, suplementación.

Introducción

El metano (CH₄) es considerado un gas de efecto invernadero (GEI). Entre las fuentes de producción de CH₄ antropogénico, el sector agropecuario aporta el 14,5% de las emisiones totales mundiales, donde el 39% de este es generado por la ganadería (Gerber et al., 2013). El CH₄ liberado por los rumiantes es producto de la fermentación del alimento en el tracto digestivo y puede representar pérdidas desde el 2% hasta 12% de la energía bruta consumida (EBc) (Johnson y Johnson, 1995). Los forrajes tropicales son usualmente deficientes en nutrientes críticos como la proteína y la energía, pero presentan altos contenidos de carbohidratos estructurales (Minson, 1990), condiciones bajo las cuales las pérdidas energéticas por producción de CH₄ pueden representar entre el 10 y 11% de la EBc (McCrabb y Hunter, 1999). La búsqueda de estrategias alimenticias con capacidad de disminuir la producción de CH₄ entérico es de vital importancia para mitigar las emisiones de GEI y mejorar los rendimientos productivos.

Es bien conocido que, pese a la gran oferta de recursos alimenticios, la ganadería de los trópicos enfrenta problemas relacionados con la cantidad y calidad del forraje disponible, especialmente durante las épocas de sequía. Adicionalmente, su estructura ofrece una pobre densidad de hojas verdes, lo que afecta la eficiencia de cosecha por parte del animal, ocasionando un déficit de proteína y energía digestible (Macedo et al., 2008). En este contexto, es necesario implementar programas de suplementación que cubran los requerimientos nutricionales del animal y mejoren su balance energético y nitrogenado, no obstante, a partir de materias primas asequibles y económicas, que no compitan con la alimentación humana y de especies monogástricas. La utilización del follaje de los árboles resulta una buena alternativa dado sus altos niveles de proteína y aceptable valor nutritivo. De otra parte, la agroindustria del café (*Coffea arabica*), uva (*Vitis vinífera*) y algodón (*Gossypium sp.*) genera una gran cantidad de desechos, entre

ellos pulpa de café, semilla de algodón y orujo de uva, respectivamente, que al participar de un programa de suplementación animal aportan fibra, grasa, azúcares, energía y proteína (Noriega et al., 2008; Rondeau et al., 2013; Grainger et al., 2010) y reducen la contaminación ambiental cuando su disposición final no es la adecuada.

El valor de una fuente proteica suplementaria en las dietas de rumiantes radica en su aporte de nitrógeno degradable a nivel ruminal para la síntesis de proteína microbiana (PMo) y en su aporte de aminoácidos (AA) disponibles en el intestino. La suplementación energética modifica la cantidad y proporción molar de los ácidos grasos volátiles (AGV), aumenta el crecimiento microbiano y la disponibilidad de sustratos glucogénicos, influenciando el metabolismo energético del animal (Pulido et al., 2009).

La suplementación estratégica enfocada a mejorar el balance energético y nitrogenado y a reducir las emisiones de CH₄ puede realizarse con recursos tropicales que aporten metabolitos secundarios (Hess et al., 2003). En el matarratón (*Gliricidia sepium*), la pulpa de café (*Coffea arabica*) y el orujo de uva (*Vitis vinifera*) se ha reportado la presencia de taninos. El contenido de taninos puede variar entre 0,84-5,2% para el orujo de uva (Alipour y Rouzbehan, 2007; Baumgärtel et al., 2007; Vasta et al., 2010), 1,8-8,6% para la pulpa de café (Leifa et al., 2000; Bressani, 1987; Noriega et al., 2008), y 0,04-4,3% para el matarratón (Lara et al., 2000; Varón y Granados, 2012; Onwuka, 1992) (valores expresados en la materia seca (MS) total). El suministro moderado de taninos condensados es una alternativa de mitigación que, según reportes *in vitro* e *in vivo*, disminuye la producción de CH₄ (Cieslak et al., 2012; Ortiz et al., 2016). La semilla de algodón, debido a su contenido de grasa, también ha demostrado reducir la emisión de este gas (Grainger et al., 2010; Beck et al., 2018). El objetivo de este trabajo fue determinar el balance energético y nitrogenado y cuantificar las emisiones de CH₄ en ganado vacuno mestizo consumiendo recursos arbóreos y agroindustriales.

Materiales y métodos

Comité de ética

Este proyecto fue aprobado por el Comité de Ética para la Experimentación con Animales de la Universidad de Antioquia (acta 76 de mayo 10 de 2012), cumpliendo con lo dispuesto en la Ley 84 de 1989, "Estatuto Nacional de Protección de los Animales", y en la Resolución 008430 de 1993, "Normas científicas y administrativas para la investigación en salud", expedidas por el Ministerio de Salud de la República de Colombia.

Localización

El experimento se realizó en el Laboratorio de Calorimetría Animal, ubicado en la hacienda "La Montaña", propiedad de la Universidad de Antioquia. La hacienda se encuentra ubicada en el municipio de San Pedro de los Milagros (Antioquia-Colombia), a una altitud de 2475 msnm y presenta 16°C, 72% humedad relativa y 1575 mm de precipitación promedio anual, ubicándose en una zona de vida bosque húmedo montano bajo (bh-MB), de acuerdo con la clasificación de Holdridge (1967).

Animales e instalaciones

Se utilizaron diez (10) animales mestizos (Brahman x Angus), castrados, con un promedio de peso vivo (PV) y edad de $198,3 \pm 14,7$ kg y $335,3 \pm 41,8$ días, respectivamente. Antes del inicio del experimento, los animales fueron tratados para ecto y endoparásitos y adaptados al manejo, a la cámara respirométrica y al régimen de alimentación durante 75 días, actividades que contribuyeron con el proceso de mansedumbre. Al término de ese período, el consumo de cada animal dentro y fuera de las cámaras fue estadísticamente equivalente, lo que confirmó su adaptación a las mismas.

Los animales se confinaron en un galpón abierto, con ventilación e iluminación natural, en corrales individuales (2,5 m²) provistos con comedero y bebedero. Las instalaciones contaron con techos para proteger los animales de la radiación solar directa y el estrés térmico. El piso de concreto se cubrió con tapetes de caucho para brindar mayor confort y evitar lesiones en las patas.

Para la cuantificación de la producción de CH₄ y de calor, los animales ingresaron a dos cámaras de respiración de circuito abierto, cada una de 24,6 m³ (2,7 m de ancho, 3,8 m de largo y 2,4 m de altura), construidas en acero inoxidable y dotadas con ventanas laterales de vidrio (1,40*1,30 m), que permitieron el contacto visual entre animales, disminuyendo su estrés, y la observación de los mismos por parte del personal científico. Al interior de cada cámara se dispuso brete, comedero, bebedero automático, ventilador para garantizar el mezclado de los gases, aire acondicionado y deshumificador para garantizar condiciones de termoneutralidad y bienestar.

Diseño y tratamientos experimentales

Se realizó un diseño experimental en cross-over, evaluando cinco (5) tratamientos (dietas) en dos (2) periodos experimentales, donde cada tratamiento fue suministrado aleatoriamente a dos (2) animales por periodo, para un total de cuatro (4) animales por tratamiento. Cada periodo tuvo una duración de 25 días, donde los primeros 15 días fueron de adaptación a las dietas y los últimos 10 días de medición, incluyendo balance de nutrientes y calorimetría.

Los cinco (5) tratamientos, cuya descripción se presenta en la Tabla 1, estuvieron constituidos por 60% de heno de Pangola (*Digitaria decumbens*) y 40% de suplemento, aproximadamente, que varió en función del recurso arbóreo o agroindustrial incorporado en su formulación. Los recursos arbóreos y agroindustriales constituyeron el 15% de la dieta y el 37,5% del suplemento. El tratamiento control (C) consistió de un suplemento a base de maíz y soya, sin participación de recursos arbóreos o agroindustriales. Los tratamientos VV, CA, G y GS incluyeron orujo de uva (*Vitis*

vinífera), pulpa de café (*Coffea arabica*), semilla de algodón (*Gossypium sp.*) y matarratón (*Gliricidia sepium*), respectivamente.

Tabla 1. Materias primas y composición química de los tratamientos experimentales

Ingredientes (%)	Tratamientos ¹					
	C	VV	CA	G	GS	
Heno Pangola	60	60	60	60	60	
Maíz	20,9	10	10	14,7	10	
Torta de soya	8,5	4,3	4,3	4,2	4,3	
Urea	1,2	1,6	1,5	0,6	1,5	
Melaza	3	3	3	3	3	
RA-AI ²	0	15	15	15	15	
Sal Mineral	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
Aceite de Palma	3,8	3,6	3,7	0	3,7	
Composición química del heno y del suplemento ³						
	Heno					
	<i>D. decumbens</i>					
MS, %	87,6	87,7	87,3	88,1	88,7	89,1
PB, %	3,2	25,3	24,6	25,3	22,0	25,1
EB, Mcal/kg	4,1	4,6	4,6	4,5	4,5	4,5
FDN, %	79,2	5,9	26,6	19,9	18,6	24,9
MI, %	6,6	10,1	11,3	11,8	10,6	12,0
MO, %	93,4	89,9	88,7	88,2	89,4	88,0
TC%	-	-	0,070	0,072	-	0,080

¹ C, control; VV, orujo de uva (*Vitis vinífera*); CA, pulpa de café (*Coffea arabica*); G, semilla de algodón (*Gossypium sp.*); GS, matarratón (*Gliricidia sepium*).

²RA-AI, recurso arbóreo y agroindustrial

³Composición expresada en el 100% de la materia seca (MS): PB, proteína bruta; EB, energía bruta; FDN, fibra detergente neutra; MI, materia inorgánica; MO, materia orgánica; TC, taninos condensados (% catequinas)

El suplemento se suministró a los animales dos (2) veces al día (0800 y 1600 h) y el heno se ofertó *ad libitum*, garantizando aproximadamente un 15% de rechazo. Los suplementos fueron ofrecidos en recipientes y no en el comedero para garantizar su consumo. Diariamente se ajustó la cantidad de suplemento garantizada respecto el consumo de heno, con el fin de garantizar una proporción forraje/concentrado próxima a 60/40.

Balance de nutrientes y calorimetría.

Prueba de digestibilidad. La prueba de digestibilidad aparente se realizó una vez finalizado el período de adaptación al tratamiento experimental y tuvo una duración de cinco (5) días.

El consumo de materia seca de heno (CMS_h) y de suplemento (CMS_s) se obtuvo por diferencia entre la oferta y el rechazo. Muestras del alimento ofertado y rechazado por cada animal fueron diariamente colectadas y almacenadas a -10°C, obteniendo al final una muestra compuesta para su posterior caracterización nutricional.

El consumo de materia seca (CMS) y de nutrientes se expresó en kg/animal/día y g/kg de peso metabólico (PV^{0.75}); adicionalmente, el CMS se expresó como porcentaje del PV.

La producción de materia seca fecal se determinó por el procedimiento de colecta total de heces. Diariamente, a mañana y tarde, se tomaron muestras de aproximadamente 200 g de heces, que fueron colectadas directamente del ano y almacenadas a -10°C. Al término de los cinco días se obtuvo una muestra compuesta por animal para su posterior análisis químico.

La digestibilidad aparente (DA) de la MS y de los nutrientes se obtuvo a través de la ecuación $DA(\%) = [(Nutriente\ consumido, g - Nutriente\ en\ las\ heces, g) / Nutriente\ consumido, g] * 100$.

Colección de orina y determinación del volumen urinario. Durante cinco (5) días consecutivos se realizó colecta total de orina mediante el auxilio de arneses y contenedores plásticos conteniendo 10 ml de ácido sulfúrico (10% H₂SO₄) para prevenir pérdidas de nitrógeno (N) en forma de amonio. Diariamente se registró el volumen urinario y se tomó una muestra, que se conservó a -10°C. Al término de los cinco días se obtuvo una muestra compuesta por animal, que se analizó químicamente.

Cuantificación de la producción de metano y de calor. Finalizadas las pruebas de digestibilidad aparente y la determinación del volumen urinario, los animales ingresaron a las cámaras respirométricas para determinar el intercambio gaseoso; esto es, el consumo de oxígeno (O₂), y la producción de CH₄ y dióxido de carbono (CO₂). En las cámaras, cada animal permaneció dos días continuos, cada día por un periodo aproximado de 22 horas. La información obtenida fue extrapolada a un período de 24 horas usando el software ExpeData® (Sable Systems International, Las Vegas, USA). Al interior de la cámara se garantizó una temperatura de 21°C y una humedad relativa de 55%, a través del empleo de aire acondicionado y deshumificador.

El aire de las cámaras fue succionado con la ayuda de dos medidores de flujo de masas (Flowkit 2000; Sable Systems, Las Vegas, USA) a una tasa de 500 L/min. La concentración de CO₂, CH₄ y O₂ se registró cada segundo en muestras de aire obtenidas del ambiente y de la cámara respirométrica. Los analizadores de CO₂ (CA-10A), CH₄ (MA-10) y O₂ (FC-10) (Sable Systems International, Las Vegas, USA) se calibraron antes de cada periodo de mediciones inyectando una concentración conocida de CO₂ (0,48%) y CH₄ (0,098%); el analizador de O₂ se calibró utilizando la concentración ambiental (20,946% STP). Todos los datos fueron corregidos para temperatura y presión estándar (STP). La concentración de los gases libre de humedad fue calculada restando la presión de vapor de agua (PVA), la cual se cuantificó a través de un analizador (RH-300 Sable Systems International, Las Vegas, USA).

La producción de calor (PC) se estimó utilizando la ecuación de Brouwer (1965): $PC \text{ (Kcal)} = 3,866 O_2 + 1,200 CO_2 - 0,518 CH_4 - 1,431 N$, donde los gases se expresaron en litros (L) y el N en gramos (g).

La producción diaria de CH₄ se expresó en L y en L/kg MS y de nutrientes (proteína, materia orgánica, fibra detergente neutra, energía) consumidos y digestibles. La producción de CH₄/kg de MS registrada en la cámara respirométrica se extrapoló a los datos de consumo y digestibilidad obtenidos en la prueba de balance de nutrientes.

Balance de nitrógeno. El balance de nitrógeno (BN), expresado en g/animal/día, se obtuvo por la diferencia entre el consumo del elemento (NC) y su excreción a través de las heces (NH) y la orina (NO), permitiendo conocer: el nitrógeno digestible (ND) = NC-NH y el nitrógeno retenido (NR) = NC-NH-NO.

Balance energético. El consumo de energía bruta (CEB) de cada animal se determinó por la diferencia entre la cantidad de energía bruta (EB) ofrecida y rechazada. El consumo de energía digestible (CED) se obtuvo por la diferencia entre el CEB y las pérdidas de energía a través de las heces. El consumo de energía metabolizable (CEM) se determinó por la diferencia entre el CED y las pérdidas energéticas a través de la orina y el CH₄ cuantificado por calorimetría. La pérdida energética a través del CH₄ se estableció en 9,45 kcal/L (Nkrumah et al., 2006). El consumo de energía neta (CEN), correspondiente a la energía retenida (ER), se obtuvo por la diferencia entre el CEM y la PC de los animales. La producción de CH₄ y de calor se expresó por kg de MS consumido en la cámara, extrapolando los valores obtenidos al valor medio de CMS obtenido en la prueba de digestibilidad. Los resultados de balance energético se expresaron en Mcal/día.

Valor energético de las raciones. La densidad energética del alimento en términos de EB, energía digestible (ED), energía metabolizable (EM) y energía neta (EN), expresada en Mcal/Kg de MS, se obtuvo de dividir el CEB, CED, CEM y el CEN entre el CMS *ad libitum*, respectivamente.

Eficiencia de utilización de la energía. La eficiencia de la utilización de la energía se determinó a partir de las relaciones ED/EB (digestibilidad), EM/EB (metabolicidad), EM/ED, ER/EB y ER/EM (Jiao et al., 2013).

Análisis de laboratorio

Muestras del alimento ofertado, las sobras, las heces y la orina se pre-secaron en estufa de ventilación forzada (60°C/72 h). Las muestras secas se procesaron en un

molino estacionario Thomas–Wiley con tamiz de 1 mm (Arthur M. Thomas, Philadelphia, PA, USA) para su posterior análisis de MS, proteína bruta (PB), cenizas (MI) (AOAC, 2005; AOAC, 2007), fibra detergente neutra (FDN) (Van Soest et al., 1991) y EB (ISO, 1998). La materia orgánica (MO) se obtuvo de la diferencia MS-MI. En la orina solamente se analizó MS, PB, EB. El análisis de taninos condensados (TC) se realizó según la metodología propuesta por Chavan et al. (2001).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron a través de un modelo mixto, donde el tratamiento y el período representaron los efectos fijos, y el animal, anidado en el tratamiento, representó el efecto aleatorio. El peso inicial de los animales se empleó como covariable. Las medias se compararon a través de la prueba de Tukey empleando un nivel de significancia del 5%. Los datos se analizaron a través del programa estadístico SAS (2019).

Resultados

Consumo y digestibilidad aparente

En la tabla 2 se presenta el CMS y de nutrientes. El consumo de materia seca total (MSt), al igual que el consumo de PB, MO y FDN, expresado en kg/día o en g/kg PV^{0.75}, presentó diferencia entre los tratamientos CA y VV, siendo inferior para CA. El tratamiento G registró mayor CMSs respecto al tratamiento CA ($p < 0,05$). El tratamiento C y G fueron los de menor consumo de FDN como porcentaje del consumo total ($p < 0,05$).

Tabla 2. Efecto de la inclusión de recursos arbóreos y agroindustriales sobre el consumo de materia seca en vacunos mestizos.

Variable	Tratamientos ¹					
	C	VV	CA	G	GS	EE
Peso vivo (kg)	200,5	187,40	188,75	208,75	193,25	4,29
<i>Consumo diario e individual de materia seca y de nutrientes²</i>						
MSt (kg)	6,73 _{ab}	6,85 _a	5,81 _b	6,44 _{ab}	6,31 _{ab}	0,21
MSt (% PV)	3,45 _{ab}	3,52 _a	2,96 _b	3,27 _{ab}	3,23 _{ab}	0,08
MSt (g/kg PV ^{0,75})	128,73 _{ab}	131,41 _a	110,62 _b	122,37 _{ab}	120,57 _{ab}	2,96
MSh (kg)	4,41	4,42	3,73	3,97	4,06	0,15
MSs (kg)	2,32 _{ab}	2,44 _{ab}	2,08 _b	2,47 _a	2,24 _{ab}	0,07
PB (kg)	0,74 _{ab}	0,75 _a	0,65 _b	0,67 _{ab}	0,69 _{ab}	0,02
PB (g/kg PV ^{0,75})	14,09 _{ab}	14,40 _a	12,34 _b	12,85 _{ab}	13,23 _{ab}	0,29
PB (% MSt)	10,94	11,00	11,17	10,56	10,96	0,13
MO (kg)	6,18 _{ab}	6,27 _a	5,32 _b	5,90 _{ab}	5,77 _{ab}	0,19
MO (g/kg PV ^{0,75})	118,35 _{ab}	120,28 _a	101,38 _b	112,25 _{ab}	110,27 _{ab}	2,74
MO (% MSt)	91,93	91,47	91,65	91,79	91,45	0,16
FDN (kg)	3,54 _{ab}	4,12 _a	3,35 _b	3,58 _{ab}	3,77 _{ab}	0,12
FDN (g/kg PV ^{0,75})	68,90 _{ab}	79,12 _a	63,80 _b	68,00 _{ab}	72,02 _{ab}	1,90
FDN (% MSt)	53,47 _b	60,30 _a	57,79 _a	55,46 _b	59,82 _a	0,78

¹C, control; VV, orujo de uva (*Vitis vinífera*); CA, pulpa de café (*Coffea arabica*); G, semilla de algodón (*Gossypium sp.*); GS, matarratón (*Gliricidia sepium*).

²MSt, materia seca total; MSh, materia seca de heno; MSs, materia seca de suplemento; PB, proteína bruta; MO, materia orgánica; FDN, fibra detergente neutra.

EE, error estándar

a, b Letras diferentes en la misma fila indican diferencia estadística entre las medias de tratamiento (p<0,05)

En la tabla 3 se muestra que la producción fecal y la DA de la MS y los nutrientes PB, MO y FDN no presentó diferencia entre tratamientos (p>0,05).

Tabla 3. Efecto de la inclusión de recursos arbóreos y agroindustriales sobre la digestibilidad aparente en vacunos mestizos

Variable	Tratamientos ¹					
	C	VV	CA	G	GS	EE
MS fecal (kg/animal/d)	1,83	2,17	1,73	2,09	1,80	0,09
MS fecal (g/kg PV ^{0,75} /d)	34,92	41,97	33,03	39,56	34,39	1,69
Digestibilidad aparente (%) ²						
MS	72,58	68,17	70,10	67,80	71,48	1,16
PB	76,27	72,65	74,71	71,86	76,82	0,98
MO	74,64	70,03	72,07	69,71	73,49	1,14
FDN	71,98	67,44	69,83	66,79	72,38	1,38

¹C, control; VV, orujo de uva (*Vitis vinífera*); CA, pulpa de café (*Coffea arabica*); G, semilla de algodón (*Gossypium sp.*); GS, matarratón (*Gliricidia sepium*).

²MS, materia seca; PB, proteína bruta; MO, materia orgánica; FDN, fibra detergente neutra
EE, error estándar.

Balance de nitrógeno

El tratamiento que incluyó CA presentó mayor excreción urinaria, respecto los tratamientos VV, G y GS ($p < 0,05$). Entre tratamientos no se presentó diferencia estadística en el NR ($p > 0,05$), si bien el NC fue mayor para VV respecto CA y la pérdida de N a través de la orina fue menor para G, respecto los demás tratamientos ($p < 0,05$) (Tabla 4).

Producción de metano entérico

La emisión de CH₄ entérico sólo registró diferencia entre tratamientos ($p < 0,05$) cuando se expresó en L/día y por unidad de proteína digestible (Tabla 5). En el primer caso, el tratamiento VV superó al tratamiento CA. En relación con la proteína digestible, el tratamiento C resultó en menor producción de CH₄ respecto el tratamiento G.

Tabla 4. Efecto de la inclusión de recursos arbóreos y agroindustriales sobre el balance de nitrógeno en vacunos mestizos

Variable	Tratamientos ¹					
	C	VV	CA	G	GS	EE
Orina (kg/animal/d)	2,76 _a	2,31 _b	3,28 _a	1,95 _b	2,33 _b	0,15
Orina (g/kg PV ^{0,75} /d)	52,74 _{ab}	44,04 _b	63,57 _a	37,85 _b	44,81 _b	3,10
Balance de nitrógeno (g/animal/día) ²						
NC	118,01 _{ab}	120,05 _a	103,55 _b	107,91 _{ab}	110,44 _{ab}	3,11
NH	27,66	32,74	25,98	30,64	25,56	1,24
ND	90,35	87,31	77,57	77,27	84,88	2,76
NO	27,25 _a	20,09 _a	22,49 _a	10,66 _b	23,36 _a	1,69
NR	63,10	67,22	55,08	66,61	61,53	2,78
NR/NC (%)	53,47	55,60	52,84	61,58	55,46	1,50

¹C, control; VV, orujo de uva (*Vitis vinífera*); CA, pulpa de café (*Coffea arabica*); G, semilla de algodón (*Gossypium sp.*); GS, matarratón (*Gliricidia sepium*).

²NC, nitrógeno consumido; NH, nitrógeno en heces; ND, nitrógeno digestible; NO, nitrógeno en orina; NR, nitrógeno retenido.

EE, error estándar.

a, b Letras diferentes en la misma fila indican diferencia estadística entre las medias de tratamiento ($p < 0,05$).

Balance y eficiencia de utilización de la energía

En la tabla 6 se observa que el consumo de EB fue inferior para el tratamiento CA, respecto los tratamientos C y VV. Igualmente, que el tratamiento CA fue el que registró mayor pérdida de energía a través de la orina, cuando se le compara con el tratamiento G, pero menor pérdida de energía a través del CH₄, cuando se le compara con el tratamiento VV ($p < 0,05$). No se presentó diferencia estadística ($p > 0,05$) en la eficiencia de utilización de la energía, ni en la densidad energética (Mcal/kg MS) de los alimentos, excepto cuando se expresó en términos de EB, siendo mayor para VV respecto CA ($p < 0,05$) (Tabla 6).

Tabla 5. Efecto de la inclusión de recursos arbóreos y agroindustriales sobre la emisión de metano (CH₄) entérico.

Producción de CH ₄ /animal/día ²	Tratamientos ¹					
	C	VV	CA	G	GS	EE
L	114,56 _{ab}	126,72 _a	107,22 _b	123,09 _{ab}	121,52 _{ab}	3,52
L/kg MSc	17,03	18,52	18,49	19,46	19,30	0,46
L/kg MSd	23,89	27,43	26,35	28,76	26,96	0,84
L/kg PRc	155,94	168,71	165,45	183,84	176,68	4,40
L/kg PRd	207,13 _b	233,25 _{ab}	221,35 _{ab}	255,97 _a	229,87 _{ab}	7,13
L/kg MOc	18,54	20,25	20,18	21,18	21,09	0,50
L/kg MOd	25,27	29,13	27,98	30,41	28,65	0,86
L/kg FDNc	31,93	30,64	31,97	35,15	32,28	0,96
L/kg FDNd	45,13	46,02	45,75	52,95	44,51	1,92
L/Mcal EBc	4,01	4,36	4,40	4,61	4,58	0,11
L/Mcal ED	5,50	6,29	6,16	6,71	6,26	0,20

¹C, control; VV, orujo de uva (*Vitis vinífera*); CA, pulpa de café (*Coffea arabica*); G, semilla de algodón (*Gossypium sp.*); GS, matarratón (*Gliricidia sepium*).

²MSc, materia seca consumida; MSd, materia seca digestible; PRc, proteína consumida; PRd, proteína digestible; MOc, materia orgánica consumida; MOd, materia orgánica digestible; FDNc, fibra detergente neutra consumida; FDNd, fibra detergente neutra digestible; EBc, energía bruta consumida; ED, energía digestible.

EE, error estándar.

a, b Letras diferentes en la misma fila indican diferencia estadística entre las medias de tratamiento (p<0,05)

Tabla 6. Partición de la energía en vacunos mestizos consumiendo recursos arbóreos y agroindustriales

Variable	Tratamientos ¹					
	C	VV	CA	G	GS	EE
<i>Balance energético (Mcal/día)²</i>						
EB	28,53 _a	29,11 _a	24,45 _b	27,21 _{ab}	26,66 _{ab}	0,91
Energía fecal	7,41	8,67	6,93	8,51	7,17	0,36
ED	21,13	20,44	17,50	18,75	19,47	0,77
Energía en orina	0,40 _a	0,39 _{ab}	0,43 _a	0,27 _b	0,37 _{ab}	0,02
%EB	1,40 _{ab}	1,38 _{ab}	1,76 _a	0,98 _b	1,39 _{ab}	0,08
%ED	1,91 _{ab}	1,98 _{ab}	2,47 _a	1,45 _b	1,89 _{ab}	0,12
Energía en CH ₄	1,08 _{ab}	1,20 _a	1,01 _b	1,16 _{ab}	1,15 _{ab}	0,03
%EB (Ym%) ³	3,79	4,12	4,16	4,36	4,32	0,11
%ED	5,20	5,94	5,82	6,35	5,92	0,19
EM	19,65	18,85	16,06	17,32	17,95	0,75
Producción de calor	9,04	8,62	8,70	9,21	8,46	0,45
ER	10,61	10,23	7,36	8,11	9,49	0,68
<i>Eficiencia de utilización de la energía (%)</i>						
ED/EB ⁴	73,96	69,98	71,31	68,92	72,99	1,12
EM/EB ⁵	68,77	64,47	65,39	63,57	67,28	1,14
EM/ED	92,88	92,09	91,71	92,20	92,19	0,22
ER/EB	37,42	35,16	29,97	28,28	35,64	1,96
ER/EM	53,73	54,47	45,83	44,34	53,01	2,45
<i>Densidad energética de las raciones (Mcal/kg MS)</i>						
EB	4,24 _{ab}	4,25 _a	4,21 _b	4,22 _{ab}	4,23 _{ab}	0,01
ED	3,13	2,98	3,00	2,91	3,09	0,05
EM	2,92	2,74	2,75	2,69	2,84	0,05
ER	1,58	1,50	1,26	1,20	1,51	0,08

¹C, control; VV, orujo de uva (*Vitis vinífera*); CA, pulpa de café (*Coffea arabica*); G, semilla de algodón (*Gossypium sp.*); GS, matarratón (*Gliricidia sepium*).

²EB, energía bruta; ED, energía digestible; EM, energía metabolizable; ER, energía retenida.

³Ym: Factor de partición.

⁴Digestibilidad de la energía

⁵Metabolicidad de la energía

EE, error estándar.

a, b Letras diferentes en la misma fila indican diferencia estadística entre las medias de tratamiento (p<0,05).

Discusión

Composición química de las dietas experimentales

De la composición química de los tratamientos, se destaca la variabilidad en el contenido de FDN. Igualmente se observa menor contenido de PB en el tratamiento que incluyó G (Tabla 1).

La composición química real de los ingredientes fue utilizada como insumo para la formulación de las dietas. El porcentaje de PB fue superior en la semilla de algodón (25,8%) respecto la pulpa de café, el orujo de uva y el matarratón, 18,3, 10,9 y 17,4%, respectivamente, lo que conllevó a una menor participación porcentual de la urea en la fórmula para asegurar un similar porcentaje de PB entre tratamientos. No obstante, esa característica no se observó cuando se realizó el análisis a los suplementos, dando como resultado la composición química que se reporta en la Tabla 1. La semilla de algodón también registró un mayor porcentaje de EE respecto los restantes recursos evaluados, lo que explica la ausencia de aceite de palma en ese tratamiento.

Los valores de FDN de los ingredientes utilizados son variables y por ende la discrepancia entre tratamientos. En orden creciente, se obtuvieron valores de FDN 39,8, 45,5, 58,7 y 63,4% para la semilla de algodón, pulpa de café, matarratón y orujo de uva, respectivamente. Ese mismo orden, se observa en el contenido de fibra de los tratamientos incluyendo los ingredientes en mención.

Consumo y digestibilidad aparente

Si bien la ración fue formulada para aportar 60% de heno y 40% de suplemento, la relación real promedio para todos los tratamientos fue 64,05/35,95, lo que explica el menor consumo de proteína (10,93%) y mayor consumo de FDN (57,37%) respecto el CMSt. Igualmente, la participación de los recursos arbóreos y agroindustriales, inicialmente fijada en 15%, descendió a 13,48%. El consumo de FDN como porcentaje

del CMS total (% CMS total) (Tabla 2) fue consistente con el contenido de ese nutriente en los suplementos (Tabla 1). Si bien, la FDN es uno de los factores que limita el consumo de MS en las dietas de rumiantes, su efecto no fue determinante en el presente experimento. Esto se puede evidenciar porque el tratamiento VV, que fue el que presentó mayor contenido de FDN, registró un CMS estadísticamente equivalente al tratamiento C, que presentó menor concentración fibrosa (Tabla 2). Igualmente, porque el CMS del tratamiento VV superó al del tratamiento CA (Tabla 2), con el primer tratamiento presentando un mayor contenido de FDN (Tabla 1). Lo anterior, permite concluir que otro factor, diferente a la fibra, es el responsable del menor CMS en el tratamiento CA. Diversos autores han relacionado la inclusión de pulpa de café con una disminución en el CMS por causa de su baja palatabilidad (Vilela, 1999; Baião, 2002; Noriega et al., 2008). Los granos de café contienen antioxidantes, dentro de los cuales se destacan los polifenoles, alcaloides, ácidos fenólicos y cafeicos, cuya cantidad está determinada, entre otros factores, por la especie y el lugar de origen (Serna-Jiménez et al., 2018). El menor CMS del tratamiento CA determinó el menor consumo de MO, PB y FDN en comparación con la dieta incluyendo VV.

La FDN afecta la DA de los nutrientes (NRC, 2001), no obstante, a pesar de la variación registrada en su concentración, tanto en los suplementos (Tabla 1) como en la dieta (Tabla 2), no se encontraron diferencias en la DA de los nutrientes (Tabla 3). Esto puede obedecer a que los niveles de FDN consumidos (%CMSt) no fueron lo suficientemente contrastantes para lograr generar diferencias. De otra parte, la DA de los nutrientes depende de la degradabilidad de la FDN en el rumen, y ésta a su vez depende de la proporción celulosa, hemicelulosa y lignina en la FDN (NRC, 2001), por ende, dietas con similar contenido de FDN, no necesariamente tendrán digestibilidad equivalente y viceversa. En el presente trabajo, el consumo de FDN desde el CMS_h osciló entre 84,4 y 87,7% para los tratamientos incluyendo residuos arbóreos y agroindustriales y representó el 96,2% en el tratamiento C. La mayor participación de FDN derivada del pasto, posiblemente redundó en similar degradabilidad ruminal para este nutriente, explicando en alguna medida la ausencia de diferencia en la digestibilidad aparente de los nutrientes.

Una última justificación de la ausencia de diferencia estadística en la digestibilidad de los nutrientes corresponde a la baja concentración de taninos en las dietas incluyendo VV, CA y GS. Los taninos son conocidos por conferir astringencia a las raciones y por formar complejos con proteínas, afectando la digestibilidad de la materia seca y disminuyendo la utilización de N en los animales (Mazzafera, 2002). Sin embargo, para ejercer un efecto negativo sobre la digestibilidad deben estar presentes en suficiente cantidad. En estudios realizados en bovinos de carne, Ningrat et al. (2018) observaron disminución en la DA de la MS, MO y FDN con una concentración de taninos del 1,56% de la MS. Bain et al. (2016) evaluando una concentración de TC correspondiente al 0,52% de la MS, sólo encontraron menor DA de la PC, sin afectarse la digestibilidad de la MS, MO y FDN en ganado de raza Bali. Teixeira et al. (2014) encontraron que un contenido de fenoles totales del 0,75% de la MS afectó negativamente la digestibilidad de la PC y la FDN en cabras. Anantasook et al. (2013) observaron reducción en la DA de la PC, pero no de la FDN, en ganado lechero consumiendo raciones con 0,88% de TC de la MS. Piñeiro-Vásquez et al. (2018) utilizando niveles crecientes de *Leucaena leucocephala* en ganado lechero encontraron que la DA de la FDN se afectó con niveles de TC superando 0,42% de la MS. En el presente estudio, las concentraciones de catequinas correspondieron a 0,028, 0,029 y 0,032% de la MS en las dietas formuladas con VV, CA y GS, respectivamente, muy por debajo de los niveles descritos por los autores.

En general, se concluye que un nivel de inclusión de recursos arbóreos y agroindustriales del 13,48% de la dieta permite obtener valores de DA comparables con la dieta control (Tabla 3), evidenciando su potencial de utilización. Los resultados de digestibilidad del presente estudio son comparables o superan los valores descritos por diversos autores. Anantasook et al. (2013) reportaron digestibilidades de la MS, MO y la PC de 63,2, 67,1 y 66,6%, respectivamente. Para los mismos nutrientes, Ningrat et al., (2018) obtuvieron valores de 59,95, 65,98 y 73,64% y Abarghuei et al. (2010) de 68,2, 73,4 y 70,9%, correspondientemente.

Balance de nitrógeno

La mayor excreción urinaria en el tratamiento CA (Tabla 4) es consistente con los hallazgos de otros trabajos. Cabezas et al. (1977), trabajando con ganado lechero, encontraron que el volumen de orina aumentó progresivamente con niveles crecientes de pulpa de café. Cuando este alimento representó el 20% de la MS, el volumen urinario fue 1,3 superior respecto la dieta control. Rodríguez et al. (1974) también reportaron un aumento en el volumen de orina con inclusiones de pulpa de café correspondientes al 31% de la MS. Braham y Bressani (1979) indican que la cafeína, presente en la pulpa de café, aumenta la sensación de sed, el consumo de agua y la excreción urinaria. El mayor volumen de orina del tratamiento CA, sin embargo, no resultó en diferencias en la excreción urinaria de N en comparación con el tratamiento VV, lo cual se puede explicar por una menor concentración del elemento en la orina de los animales consumido CA.

Del balance de N se desprenden varias conclusiones: a) No necesariamente menor consumo de N desencadena menor excreción urinaria del elemento. El menor consumo de PB y por ende de N del tratamiento CA, ya discutido previamente, no resultó en menor excreción urinaria de N. b) El volumen urinario no determina la excreción de N. Los tratamientos VV y G, que estadísticamente registraron el menor volumen de orina, presentaron diferencia estadística en la excreción del elemento. Ambos conceptos están relacionados con la utilización del N en el organismo. Mayor digestibilidad y/o retención de la proteína consumida, redundarán en menor excreción urinaria del N.

Con relación al tratamiento G, la menor excreción de N urinario se explica por un menor volumen de orina y una menor concentración del elemento en la misma. La única diferencia de esta dieta con respecto a las demás, es que el residuo agroindustrial empleado fue el de mayor concentración de PB y en esa medida la necesidad de incorporar urea fue menor. Esta situación genera diferencias en la solubilidad de la proteína consumida. La dieta G, con menor proteína soluble, pudo resultar en menor

excreción de N. Finalmente, la semilla de algodón es fuente de proteína de sobrepaso, conduciendo a menor degradabilidad y disponibilidad de N en el ambiente ruminal.

La relación NR/NC en todos los tratamientos superó los reportes de la literatura (Tabla 4). Arias et al. (2013), utilizando para efectos de cálculo novillos Angus entre 350 y 500 kg, simularon una eficiencia de utilización del N entre 13,4 y 16,3%. En el trabajo de De Almeida et al. (2016), la relación fluctuó entre 6,5 y 22,5% en animales Nellore. Valores muy cercanos, entre 7,2 y 21,1% fueron reportados por Waldrip et al. (2013) en ganado de carne. En el estudio de Johnson et al. (2016), la relación varió entre 20,3 y 29,8% para el mismo tipo de ganado. No obstante, datos similares a los del presente estudio fueron encontrados por Vieira et al. (2017), entre 53,2 y 58,6%. En promedio, la cantidad de N excretada en el presente estudio fue de 49,3 g/animal/d, inferior al valor reportado por ASABE (2010), 130 g/animal/d, para novillos en crecimiento, lo que corrobora la mayor eficiencia de utilización de la proteína consumida bajo las actuales condiciones experimentales.

La mayor utilización neta de la proteína, correspondiente a la relación NR/NC, también puede ser explicada por el peso y edad de los animales. Al inicio del período de crecimiento hay un incremento de la masa muscular, que se asocia con una mayor síntesis de proteína y retención de N. A medida que el peso del cuerpo aumenta, los pesos de todos los constituyentes químicos aumentan, pero a tasas diferentes. La grasa se deposita a una tasa creciente, en tanto que los componentes del cuerpo magro, representados principalmente por la proteína, lo hacen a tasas decrecientes (Veloso et al., 2002).

La concentración de PB en la dieta consumida también explica los mayores niveles de retención. En este sentido, Salazar (2005) agrega que una dieta balanceada maximiza el uso de los nutrientes por los animales y reduce las pérdidas a través de las heces y la orina. Erickson et al. (1999), al comparar una dieta convencional con 13,5% PB vs. una dieta que ajustó el suministro al requerimiento de los animales (11,5% PB), lograron reducir la excreción de N un 20,7%, sin alterar la retención del mismo.

Producción de metano entérico

La producción de CH₄ entérico depende de la fermentación ruminal, que a su vez depende de la cantidad de alimento consumido, su tasa de pasaje y degradabilidad (Shi et al., 2014). La diferencia en la producción de CH₄ (L/d) entre los tratamientos VV y CA es consistente con las diferencias en el CMS total entre ellos. Múltiples estudios demuestran que el CMS y la producción de CH₄ están relacionados. Ricci et al. (2013) indicaron que el CMS explicó en un 70% la variación de la producción de CH₄ en ganado de carne. Dijkstra et al. (2011) encontraron una relación lineal del orden de 35 L CH₄/kg MS consumida. Charmley et al. (2016), utilizando 1034 datos de producción de CH₄ en ganado de carne y leche, también reportaron una relación lineal entre ambas variables, con un R² de 91,5%.

La producción de CH₄, expresada por unidad de proteína digestible (PRd), fue inversamente proporcional a la DA de esta fracción, variable en la que se registraron diferencias numéricas, pero no estadísticas. Así, la menor digestibilidad de la PB para el tratamiento G, resultó en mayor producción de CH₄ por unidad de PRd respecto al tratamiento C.

Extrapolando el valor medio de producción de CH₄ registrado en este estudio para los cinco tratamientos, 118,6 L/animal/d (Tabla 5), se obtiene un factor de emisión de 31 kg CH₄/animal/año, inferior al reportado por el IPCC (2006) para ganado de carne en América Latina y Norte América, 56 y 53 kg, respectivamente. Los valores de producción de CH₄ reportados en la literatura son variables y dependen de aspectos genéticos y ambientales. Caetano et al. (2016) reportaron en animales Angus de 390±38,1 kg, una producción de 268,2 L CH₄/animal/d con un alimento de alta calidad. Por otro lado, en animales *Bos indicus* de 300 a 350 kg, consumiendo pasturas de baja calidad, Kurihara et al., (1999) encontraron producciones de CH₄ 156,2 L/animal/d, similar a los valores reportados por Posada et al. (2017) en animales Nellore, 150,2 L/animal/d.

La producción de 18,5 L CH₄/kg MS consumida (valor medio de los cinco tratamientos) es baja cuando se le compara con algunos reportes de la literatura, a saber, 22,5 (Noguera y Posada, 2017) y 23,7 L (Grainger et al., 2010) en ganado de leche, 25,23 L (Ku-Vera et al., 2018) en animales cruzados, 28,9 (Charmley et al., 2016), 27,8 (Stergiadis et al., 2016) y 27,7 L CH₄/kg de MS (Kennedy y Charmley, 2012) en ganado Brahman. Al igual que la emisión de CH₄ por kg de MS, la producción de 20,3 L/kg MO consumida (valor medio de los cinco tratamientos del presente estudio) fue inferior a los reportes de Ku-Vera et al., (2018) y Stergiadis et al., (2016), 26,4 y 28,7 L/kg MO consumida, respectivamente. La menor producción de CH₄ puede ser explicada por el alto CMS observado. Sanson y Hixon (1999) indicaron que el CMS, expresado como porcentaje del PV, fluctúa entre 1-2, 1,5-2,5 y 2,2-3,3% en ganado de carne alimentado con heno de baja, media y alta calidad, respectivamente. Los valores del presente estudio se encuentran en el rango superior o lo superan (Tabla 2), con lo cual la producción de CH₄ por kg de MS se diluye (Tabla 5). El heno empleado en este trabajo se caracterizó por su alta concentración de FDN y baja de PB (Tabla 1), no obstante, la suplementación generó un efecto asociativo positivo sobre el CMS total.

La dieta afecta la producción de CH₄, no sólo por la cantidad consumida, sino también por su calidad, la cual altera el patrón de fermentación ruminal. Kumar et al. (2009) indican que los carbohidratos simples producen más CH₄ (0,45 moles/mol de hexosa) que los carbohidratos complejos (0,3 moles/mol de hexosa). En este trabajo, la única diferencia estadística registrada en la concentración de nutrientes consumidos, que le correspondió a la FDN (Tabla 2), no fue suficiente para alterar la producción de CH₄ por unidad de MSc y de MSd (Tabla 5), lo que permite concluir que los tratamientos fueron muy similares en composición, y posiblemente no modificaron la relación acetato:propionato a nivel ruminal.

En el presente trabajo, la pérdida energética a través de la producción de CH₄ representó el 4,2% del CEB (*Y_m*) (promedio de los cinco tratamientos) (Tabla 6), igual al valor reportado por Ku-Vera et al. (2018) en ganado cruzado, e inferior al valor reportado por Noguera y Posada (2017), 4,9% en vacas lecheras. Kurihara et al. (1999)

informaron Y_m de 7,3 y 8,9% en animales alimentados con pasturas tropicales de baja calidad nutricional a niveles *ad libitum* y restricto, respectivamente. El IPCC (2006) sugiere un valor de 6,5% para vacas lecheras, búfalos y otros tipos de ganado alimentados con residuos de cosecha.

Similar a lo que sucede con la DA, los niveles de taninos requeridos para reducir las emisiones de CH_4 son superiores a los presentes en este estudio. Naumann et al. (2015), a partir de la información de múltiples estudios, concluyeron que la variación en la producción de CH_4 en sustratos con una concentración de TC inferior al 3% puede ser no explicada por la concentración de este metabolito secundario. A partir de este nivel hay un mayor nivel de asociación entre el aumento de TC y la disminución de CH_4 entérico.

Se concluye que las diferencias en la producción de CH_4 entre tratamientos son explicadas por diferencias en el CMS y no en su composición química. La inclusión de recursos arbóreos y agroindustriales, que se caracterizan por su alto contenido de FDN, dificulta la formulación de raciones que tienen una participación sustancial de forraje, también de elevada concentración fibrosa. Con el fin de no comprometer el contenido de otros nutrientes, entre ellos la PB, la inclusión de recursos arbóreos y agroindustriales se ve limitada y en tal sentido, no es posible evidenciar efectos sobre la producción de CH_4 .

Balance y eficiencia de utilización de la energía

El menor CEB y la densidad de EB/kg en el tratamiento que incorporó CA (Tabla 6) es reflejo de su menor CMS (Tabla 2). La ausencia de diferencia estadística en la digestibilidad de la energía (Tabla 6) es consistente con la igualdad registrada en la digestibilidad de la materia orgánica (Tabla 3). La mayor pérdida de energía a través de la orina en la dieta incluyendo CA, en sus diferentes formas de expresión (Tabla 6), es consistente con la mayor excreción urinaria (L/animal/día) observada en este tratamiento. La menor pérdida para el tratamiento G, además del menor volumen

urinario, se corresponde con la menor excreción de N por esta vía (Tabla 4). Las pérdidas de energía a través del CH₄ (Tabla 6) guardaron una relación directa con su producción (Tabla 5). Si bien, las pérdidas de energía a través de la orina y el CH₄ no siguieron la misma dinámica al interior de un mismo tratamiento, puede observarse que el CEM (Mcal/d), la metabolibilidad (EM/EB) y la densidad energética de las dietas (kcal EM/kg) fueron estadísticamente equivalentes entre tratamientos (Tabla 6).

La relación EM/ED fue similar a la reportada por Hales et al. (2014) (0,89 a 0,92) y Nkrumah et al. (2006) (0,90-0,92), pero superior al valor indicado por el CSIRO (2007) y el NRC (2000), 0,81 y 0,82, respectivamente. De acuerdo con Van Soest (1994), del 3 al 5% de la ED se pierde a través de la orina. En el presente estudio, esta pérdida sólo representó el 1,94%, explicando la superior relación EM/ED.

Con relación a la producción de calor, el menor consumo de FDN (%CMS total) en los tratamientos C y G no fue suficiente para alterar esa variable. La PC representó el 49% del CEM, inferior a los reportes de Nkrumah et al. (2006) y van Kneegsel et al., (2007) de 59 y 52,7%, respectivamente, pero superior a los valores de Lage (2011), 35,2% y 36,6% en animales Gyr y cruzados, correspondientemente. A pesar de ello, el promedio de ER con respecto a la EB fue de 33,3%, menor al valor indicado por Nkrumah et al. (2006) en animales con bajo consumo alimentario residual (animales con mayor eficiencia en la utilización de la energía), 38,85%.

Conclusiones

La inclusión de VV, CA, G y GS, representando el 15% de la dieta, no afectó la DA de los nutrientes, el N y la energía retenidos, en relación con la dieta control. El CMS fue menor para el tratamiento CA, lo que fue consistente con una menor producción de CH₄ en los animales que consumieron esta dieta. No obstante, cuando la producción de CH₄ se expresó por unidad de materia seca consumida o respecto la energía bruta consumida (*Y_m*), la inclusión de recursos arbóreos o agroindustriales no generó

diferencias respecto la dieta control. Se concluye que la participación de estos ingredientes al 15% de la dieta no afecta el balance de nutrientes y representa una oportunidad para reducir su inadecuada disposición final. Sin embargo, mayores niveles de inclusión en dietas para rumiantes deben ser evaluados, buscando esclarecer su efecto sobre las variables descritas en este trabajo.

Bibliografía

Abarghwei MJ, Rouzbehan Y, Alipour D. The influence of the grape pomace on the ruminal parameters of sheep. *Livestock Science*. 2010 Aug 1;132(1-3):73-9.

Alipour D, Rouzbehan Y. Effects of ensiling grape pomace and addition of polyethylene glycol on in vitro gas production and microbial biomass yield. *Animal Feed Science and Technology*. 2007 Sep 1;137(1-2):138-49.

Anantasook N, Wanapat M, Cherdthong A, Gunun P. Effect of plants containing secondary compounds with palm oil on feed intake, digestibility, microbial protein synthesis and microbial population in dairy cows. *Asian-Australasian journal of animal sciences*. 2013 Jun;26(6):820.

AOAC International. *Official Methods of Analysis*. 18th ed. Arlington, VA: AOAC International; 2007.

AOAC International. *Official Methods of Analysis*. 18th ed. Gaithersburg, MD: AOAC International; 2005.

Arias RA, Velásquez A, Toneatti M. Simulación de la eficiencia de la utilización de nitrógeno en novillos finalizados a pastoreo en el sur de Chile. *Archivos de Medicina Veterinaria*. 2013;45(2):125-34.

ASABE. ASAE Standard: Manure production and characteristics. ASABE D384.2 MAR2005 (2010). American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI.

Baião AA. Desempenho de novillos nelore suplementados a pasto com diferentes níveis de concentrado 2002. (Doctoral dissertation, Universidade Federal de Lavras.).

Bain A, Astuti DA, Suharti S, Arman C, Wiryawan KG. Performance, nutrient digestibility, and meat quality of Bali cattle fed a ration supplemented with soybean oil calcium soap and cashew fruit flour. *Media Peternakan*. 2016 Dec 20;39(3):180-8.

Baumgärtel T, Kluth H, Epperlein K, Rodehutschord M. A note on digestibility and energy value for sheep of different grape pomace. *Small Ruminant Research*. 2007 Feb 1;67(2-3):302-6.

Beck MR, Thompson LR, White JE, Williams GD, Place SE, Moffet CA, Gunter SA, Reuter RR. Whole cottonseed supplementation improves performance and reduces methane emission intensity of grazing beef steers. *The Professional Animal Scientist*. 2018 Aug 1;34(4):339-45.

Braham JE, Bressani R. Coffee pulp: composition, technology, and utilization. IDRC, Ottawa, ON, CA; 1979.

Bressani R. Anti-physiological factors in coffee pulp. Composition, technology and utilization. Guatemala City: Institute of Nutrition of Central America and Panama. 1987p. 83-88.

Brouwer E. Report of sub-committee on constants and factors. In Proceedings of the 3rd symposium on energy metabolism of farm animals, 1965 1965 (Vol. 11, pp. 441-443). European association for animal production.

Cabezas T, Menjivar M, Murillo B, Bressani R. Alimentación de vacas lecheras con ensilaje de pulpa de café. Informe anual. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá. Ciudad de Guatemala, Guatemala. 1977.

Caetano M, Wilkes MJ, Pitchford WS, Lee SJ, Hynd PI. Efficacy of methane-reducing supplements in beef cattle rations. *Animal production science*. 2016 Feb 9;56(3):276-81.

Charmley ES, Williams SR, Moate PJ, Hegarty RS, Herd RM, Oddy VH, Reyenga P, Staunton KM, Anderson A, Hannah MC. A universal equation to predict methane production of forage-fed cattle in Australia. *Animal Production Science*. 2016 Feb 9;56(3):169-80.

Chavan UD, Shahidi F, Naczk M. Extraction of condensed tannins from beach pea (*Lathyrus maritimus* L.) as affected by different solvents. *Food chemistry*. 2001 Dec 1;75(4):509-12.

Cieslak A, Zmora P, Pers-Kamczyc E, Szumacher-Strabel M. Effects of tannins source (*Vaccinium vitis idaea* L.) on rumen microbial fermentation in vivo. *Animal feed science and technology*. 2012 Sep 21;176(1-4):102-6.

CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization). 2007. *Nutrient Requirements of Domesticated Ruminants*. CSIRO Publishing, Collingwood, Victoria, Australia.

De Almeida Rufino LM, Detmann E, Gomes DÍ, dos Reis WL, Batista ED, de Campos Valadares Filho S, Paulino MF. Intake, digestibility and nitrogen utilization in cattle fed tropical forage and supplemented with protein in the rumen, abomasum, or both. *Journal of animal science and biotechnology*. 2016 Dec;7(1):11.

Dijkstra J, Van Zijderveld SM, Apajalahti JA, Bannink A, Gerrits WJ, Newbold JR, Perdok HB, Berends H. Relationships between methane production and milk fatty acid profiles in dairy cattle. *Animal Feed Science and Technology*. 2011 Jun 23;166:590-5.

Erickson GE, Klopfenstein TJ, Milton T, Herold D. Effects of matching protein to requirements on performance and waste management in the feedlot. *Nebraska Beef Cattle Report*. University of Nebraska-Lincoln, Nebraska, USA. 1999. p.60-63

Gerber PJ, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, Falcucci A, Tempio G. *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); 2013.

Grainger C, Williams R, Clarke T, Wright AD, Eckard RJ. Supplementation with whole cottonseed causes long-term reduction of methane emissions from lactating dairy cows offered a forage and cereal grain diet. *Journal of Dairy Science*. 2010 Jun 1;93(6):2612-9.

Hales KE, Brown-Brandl TM, Freetly HC. Effects of decreased dietary roughage concentration on energy metabolism and nutrient balance in finishing beef cattle. *Journal of Animal Science*. 2014 Jan 1;92(1):264-71.

Hess HD, Kreuzer M, Diaz TE, Lascano CE, Carulla JE, Soliva CR, Machmüller A. Saponin rich tropical fruits affect fermentation and methanogenesis in faunated and defaunated rumen fluid. *Animal feed science and technology*. 2003 Oct 3;109(1-4):79-94.

Holdridge L.R. 1967. *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center. San José, Costa Rica.
International Standards Organization-ISO. Animal feeding stuffs, animal products, and faeces or urine. Determination of gross calorific value-Bomb calorimeter method. 1998. Geneva, Switzerland.

IPCC 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.

Jiao HP, Yan T, McDowell DA, Carson AF, Ferris CP, Easson DL, Wills D. Enteric methane emissions and efficiency of use of energy in Holstein heifers and steers at age of six months. *Journal of Animal Science*. 2013 Jan 1;91(1):356-62.

Johnson AC, Reed KF, Kebreab E. Evaluation of nitrogen excretion equations from cattle. *Journal of dairy science*. 2016 Sep 1;99(9):7669-78.

Johnson KA, Johnson DE. Methane emissions from cattle. *Journal of animal science*. 1995 Aug 1;73(8):2483-92.

Kennedy PM, Charmley E. Methane yields from Brahman cattle fed tropical grasses and legumes. *Animal Production Science*. 2012 Apr 5;52(4):225-39.

Kumar S, Puniya AK, Puniya M, Dagar SS, Sirohi SK, Singh K, Griffith GW. Factors affecting rumen methanogens and methane mitigation strategies. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2009 Sep 1;25(9):1557-66.

- Kurihara M, Magner T, Hunter RA, McCrabb GJ. Methane production and energy partition of cattle in the tropics. *British Journal of nutrition*. 1999 Mar;81(3):227-34.
- Ku-Vera JC, Valencia-Salazar SS, Piñeiro-Vázquez AT, Molina-Botero IC, Arroyave-Jaramillo J, Montoya-Flores MD, Lazos-Balbuena FJ, Canul-Solís JR, Arceo-Castillo JI, Ramírez-Cancino L, Escobar-Restrepo CS. Determination of methane yield in cattle fed tropical grasses as measured in open-circuit respiration chambers. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018 Aug 15;258:3-7.
- Lage H. Partição da energia e exigência de energia líquida para manutenção de novilhas Gir e F1 Holandês x Gir. 2011. 78f (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado em Zootecnia)—Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Veterinária, Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Belo Horizonte).
- Lara CE, García JM, López J. Influencia del pastoreo en la concentración de fenoles totales y taninos condensados en *Gliricidia sepium* en el trópico seco. *Livestock Research for Rural Development*. 2000;12:4.
- Leifa F, Pandey A, Soccol CR. Solid state cultivation—an efficient method to use toxic agro-industrial residues. *Journal of Basic Microbiology: An International Journal on Biochemistry, Physiology, Genetics, Morphology, and Ecology of Microorganisms*. 2000 Jul;40(3):187-97.
- Macedo R, Galina MA, Zorrilla JM. Balance forrajero, energético y proteico de un sistema de producción tradicional de doble propósito en México. *Zootecnia Tropical*. 2008 Dec;26(4):455-63.
- Mazzafera P. Degradation of caffeine by microorganisms and potential use of decaffeinated coffee husk and pulp in animal feeding. *Scientia Agricola*. 2002 Dec;59(4):815-21.
- McCrabb GJ, Hunter RA. Prediction of methane emissions from beef cattle in tropical production systems. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1999;50(8):1335-40.
- Minson, D.J., 1990. *Forage in Ruminant Nutrition*. Academic Press, London, UK.

Naumann HD, Tedeschi LO, Fonseca MA. Predicting ruminal methane inhibition by condensed tannins using nonlinear exponential decay regression analysis. *Journal of animal science*. 2015 Nov 1;93(11):5341-5.

Ningrat RWS, Zain M, Erpomen, Suryani H. Effects of supplementation of different sources of tannins on nutrient digestibility, methane production and daily weight gain of beef cattle fed on ammoniated oil palm frond based diet. *International journal of zoology. Res.* 2018.14 (1): 8-13.

Nkrumah JD, Okine EK, Mathison GW, Schmid K, Li C, Basarab JA, Price MA, Wang Z, Moore SS. Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. *Journal of animal science*. 2006 Jan 1;84(1):145-53.

Noguera RR, Posada SL. Factor de emisión de metano entérico para vacas Holstein lactantes en la zona norte de Antioquia-Colombia. *Livest. Res. Rural Dev.* 2017;29:6.

Noriega Salazar A, Silva Acuña R, García de Salcedo M. Revisión: Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal. *Zootecnia Tropical*. 2008 Dec;26(4):411-9.

NRC (National Research Council). 2000. *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. 7th ed. National Academy Press, Washington, D.C.

NRC. (National Research Council. *Nutrient requirements of dairy cattle*). 7th ed. Washington, DC: National Academy Press. 2001.

Onwuka CF. Tannin and saponin contents of some tropical browse species fed to goats. *Tropical Agriculture*. 1992 Apr 1;69(2):176-80.

Ortiz DM, Posada SL, Noguera RR. Potencial antimetanogénico de recursos forrajeros y subproductos agroindustriales a través de la técnica in vitro de producción de gas. *Livestock Research for Rural Development*. 2016;28.

Piñeiro-Vázquez AT, Canul-Solis JR, Jiménez-Ferrer GO, Alayón-Gamboa JA, Chay-Canul AJ, Ayala-Burgos AJ, Aguilar-Pérez CF, Ku-Vera JC. Effect of condensed tannins from *Leucaena leucocephala* on rumen fermentation, methane production and

population of rumen protozoa in heifers fed low-quality forage. *Asian-Australasian journal of animal sciences*. 2018 Nov;31(11):1738.

Posada-Ochoa SL, Noguera RR, Rodríguez NM, Costa AL, Reis R. Indirect calorimetry to estimate energy requirements for growing and finishing Nellore bulls. *Journal of integrative agriculture*. 2017 Jan 1;16(1):151-61.

Pulido RG, Escobar A, Follert S, Leiva M, Orellana P, Wittwer F, Balocchi O. Efecto del nivel de suplementación con concentrado sobre la respuesta productiva en vacas lecheras a pastoreo primaveral con alta disponibilidad de pradera. *Archivos de medicina veterinaria*. 2009;41(3):197-204.

Ricci P, Rooke JA, Nevison I, Waterhouse A. Methane emissions from beef and dairy cattle: quantifying the effect of physiological stage and diet characteristics. *Journal of Animal Science*. 2013 Nov 1;91(11):5379-89.

Rodríguez JA, Ruiz ME, Fonseca H. Calidad del ensilaje de pulpa de café, con o sin melaza, y efecto del tiempo de exposición al ambiente de la pulpa previo a su ensilado (Resumen). In1. Reunión Internacional sobre la Utilización de Subproductos de Café en la Alimentación Animal y otras Aplicaciones Agrícolas e Industriales 1974 (No. CATIE 636.08557 R444 1974). CATIE, Turrialba (Costa Rica).

Rondeau P, Gambier F, Jolibert F, Brosse N. Compositions and chemical variability of grape pomaces from French vineyard. *Industrial Crops and Products*. 2013 May 1;43:251-4.

Salazar F. Utilización y pérdidas de nitrógeno en aplicación de purines y estiércol de lechería. *Revista Tierra Adentro*. 2005:23-5.

Sanson DW, Hixon DL. Dry matter intake for beef cattle. Adapted from the Cattle Producer's Library. *Beef Cattle Handbook*. 1999.

URL: <http://www.iowabeefcenter.org/bch/DryMatterIntake.pdf>

SAS 2019. SAS® University Edition. URL:

http://www.sas.com/en_us/software/university-edition.html

Serna-Jiménez JA, Torres-Valenzuela LS, Martínez-Cortínez K, Hernández-Sandoval MC. Use of coffee pulp as an alternative for the valorization of by-products. *Revista ION*. 2018 Jun;31(1):37-42.

Shi W, Moon CD, Leahy SC, Kang D, Froula J, Kittelmann S, Fan C, Deutsch S, Gagic D, Seedorf H, Kelly WJ. Methane yield phenotypes linked to differential gene expression in the sheep rumen microbiome. *Genome research*. 2014 Sep 1;24(9):1517-25.

Stergiadis S, Zou C, Chen X, Allen M, Wills D, Yan T. Equations to predict methane emissions from cows fed at maintenance energy level in pasture-based systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2016 Mar 15;220:8-20.

Teixeira AD, Junior R, de Oliveira G, Velasco FO, Faria Júnior WG, Rodriguez NM, Santos Rodrigues JA, McAllister T, Gonçalves LC. Intake and digestibility of sorghum (*Sorghum bicolor*, L. Moench) silages with different tannin contents in sheep. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2014 Jan;43(1):14-9.

Van Knegsel AT, Van den Brand H, Dijkstra J, Van Straalen WM, Heetkamp MJ, Tamminga S, Kemp B. Dietary energy source in dairy cows in early lactation: energy partitioning and milk composition. *Journal of Dairy Science*. 2007 Mar 1;90(3):1467-76.

Van Soest P J. *Nutritional Ecology of the Ruminant*. 2nd ed. 1994. Cornell University Press, NY, USA.

Van Soest PV, Robertson JB, Lewis BA. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of dairy science*. 1991 Oct 1;74(10):3583-97.

Varón LE, Granados JE. Interrelación entre el contenido de metabolitos secundarios de las especies *Gliricidia sepium* y *Tithonia diversifolia* y algunas propiedades físicoquímicas del suelo. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*. 2012 Jan 16;3(1):53-62.

Vasta V, Jerónimo E, Brogna DM, Dentinho MT, Biondi L, Santos-Silva J, Priolo A, Bessa RJ. The effect of grape seed extract or *Cistus ladanifer* L. on muscle volatile compounds of lambs fed dehydrated lucerne supplemented with oil. *Food Chemistry*. 2010 Apr 15;119(4):1339-45.

Veloso CM, Valadares Filho SD, Gesualdi Júnior A, Silva FF, Paulino MF, Valadares RF, Cecon PR, Paulino PV. Composição corporal e exigências energéticas e protéicas de bovinos F1 Limousin x Nelore, não-castrados, alimentados com rações contendo diferentes níveis de concentrado. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2002 Jun;31(3):1273-85.

Vieira PA, Azevêdo JA, Silva FF, Pereira LG, Neves AL, Santos AB, Souza LL, Santos RD. Parâmetros ruminais e balanço de nitrogênio em bovinos alimentados com silagem da raiz de mandioca. *Pesquisa Veterinária Brasileira*. 2017 Aug;37(8):883-90.

Vilela FG. Uso da casca de café melosa em diferentes níveis na alimentação de novilhos confinados. 1999.

Waldrip HM, Todd RW, Cole NA. Prediction of nitrogen excretion by beef cattle: A meta-analysis. *Journal of Animal Science*. 2013 Sep 1;91(9):4290-302.

CAPÍTULO 3.

DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA PARA EL MANTENIMIENTO Y LA GANANCIA DE PESO EN GANADO MESTIZO MEDIANTE CALORIMETRÍA INDIRECTA

Resumen

La energía es uno de los componentes que más limitan la productividad, especialmente cuando se reduce la disponibilidad forrajera, lo que hace necesario implementar programas de alimentación que cubran los requerimientos nutricionales. No obstante, a nivel latinoamericano, los requerimientos nutricionales en ganado de carne han sido poco estudiados. El objetivo de este estudio fue determinar los requerimientos de energía neta para el mantenimiento (EN_m) y la ganancia de peso (EN_g), así como la eficiencia de utilización de la energía metabolizable (EM) para ambas funciones (k_m y k_g) en ganado mestizo. Para tal efecto se emplearon diez animales Brangus (peso vivo $240,7 \pm 23,1$ kg) que recibieron una dieta basada en heno de pangola (*Digitaria decumbens*) y suplemento, en proporción 70:30, aproximadamente. La producción de calor (PC) se cuantificó a diferentes niveles de alimentación (*ad libitum*, restricto y ayuno) a través del empleo de cámaras de respiración de circuito abierto. La EN_m se determinó a partir de tres aproximaciones: 1) El valor de PC de ayuno entre las 00:00 y 06:00 horas, extrapolado a 24 horas (PC_{ay24} ajustado); 2) A partir del intercambio respiratorio durante 24 horas de ayuno (PC_{ay24}); 3) Desde modelos de regresión lineal entre el logaritmo de la PC (y) y el consumo de EM (CEM) (x) (kcal/kg PCV^{0,75}/día) en los niveles de alimentación *ad libitum*, y restricto (PCV^{0,75}: peso corporal vacío metabólico). El requerimiento de EN_g (kcal/kg PCV^{0,75}/día) se determinó a partir de tres aproximaciones: 1) A partir de la diferencia entre el CEM y la PC determinadas al nivel de alimentación *ad libitum*; 2) Desde la ecuación exponencial: $EN_g = aX^b$, donde a y b correspondieron al antilogaritmo del intercepto y la pendiente de la regresión lineal entre el logaritmo de la ganancia de peso vacío (GPV) (x) (kg) y el logaritmo de la energía retenida (ER) (kcal/kg PCV^{0,75}/día) (y); 3) Desde la ecuación parabólica $EN_g = (b \cdot z) + (c \cdot z^2)$, donde b y c se obtuvieron de la relación entre la GPV (kg) (x) y la ER

(kcal/kg PCV^{0,75}/día (y). La eficiencia de utilización de la EM se calculó a partir de la relación EN/EM para mantenimiento y ganancia. Los requerimientos de EN_m fueron 95,01, 80,4 y 83,3 kcal/kg PCV^{0,75}, cuando determinados desde PCay24, PCay24 ajustado y por regresión, respectivamente. Los requerimientos de EN_g fueron 104,5, 98,6 y 206,1 kcal/kg PCV^{0,75}, cuando determinados por la diferencia EM-PC, la ecuación exponencial y parabólica, respectivamente. El k_m y el k_g en promedio fue de 0,75 y 0,40, respectivamente. Se concluye que el requerimiento de EN_m fue mayor al propuesto por la NRC, 77 kcal/PVC^{0,75}, y que los requerimientos de EN_g se encuentran por encima de lo reportado en la literatura.

Palabras claves: ganado mestizo, ganancia de peso, mantenimiento, requerimiento energético.

Introducción

La ganadería en Colombia representa alrededor del 1,4% del producto interno bruto (PIB), el 21,8% del PIB agropecuario y el 48,7% del sector pecuario, siendo de gran importancia para el crecimiento económico (Fedegan, 2016). En el año 2019, el inventario vacuno alcanzó un total de 27.234,027 cabezas (ICA, 2019). La importancia de la ganadería en la economía del país es evidente, sin embargo, aún predominan los sistemas de pastoreo extensivo tradicional o de pastoreo extensivo mejorado, donde el nivel de tecnificación es mínimo y la competitividad, productividad y sostenibilidad es baja.

La energía y la proteína son los componentes que más limitan la productividad, especialmente cuando se reduce la disponibilidad forrajera, lo que hace necesario implementar programas de alimentación que cubran los requerimientos nutricionales del animal y optimicen la eficiencia en el uso de los alimentos para el mantenimiento y el crecimiento. Sin embargo, las guías nutricionales disponibles para la formulación de las dietas han sido desarrolladas a nivel internacional (NRC, 2016; CSIRO, 2007; AFRC 1993; INRA, 1989), en países con otras condiciones medio ambientales, razas, recursos

alimenticios y prácticas de manejo que pueden no reflejar nuestras condiciones de producción.

A nivel latinoamericano, los requerimientos nutricionales en ganado de carne han sido poco estudiados, destacando los trabajos que Brasil ha realizado en el tema (Valadares et al., 2006; Valadares et al, 2016). El volumen de información debe aumentar para lograr establecer modelos matemáticos más consolidados a nivel tropical, adaptados al tipo de ganado, las condiciones ambientales y los sistemas de producción. Los animales evaluados en condiciones tropicales principalmente han sido cebuínos, sin embargo, en las últimas décadas la introducción de razas taurinas, como el *Aberdeen angus*, se ha vuelto una práctica muy utilizada para mejorar aspectos productivos.

El sacrificio comparativo, una de las metodologías más empleadas para determinar los requerimientos nutricionales, es laboriosa, demanda tiempo y requiere un gran número de animales. La respirometría indirecta, a través de la cuantificación del intercambio gaseoso, constituye una metodología alternativa para determinar los requerimientos energéticos sin necesidad de sacrificar los animales. El objetivo de este estudio fue determinar los requerimientos de energía y la eficiencia de utilización de la energía metabolizable para el mantenimiento y la ganancia de peso en ganado mestizo utilizando calorimetría indirecta.

Materiales y métodos

Comité de ética

Este proyecto fue aprobado por el Comité de Ética para la Experimentación con animales de la Universidad de Antioquia (acta 76 de mayo 10 de 2012), cumpliendo con lo dispuesto en la Ley 84 de 1989, "Estatuto Nacional de Protección de los Animales", y en la Resolución 008430 de 1993, "Normas científicas y administrativas para la investigación en salud", expedidas por el Ministerio de Salud de la República de Colombia.

Localización

El experimento se realizó en el Laboratorio de Calorimetría Animal, ubicado en la hacienda “La Montaña”, propiedad de la Universidad de Antioquia. La hacienda se encuentra ubicada en el municipio de San Pedro de los Milagros (Antioquia-Colombia), a una altitud de 2475 msnm y presenta 16°C, 72% de humedad relativa y 1575 mm de precipitación promedio anual, ubicándose en una zona de vida bosque húmedo montano bajo (bh-MB), de acuerdo con la clasificación de Holdridge (1967).

Animales e instalaciones

Se utilizaron diez (10) animales mestizos (Brahman x Angus), castrados, con un promedio de peso vivo (PV) y edad de 240,7±23,1 kg y 477,2±41,8 días, respectivamente. Antes del inicio del experimento, los animales fueron tratados para ecto y endoparásitos y adaptados al manejo, a la cámara respirométrica y al régimen de alimentación, actividades que contribuyeron con el proceso de mansedumbre.

Los animales se estabularon en un galpón abierto, con ventilación e iluminación natural, en corrales individuales (2,5 m²) dispuestos con comederos y bebederos. Las instalaciones contaron con techos para proteger los animales de la radiación solar directa y el estrés térmico. El piso de concreto se cubrió con tapetes de caucho para brindar mayor confort y evitar lesiones en las patas.

Para la cuantificación del intercambio gaseoso, los animales ingresaron a dos cámaras de respiración de circuito abierto, cada una de 24,6 m³ (2,7 m de ancho, 3,8 m de largo y 2,4 m de altura), construidas en acero inoxidable y dotadas con ventanas laterales de vidrio (1,40*1,30 m), que permitieron el contacto visual entre animales, disminuyendo su estrés, y la observación de los mismos por parte del personal científico. Al interior de cada cámara se dispuso brete, comedero, bebedero automático, ventilador para garantizar el mezclado de los gases, aire acondicionado y deshumificador para

garantizar condiciones de termoneutralidad y bienestar. La entrada de aire a la cámara se realizó por la esquina anterior derecha, cerca de la cabeza del animal. En ese punto se ubicó una válvula, que permitió ajustar la presión de la cámara hasta valores que fluctuaron entre -0,02 y -0,04 psi. La salida de aire desde la cámara para su posterior análisis se llevó a cabo por la parte posterior (Figura 1).

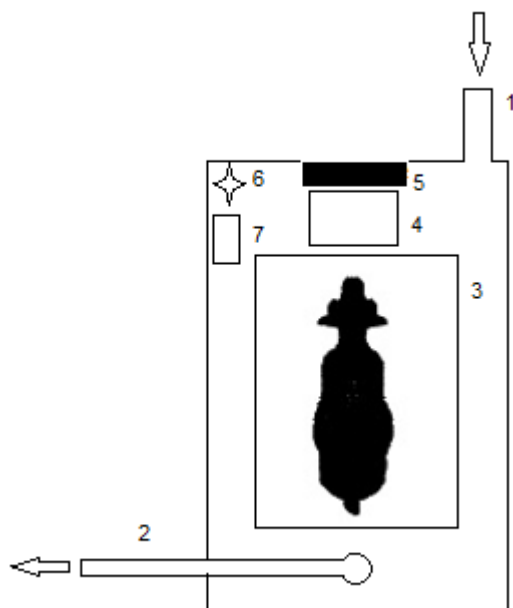


Figura 1. Componentes de las cámaras de respiración de circuito abierto de la Universidad de Antioquia, Colombia. 1. Entrada de aire. 2. Salida de aire. 3. Brete. 4. Comedero. 5. Aire acondicionado. 6. Ventilador. 7. Deshumificador.

Composición de la dieta y niveles de alimentación

Los animales fueron alimentados con una dieta compuesta por heno de Pangola (*Digitaria decumbens*) y suplemento incluyendo semilla de algodón (*Gossypium sp.*), en una proporción cercana a 70:30, la cual se suministró dos veces al día, a las 08:00 y 17:00 horas. La composición química de la dieta se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del heno de Pangola (*Digitaria decumbens*) y del suplemento.

Nutriente (%) ¹	Heno	Suplemento ²
MS	89	87,8
PB	6	24,5
FDN	59	13.8
MI	8.7	10,6
EB (kcal/g)	4200	4450

¹Composición expresada en el 100% de la materia seca (MS); PB, proteína bruta; FDN, fibra detergente neutra; MI, cenizas; EB, energía bruta (kcal/kg).

²Suplemento formulado con maíz (35.4%), torta de soya (35%), semilla de algodón (15%), urea (0.6%) melaza (8%) y sal mineralizada (6%).

Los animales fueron sometidos a tres niveles de alimentación; *ad libitum* (ganancia de peso vacío, GPV 992 g/día), restricto (GPV -97 g/día) y ayuno. El nivel de alimentación *ad libitum* se realizó al inicio del experimento, durante la prueba de desempeño y, seguidamente, durante la prueba de balance energético, con una duración total de 51 días. La prueba de balance energético incluyó colecta de heces (5 días/animal), de orina (5 días/animal) y determinación del intercambio respiratorio a través de calorimetría indirecta (3 días consecutivos/animal). La cantidad de alimento ofertado se ajustó diariamente para garantizar un rechazo del 10%.

Posteriormente, los animales fueron manejados bajo un nivel de alimentación restricto por 40 días, superando el lapso mínimo de 21 días recomendado por el CSIRO (2007) y Rompala et al. (1991). La oferta de energía se limitó a 1,15 veces los requerimientos de mantenimiento propuestos por el NRC (2000) (77 kcal/kg PCV^{0,75}-peso corporal vacío metabólico). En este nivel de alimentación se realizaron las pruebas de balance energético, con la misma duración descrita para el nivel de alimentación *ad libitum*.

Finalizadas las mediciones del periodo restricto, se retiró el alimento por 3 días consecutivos, pero se garantizó agua a voluntad. El último día se determinó el

intercambio respiratorio, con el fin de estimar la producción de calor (PC) durante el ayuno.

Prueba de digestibilidad.

Como previamente descrito, la prueba de digestibilidad aparente se realizó a los niveles de alimentación *ad libitum* y restricto. El consumo de materia seca de heno (CMS_h) y de suplemento (CMS_s) se obtuvo por diferencia entre la oferta y el rechazo. Muestras del alimento ofertado y rechazado por cada animal fueron diariamente colectadas y almacenadas a -10°C, obteniendo al final una muestra compuesta para su posterior análisis químico. La muestra compuesta se obtuvo en proporción directa con la cantidad de rechazo diariamente registrado.

La producción de materia seca (MS) fecal se determinó por el procedimiento de colecta total de heces durante cinco (5) días continuos. Diariamente, a mañana y tarde, se tomaron muestras de aproximadamente 200 g de heces, que fueron colectadas directamente del ano y almacenadas en bolsas plásticas, identificadas y congeladas a -10°C. Al término de los cinco (5) días se obtuvo una muestra compuesta por animal para su posterior análisis químico. La muestra compuesta se obtuvo en proporción directa con la cantidad de heces diariamente excretadas.

Colección de orina y determinación del volumen urinario.

Simultáneamente con la prueba de digestibilidad y durante cinco (5) días consecutivos se realizó colecta total de orina mediante el auxilio de arneses y contenedores plásticos conteniendo 10 ml de ácido sulfúrico (10% H₂SO₄) para prevenir pérdidas de nitrógeno (N) en forma de amonio. Diariamente se registró el volumen urinario y se tomó una muestra que se almacenó a -10°C en frascos plásticos debidamente identificados. Al término de los cinco (5) días se obtuvo una muestra compuesta por animal, en proporción directa al volumen diario excretado, la cual se analizó químicamente.

Cuantificación del intercambio gaseoso y de la producción de calor.

Como previamente descrito, la cuantificación del intercambio respiratorio y de la PC se realizó en los diferentes niveles de alimentación: *ad libitum*, restricto y ayuno, una vez finalizada la prueba de DA y la colecta de orina. En las cámaras, cada animal permaneció tres días continuos, cada día por un periodo aproximado de 22 horas, excepto durante el ayuno, donde cada animal sólo ingresó un día. La información obtenida se extrapoló a un período de 24 horas. El intercambio gaseoso de 24 horas permitió estimar la PC durante el mismo periodo, utilizando para tal efecto la ecuación de Brouwer (1965): $PC \text{ (Kcal)} = 3,866 O_2 + 1,200 CO_2 - 0,518 CH_4 - 1,431 N$, donde los gases se expresaron en litros (L) y el N en gramos (g).

Al interior de la cámara se garantizó una temperatura de 21°C y una humedad relativa de 55%, a través del empleo de aire acondicionado y deshumificador.

El aire de las cámaras fue succionado con la ayuda de dos medidores de flujo de masas (Flowkit 2000; Sable Systems, Las Vegas, USA), uno para cada cámara, a una tasa de 500 L/minuto. La concentración de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y oxígeno (O₂) en las muestras de aire obtenidas del ambiente y de la cámara respirométrica se registró cada segundo a través del software ExpeData® (Sable Systems International, Las Vegas, USA). Los analizadores de CO₂ (CA-10A), CH₄ (MA-10) y O₂ (FC-10) (Sable Systems International, Las Vegas, USA) se calibraron antes de cada periodo de mediciones (ver *calibración de los analizadores*).

Durante el ayuno, la PC se calculó a partir del intercambio respiratorio de 24 h (PCay24) (Kiesling et al., 1973) y de 6 horas (PCay6), entre las 00:00 y 06:00 horas (PC que corresponde exclusivamente a procesos metabólicos basales; Derno et al., 2005), última que se extrapoló a 24 horas (PCay24 ajustado).

Calibración de los analizadores y obtención de factores de recuperación.

Con antelación al inicio de las mediciones, se realizó la calibración de los analizadores y se obtuvo el factor de recuperación de los gases desde cada una de las cámaras respirométricas.

Los analizadores de CO₂, CH₄ y O₂ se calibraron en dos puntos. El primero a “cero” concentración del gas mediante la inyección de N₂ puro (99,99%); el segundo, inyectando una concentración conocida (spam) de CO₂ (0,48%), CH₄ (0,098%) y, en el caso del O₂, pasando aire del ambiente previamente deshidratado en un cilindro conteniendo drierita, tomando en consideración una concentración conocida (spam) de 20,946%.

En las muestras de aire provenientes del ambiente (línea base) y de la cámara, cada segundo se analizó la presión de vapor de agua (PVA) a través del analizador de humedad relativa (RH-300 Sable Systems International, Las Vegas, USA), permitiendo determinar el volumen de aire seco. El analizador de humedad relativa también se calibró en dos puntos. Para el nivel “cero” se utilizó una muestra de aire del ambiente previamente deshidratada en un cilindro conteniendo drierita, reconfirmado el valor a través de la inyección de N₂ puro (99,99%). El spam correspondió a la PVA del ambiente, que se calculó con la concentración de O₂ seco (O₂[`]) (20,946%), obtenida como previamente descrito, y con la concentración de O₂ diluída por la humedad relativa (paso de aire del ambiente sin previa deshidratación en cilindro con drierita, O₂), a través de la siguiente ecuación: $PVA = \text{Presión barométrica (BP)} \times [(O_2^{\text{'}} - O_2) / O_2]$. Todos los datos fueron corregidos para temperatura y presión estándar (STP).

Para obtener el factor de recuperación de los gases desde las cámaras respirométricas, en cada una de ellas se inyectó CH₄, CO₂ y N₂ puros a una tasa conocida, 0,25, 1,0 y 2,5 L/min, respectivamente, por un periodo de dos horas. La cantidad de gas inyectado se determinó gravimétricamente usando una balanza con capacidad de 30 kg x 0,1g (Lexus, Compax II). La recuperación de los gases inyectados se realizó durante cinco horas, aproximadamente, garantizando más de cinco constantes de tiempo (CT), con una recuperación esperada del 99%, según la cinética de primer orden (e^{-kt}) de los

gases (Lighton y Helsey, 2011). La CT (49,2 minutos) se obtuvo de la relación entre volumen de la cámara y flujo de extracción, 24.600 L y 500 L/minuto, respectivamente. Para determinar los factores de recuperación, se garantizaron las mismas condiciones del período de medición con animales, esto es, aire acondicionado ajustado a 21°C, deshumificador fijado al 55%, ventilador prendido para facilitar la mezcla de los gases y una programación del software Expedata (Sable Systems, Las Vegas, USA) correspondiente a lecturas intercaladas de 1 minuto en muestras provenientes del ambiente (línea base) por 9 minutos en muestras procedentes de la cámara. El procesamiento de los datos se realizó conforme la metodología descrita por Wilmore y Costill (1973). El procedimiento se realizó en duplicado en cada cámara y los factores de recuperación promedio obtenidos para CH₄, CO₂ y O₂ fueron: 0,87, 0,88 y 1,0 (cámara 1) y 0,9, 0,88 y 1,0 (cámara 2), respectivamente.

Peso corporal vacío.

Los animales se pesaron al inicio y al final de cada periodo de mediciones, en cada nivel de alimentación, a las 12 y 72 horas de ayuno. La PC determinada por calorimetría se expresó por unidad PCV^{0,75} (kcal/kg PCV^{0,75}/día). El peso corporal vacío (PCV) fue predicho a partir de la construcción de ecuaciones de regresión lineal, relacionando el PV de los animales alimentados *ad libitum* o restringidos después de 12 horas de ayuno (*x*), con el PV después de 72 horas de ayuno (*y*).

Variables respuesta.

Balance energético. El consumo de energía bruta (CEB) de cada animal se determinó por la diferencia entre la cantidad de energía bruta (EB) ofrecida y rechazada. El consumo de energía digestible (CED) se obtuvo por la diferencia entre el CEB y las pérdidas de energía a través de las heces. El consumo de energía metabolizable (CEM) se determinó por la diferencia entre el CED y las pérdidas energéticas a través de la orina y el CH₄ cuantificado por calorimetría. La pérdida energética a través del CH₄ se estableció en 9,45 kcal/L (Nkrumah et al., 2006). El consumo de energía neta (CEN),

correspondiente a la energía retenida (ER), se obtuvo por la diferencia entre el CEM y la PC de los animales. La producción de CH₄ y de calor se expresó por kg de MS consumido en la cámara, extrapolando los valores obtenidos al valor medio de consumo de materia seca (CMS) obtenido en la prueba de digestibilidad. Los resultados de balance energético se expresaron en kcal/día y kcal/kg PCV^{0,75}/día. El PCV correspondió al peso promedio (peso inicial+peso final/2) en cada nivel de alimentación.

Requerimiento de energía neta de mantenimiento (EN_m). Se expresó en kcal/kg PCV^{0,75}/día y se determinó a partir de tres aproximaciones: 1) El valor de PCay6, extrapolado a 24 horas (PCay24 ajustado); 2) A partir del intercambio respiratorio durante las 24 horas de ayuno (PCay24); 3) Desde modelos de regresión lineal entre el logaritmo de la PC (Log PC) (y) y el CEM (x) (kcal/kg PCV^{0,75}/día), $\text{Log PC} = a + b \cdot \text{CEM}$, medidos en la cámara respirométrica a niveles de alimentación *ad libitum* y restricto. El requerimiento de EN_m correspondió al antilogaritmo del intercepto, según descrito por Lofgreen y Garrett (1968).

Consumo de energía metabolizable para mantenimiento (CEM_m). El CEM_m se determinó por iteración, desde las ecuaciones de regresión lineal previamente obtenidas, en el punto donde la PC igualó el CEM (kcal/kg PCV^{0,75}) (Chizzotti et al., 2008; Lofgreen y Garrett, 1968; Tedeschi et al., 2002).

Consumo de materia seca para mantenimiento (CMS_m). La cantidad de materia seca requerida (g/kg PCV^{0,75}) para cubrir la exigencia de mantenimiento del animal (CMS_m) correspondió al CEM_m (kcal/kg PCV^{0,75}) dividido por la concentración de energía metabolizable (EM) de la ración (kcal/kg MS) hallada durante la prueba de balance al nivel de alimentación restricto.

Densidad energética del alimento para el mantenimiento (EN_m/kg MS). La exigencia de EN_m se dividió por el CMS_m para estimar la densidad energética del alimento en términos de EN_m/kg MS.

Eficiencia de utilización de la EM para mantenimiento (k_m). La eficiencia de utilización de la EM para mantenimiento se calculó como la relación entre las exigencias (kcal/kg PCV^{0,75}) de EN_m/EM_m , donde EM_m corresponde a la EM para mantenimiento.

Requerimiento de energía neta de ganancia (EN_g). El requerimiento de EN_g (kcal/kg PCV^{0,75}/día) se determinó a partir de tres aproximaciones: 1) A partir de la diferencia entre el CEM y la PC determinadas al nivel de alimentación *ad libitum*; 2) Desde la ecuación exponencial: $Req\ EN_g = aX^b$, donde a y b correspondieron al antilogaritmo del intercepto y la pendiente de la regresión lineal entre el Log₁₀ de la GPV (kg) (x) y el Log₁₀ de la ER (kcal/kg PCV^{0,75}/día) (y) de las diez unidades experimentales (Lofgreen y Garrett, 1968); 3) Desde la ecuación parabólica $Req\ EN_g = (b*z) + (c*z^2)$, donde b y c se obtuvieron de la relación entre la GPV, expresada en kg (x), y la ER, expresada en kcal/kg PCV^{0,75}/día (y), de las diez unidades experimentales (Lofgreen y Garrett, 1968). En las últimas dos aproximaciones, la ER fue calculada por substracción de la PC del CEM registrado en la cámara respirométrica ($ER = CEM - PC$) al nivel de alimentación *ad libitum*.

Densidad energética del alimento para la ganancia de peso ($EN_g/kg\ MS$). La densidad energética de la ración en términos de $EN_g/kg\ MS$ se estimó desde la prueba diferencial descrita por Lofgreen y Garrett (1968), que establece la retención de energía a dos diferentes niveles de alimentación. El consumo de materia seca (CMS) *ad libitum* se consideró el primer nivel de alimentación y correspondió al valor de ER determinado en la cámara respirométrica. El CMS del alimento que representó el equilibrio energético (CMS_m), como previamente estimado, constituyó el segundo nivel de alimentación y correspondió a $ER = 0$. La $EN_g/kg\ MS$ se obtuvo de la relación entre la ER (kcal/kg PCV^{0,75}) y la diferencia entre el promedio de CMS *ad libitum* (g/kg PCV^{0,75}) y el CMS_m (g/kg PCV^{0,75}).

Eficiencia de utilización de la EM para la ganancia de peso (k_g). La eficiencia parcial de uso de la EM para la ganancia de peso (k_g) se calculó como la relación entre las exigencias (kcal/kg PCV^{0,75}) de EN_g/EM_g donde EM_g corresponde a la EM de ganancia,

resultante de la diferencia entre CEM *ad libitum* - CEM_m. El CEM *ad libitum* correspondió al producto del CMS medio y la concentración de EM del alimento registrada durante ese nivel de alimentación.

Análisis de laboratorio

Muestras del alimento ofertado, las sobras, las heces y la orina se pre-secaron en estufa de ventilación forzada (60°C/72 h). Las muestras secas se procesaron en un molino estacionario Thomas–Wiley con tamiz de 1 mm (Arthur M. Thomas, Philadelphia, PA, USA). En el alimento ofertado se analizó MS, proteína bruta (PB), cenizas (MI) (AOAC, 2005; AOAC, 2007), fibra detergente neutra (FDN) (Van Soest et al., 1991) y EB (ISO, 1998). En las sobras, las heces y la orina solamente se analizó MS y EB.

Análisis estadístico.

Los requerimientos de energía (EN_m, EN_g, EM_m) y las eficiencias de utilización de la EM (k_m y k_g) obtenidas a partir de las diferentes aproximaciones metodológicas usadas para su determinación se analizaron a través de un modelo mixto. El efecto fijo correspondió a las diferentes aproximaciones usadas para la determinación de los requerimientos, y el efecto aleatorio, al animal.

Igualmente, se realizó análisis de estadística descriptiva, a saber, media y desviación estándar sobre las variables respuesta.

Los datos se analizaron a través del programa estadístico SAS (2019).

Resultados

Peso corporal vacío.

En la Tabla 2 se muestran las ecuaciones de regresión que permiten estimar el PCV de los animales a partir su PV al nivel de alimentación *ad libitum* y restricto. Los valores de R² superan el 95%.

Tabla 2. Ecuaciones de regresión relacionando el peso corporal vacío (PCV) y peso vivo (PV) de los animales al nivel de alimentación *ad libitum* y restricto.

Periodo	Ecuación	R ²
<i>Ad libitum</i>	PCV= -41,51 + 1,0575 *PV	0,96
Restringido	PCV= -22,87 + 1,0168*PV	0,95

Desempeño animal.

El PV, el CMS y la ganancia de peso al nivel de alimentación *ad libitum* y restricto se presentan en la Tabla 3. Se observa pérdida de peso durante el nivel de alimentación restricto.

Balance energético.

El balance energético al nivel de alimentación *ad libitum* y restricto se presenta en la Tabla 4. Se observa que la eficiencia de utilización de la energía fue superior al nivel de alimentación *ad libitum*.

En la Figura 2 se muestran las relaciones que se presentan entre el consumo de diferentes tipos de energía, conforme se descuentan las pérdidas asociadas con su digestión y metabolismo. Las mejores relaciones se presentan entre el consumo de CEM vs. CED, CEM vs. CEB y CED vs. CEB (Mcal/día) todas con un R² superior al 93%. La relación entre ER vs. CEB (Mcal/día) presenta un menor R².

En la Tabla 5 se presenta el intercambio gaseoso registrado en la cámara respirométrica durante los tres niveles de alimentación. Se aprecia que el consumo de O₂ y la producción de CO₂, CH₄ y de calor se reduce con disminución en el nivel de alimentación. En los niveles de alimentación *ad libitum* y restricto el coeficiente respiratorio (CR), correspondiente a la relación producción de CO₂/ consumo de O₂, es cercano a 1.

Tabla 3. Peso vivo, consumo de materia seca y desempeño de bovinos mestizos al nivel de alimentación *ad libitum* y restricto.

Ítem	Nivel de alimentación			
	<i>Ad libitum</i>		Restringido	
	Inicial	Final	Inicial	Final
<i>Peso vivo y ganancia de peso¹</i>				
PV (kg)	240,7 ± 23,1	288,8 ± 19,8	304,8 ± 21,5	302,1 ± 21,0
PCV (kg)	213,3 ± 21,6	263,9 ± 20,9	288,2 ± 22,0	284,3 ± 21,3
PCV/PV	0,89 ± 0,03	0,91 ± 0,01	0,95 ± 0,01	0,94 ± 0,01
PCV ^{0,75} (kg)	61,1 ± 4,4	65,4 ± 3,9	69,91 ± 4,0	69,2 ± 3,9
GDP (g/día)	943,1 ± 190,9		-66,7 ± 221,2	
GDPV (g/día)	992,2 ± 141,2		-97,0 ± 207,6	
<i>Consumo de materia seca²</i>				
CMS _h (kg/día)	4,80 ± 1,2		3,10 ± 0,14	
CMS _h /CMSt (%)	71,53 ± 7,26		72,03 ± 0,46	
CMS _s (kg/día)	1,66 ± 0,36		1,20 ± 0,06	
CMSt (kg/día)	6,46 ± 1,21		4,3 ± 0,20	
CMSt (g/kg PCV ^{0,75} /día)	98,8 ± 17,38		62,17 ± 1,27	
CMSt (%PCV)	2,70 ± 0,43		1,51 ± 0,05	

¹PV, peso vivo; PCV, peso corporal vacío; PCV^{0,75}, peso corporal vacío metabólico; GDP, ganancia diaria de peso; GDPV, ganancia diaria de peso vacío.

² CMS_h, consumo de materia seca de heno; CMS_s, consumo de materia seca de suplemento; CMSt, consumo de materia seca total.

Los valores corresponden a la media±desviación estándar

Requerimiento y eficiencia de utilización de la energía

En la Tabla 6 se observa que hubo diferencia estadística ($p < 0,05$) en el requerimiento de EN_m, la densidad energética del alimento expresada en EN_m/kg MS y los k_m determinados desde la PCay24 y la PCay24 ajustado.

Tabla 4. Balance energético de animales mestizos al nivel de alimentación *ad libitum* y restricto

Ítem	Nivel de alimentación	
	<i>Ad libitum</i>	Restringido
<i>Balance energético (Mcal/día)¹</i>		
EB	27,97 ± 5,28	18,75 ± 0,83
Energía fecal ⁵	7,02 ± 1,45	5,91 ± 1,12
ED	20,95 ± 5,37	12,84 ± 1,29
Energía en orina ⁶	0,64 ± 0,91	0,59 ± 0,26
%EB	2,35 ± 0,73	3,13 ± 1,35
%ED	3,29 ± 1,09	4,62 ± 2,18
Energía en metano	1,62 ± 0,37	1,21 ± 0,12
%EB (Ym%) ²	5,78 ± 0,65	6,48 ± 0,7
%ED	7,86 ± 0,98	9,55 ± 1,45
EM	18,69 ± 5,01	11,04 ± 1,31
Producción de calor	10,96 ± 2,35	8,59 ± 1,07
%EB	39,14 ± 3,96	46,04 ± 6,93
%ED	53,19 ± 5,94	67,94 ± 13,18
%EM	59,95 ± 7,67	79,28 ± 15,82
ER	7,73 ± 3,11	2,45 ± 1,93
<i>Eficiencia de utilización de la energía (%)</i>		
ED/EB (%) ³	74,03 ± 7,2	68,47 ± 5,97
EM/EB (%) ⁴	65,90 ± 7,29	58,86 ± 6,40
EM/ED (%)	88,91 ± 1,83	85,83 ± 2,46
ER/EB (%)	26,76 ± 7,28	12,82 ± 9,87
ER/EM (%)	40,05 ± 7,67	20,72 ± 15,82
<i>Balance energético (Kcal/Kg PCV,⁷⁵/día)</i>		
EB	427,52 ± 76,41	270,82 ± 5,54
ED	319,76 ± 78,02	185,54 ± 18,11
EM	285,26 ± 73,28	159,56 ± 19,07
ER	118,09 ± 46,97	34,78 ± 26,81
<i>Densidad energética de las raciones (Mcal/kg MS)</i>		
EB	4,32 ± 0,03	4,36 ± 0,00
ED	3,20 ± 0,31	2,98 ± 0,26
EM	2,85 ± 0,32	2,56 ± 0,28
ER	1,16 ± 0,32	0,56 ± 0,43

¹ EB, energía bruta; ED, energía digestible; EM, energía metabolizable; ER, energía retenida.

² Ym: Factor de partición

³ Digestibilidad de la energía

⁴ Metabolicidad de la energía

⁵ Valores corresponden a una producción de MS fecal de 8,5 y 6 kg (MS en heces: 20,6 y 21,5%), y densidad energética promedio de 4,1 y 4,7 Mcal/Kg MS para el nivel de alimentación *ad libitum* y restricto.

⁶ Valores corresponden a un volumen urinario de 5,2 y 5,6 L (MS en orina: 5,5 y 6,0%) y densidad energética de 2,3 y 1,8 Mcal/Kg MS para el nivel de alimentación *ad libitum* y restricto, respectivamente.

Los valores corresponden a la media ± desviación estándar

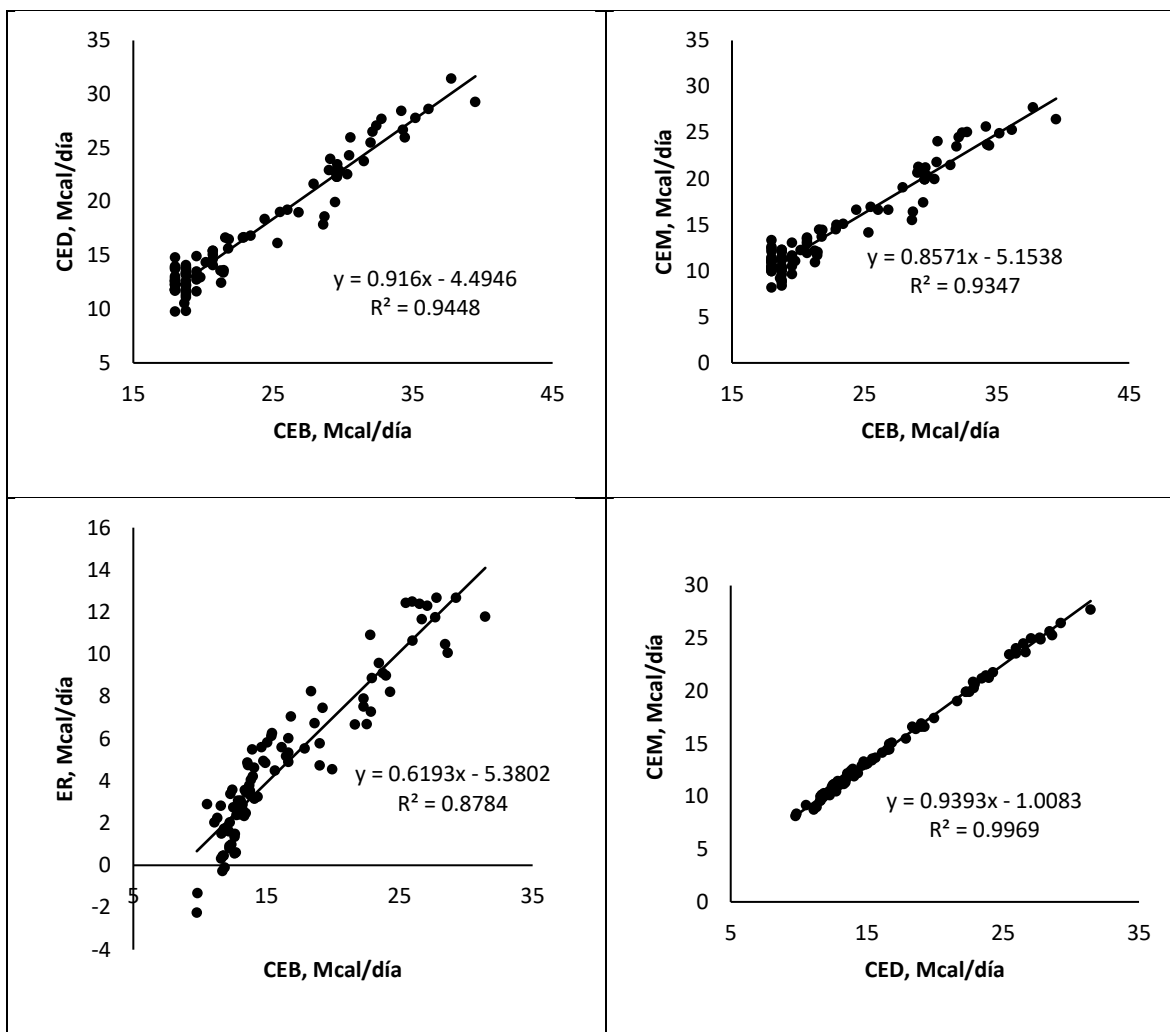


Figura 2. Relación entre el consumo de diferentes tipos de energía (Mcal/día), conforme la partición energética al nivel de alimentación *ad libitum* y restricto (cada punto corresponde a un dato por animal, en total 5 datos por animal).

En la Tabla 7 se observan diferencias ($p < 0,05$) en el requerimiento de EN_g , la densidad energética del alimento expresada en EN_g/kg MS y el k_g determinados desde la ecuación parabólica, respecto las restantes metodologías.

Tabla 5. Intercambio gaseoso y producción de calor en animales mestizos a diferentes niveles de alimentación

Ítem ¹	Nivel de alimentación			
	<i>Ad libitum</i>	Restringido	Ayuno ²	Ayuno ajustado ³
CO ₂ (L/día)	2150,7 ± 472,0	1632,6 ± 77,2	806,0 ± 128,0	797,5 ± 113,3
CO ₂ (L/kg PCV ^{0,75})	32,8 ± 6,7	23,6 ± 1,4	11,6 ± 1,7	11,5 ± 1,2
O ₂ (L/día)	2202,1 ± 470,2	1748,1 ± 264,6	1447,3 ± 265,4	1192,5 ± 234,5
O ₂ (L/kg PCV ^{0,75})	33,6 ± 6,7	25,4 ± 4,6	21,0 ± 3,9	17,2 ± 3,1
CH ₄ (L/día)	171,42 ± 39,4	128,2 ± 12,4	-4,0 ± 9,4	0,1 ± 11,2
CH ₄ (L/kg PCV ^{0,75})	2,6 ± 0,6	1,9 ± 0,2	-0,1 ± 0,1	0,0 ± 0,2
PC (kcal/día)	10957,4 ± 2354,2	8592,8 ± 1069	6564,3 ± 1156,9	5567,3 ± 1010,1
PC (kcal/kg PCV ^{0,75})	167,2 ± 33,4	124,8 ± 19,4	95,0 ± 16,9	80,4 ± 13,0
CR	0,98 ± 0,0	0,95 ± 0,2	0,6 ± 0,1	0,7 ± 0,1

O₂, consumo de oxígeno; CO₂, producción de dióxido de carbono; CH₄, producción de metano, PC, producción de calor, CR, coeficiente respiratorio (CO₂/O₂).

²Intercambio respiratorio de 22 horas, extrapolada a 24 horas, en ayuno (PCay24).

³Intercambio respiratorio de 6 horas (entre 00:00 y 06:00 horas), extrapolada a 24 horas, en ayuno. (PCay24 ajustado)

Los valores corresponden a la media±desviación estándar

Tabla 6. Requerimiento de energía y eficiencia de utilización de la energía metabolizable para el mantenimiento (k_m) en ganado mestizo.

Ítem	EN _m ⁴	CEM _m ⁵	CMS _m ⁶	EN _m /kg MS ⁷	k _m ⁸
	(kcal/kg PCV ^{0,75} /día)		(g/kg PCV ^{0,75} /día)		
PCay24 ¹	95,01 ± 16,85 a	122,95 ± 19,20	48,61 ± 8,51	1,97 ± 0,28 a	0,77 ± 0,07 a
PCay24 ajustado ²	80,36 ± 12,95 b	107,92 ± 15,33	42,62 ± 6,53	1,90 ± 0,24 b	0,74 ± 0,06 b
<i>Ad libitum</i> vs, Res ³	83,32 ± 19,27 ab	111,38 ± 26,43	44,18 ± 11,71	1,91 ± 0,20 ab	0,75 ± 0,05 ab

¹ Producción de calor derivada del intercambio respiratorio de 22 horas, extrapolada a 24 horas, en ayuno.

² Producción de calor derivada del intercambio respiratorio de 6 horas, extrapolada a 24 horas, en ayuno.

³ Valores obtenidos a partir de regresión lineal entre el consumo de energía metabolizable (CEM) y el logaritmo de la producción de calor (Log₁₀ PC) al nivel de alimentación *ad libitum* y restringido.

⁴ Requerimiento de energía neta de mantenimiento

⁵ Requerimiento de energía metabolizable de mantenimiento

⁶ Consumo de materia seca para el mantenimiento

⁷ Densidad energética del alimento para el mantenimiento (Requerimiento EN_m/CMS_m)

⁸ Eficiencia de utilización de la EM para mantenimiento (Requerimiento EN_m/Requerimiento EM_m)

Los valores corresponden a la media±desviación estándar

a, b Letras diferentes en la misma columna indican diferencia estadística entre las medias (p<0.05)

Tabla 7. Requerimiento de energía y eficiencia de utilización de la energía metabolizable para la ganancia de peso (kg) en ganado mestizo.

Ítem	EN _g ⁴	CEM _g ⁵	CMS _g ⁶	EN _g /g MS ⁷	K _g ⁸
Ecuación	(kcal/kg PCV ^{0.75} /día)		(g/kg PCV ^{0.75} /día)		
ER ¹	104,47 ± 37,9 _a	280,18 ± 28,79	98,31 ± 10,10	1,05 ± 0,30 _a	0,41 ± 0,11 _a
Exponencial ²	98,64 ± 4,42 _a	280,18 ± 28,79	98,31 ± 10,10	1,01 ± 0,13 _a	0,40 ± 0,07 _a
Parabólica ³	206,14 ± 37,02 _b	280,18 ± 28,79	98,31 ± 10,10	2,12 ± 0,46 _b	0,84 ± 0,21 _b

¹ Energía retenida (kcal/kg PCV^{0.75}/día) obtenida por diferencia entre el CEM y la PC

² aX^b , donde a y b corresponden al antilogaritmo del intercepto y la pendiente de la regresión lineal entre el Log₁₀GPV (x) y el Log₁₀ER (kcal/kg PCV^{0.75}/día) (y).

³ $(b*z)+(c*z^2)$, donde b y c se obtienen de la relación entre la GPV (kg) (x) y la ER (kcal/kg PCV^{0.75}/día) (y).

⁴ Requerimiento de energía neta para la ganancia de peso

⁵ Requerimiento de energía metabolizable para la ganancia de peso

⁶ Consumo de materia seca para la ganancia de peso

⁷ Densidad energética del alimento para la ganancia de peso (Requerimiento EN_g/CMS_g)

⁸ Eficiencia de utilización de la EM para la ganancia de peso (Requerimiento EN_g/Requerimiento EM_g)

Los valores corresponden a la media ± desviación estándar

a, b Letras diferentes en la misma columna indican diferencia estadística entre las medias (p<0.05)

En la Figura 3 se observa la relación lineal entre la ER (Mcal/PCV^{0.75}/día) y el CEM (Mcal/kg PCV^{0.75}/día). El R² es de 0,89.

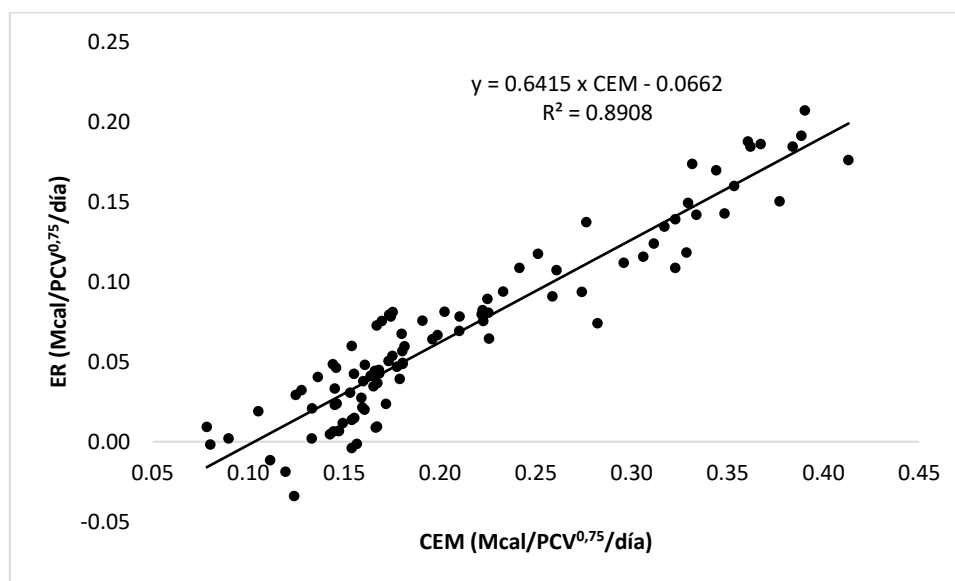


Figura 3. Relación entre el consumo de energía metabolizable (CEM, Mcal/kg PCV^{0.75}/día) y la energía retenida (ER, Mcal/PCV^{0.75}/día) (cada punto corresponde a un dato por animal, en total 5 datos/animal/nivel de alimentación. Nivel *ad libitum* y restricto).

Discusión

Peso corporal vacío.

Las ecuaciones que se obtuvieron para predecir el PCV desde el PV (Tabla 2) tuvieron buen ajuste ($R^2 > 0,95\%$). El PCV predicho por las ecuaciones correspondió al 90 y 94% del PV para los niveles de alimentación *ad libitum* y restricto. Estos valores son coherentes con los indicados por Owens et al. (1995), que varían entre 85 y 95%, el BR-CORTE (Valadares et al., 2006) y el NRC (2000), que reportan valores de 89,6 y 89,1%, respectivamente. Chizzotti et al., (2008), a través de un meta análisis en ganado mestizo, propusieron la ecuación $PCV = -15,6 + 0,928 \times PV$. Utilizando esta ecuación con los datos del presente trabajo, la relación PCV/PV promedio para los dos niveles de alimentación sería 0,873, menor al observado. La menor relación PCV/PV obtenida *ad libitum*, no sólo obedeció al mayor CMS, sino también a la menor edad de los animales. Un mayor CMS aumenta el tamaño y la actividad de los órganos viscerales, entre ellos el tracto gastrointestinal (Ferrell y Jenkins, 1985). Según Putrino et al. (2006), biológicamente, un animal que alcanza la madurez presenta disminución en el peso y en la proporción de los órganos viscerales, especialmente el hígado y el tracto digestivo. De acuerdo con los resultados del presente trabajo, a medida que se aumentó el PV, los animales presentaron menor tamaño del tracto gastrointestinal y consecuentemente, menor contenido de digesta, acarreado mayor relación PCV/PV.

Desempeño animal.

En los ambientes tropicales la utilización del cruzamiento de ganado *Bos taurus* x *Bos indicus* es útil para mejorar los índices productivos. El primer y mayor beneficio conocido del cruzamiento es el vigor híbrido (heterosis), mientras que el segundo beneficio es el efecto complementario de los rasgos positivos de las diferentes razas (Varlamoff et al., 2011). Las ganancias de peso observadas durante el período de alimentación *ad libitum* (943,1 g/día) superan el reporte de Arango et al. (2000) (402,58 g/día) en ganado Brangus en un hato comercial de producción de carne en Colombia.

Durante este mismo período, la conversión alimenticia (kg MS consumida/kg peso ganado) fue de 6,85, por debajo de los valores descritos por Shirley et al. (2006) (7,0-7,8) en ganado Brangus con un PV medio de 350,4 kg. Los valores obtenidos son consistentes con el CMS registrado (2,4% PV), que se ubica en el rango informado por Sanson y Hixon (1999) para ganado de carne alimentado con heno de buena calidad (2,2-3,3% PV) y en el límite superior del reporte de Shirley et al. (2006) (2,0-2,4% PV).

Tomando en consideración la densidad energética de la dieta durante los períodos de alimentación *ad libitum* y restringida (2,85 y 2,56 Mcal EM/kg MS; Tabla 4), el CMSt, el $PCV^{0,75}$ medio durante los mismos períodos (Tabla 3) y los requerimientos de EM_m obtenidos durante el presente trabajo (media 109,7 Kcal/ $PCV^{0,75}$ /día; Tabla 6), se concluye que los niveles de alimentación (L) durante los respectivos períodos correspondieron a 2,6 y 1,4. Cuando el mismo ejercicio se realiza con los valores de EN_m , a saber una densidad energética de 1,90 Mcal EN_m /kg MS y un requerimiento de 81,84 Kcal $EN_m/PCV^{0,75}$ /día (Tabla 6), se obtienen niveles de alimentación (L) para los períodos de alimentación *ad libitum* y restringido de 2,4 y 1,4, respectivamente.

Durante la alimentación restringida se observó una ligera pérdida de peso (-97 g/día), no obstante, la desviación estándar que caracteriza esta variable, observada en el presente trabajo (Tabla 3) y en la literatura (Martínez et al., 2009) permite concluir que el nivel de alimentación previamente descrito (1,4 veces los requerimientos de mantenimiento) permitió alcanzar el equilibrio energético. El aumento en el consumo energético puede ser explicado por las bajas temperaturas que caracterizan la zona de estudio, incrementando la demanda energética por concepto de termorregulación.

El equilibrio energético aquí descrito contrasta con el balance energético positivo que se describe en la Tabla 4. Debe considerarse que el cambio de peso corresponde a un período de 40 días, mientras que la determinación del balance energético se realizó durante un intervalo menor (5 días para colecta fecal y urinaria y 3 días para cuantificación de calor y de metano). Finalmente, las variables cuantificadas en la cámara respirométrica estuvieron exentas del estrés por frío, ya que la temperatura fijada generó confort en los animales.

Balance energético.

Contrario a lo descrito en la literatura (Colucci et al., 1982), la digestibilidad y la metabolicidad de la energía disminuyeron con el menor nivel de alimentación (Tabla 4). Era de esperar, que un menor CMS disminuyera la tasa de pasaje, conduciendo a un mayor tiempo de retención del alimento en el tracto gastrointestinal y, con ello, a un aumento en la digestibilidad. A su vez, una mayor digestibilidad debería haber resultado en mayor metabolicidad. Considerando que la dieta fue la misma y que la relación CMS_h/CMS_s fue similar entre ambos niveles de alimentación, la menor digestibilidad a nivel restringido es difícil de explicar.

Cuando se compara la relación ED/EM entre ambos niveles de alimentación, se observa que las pérdidas por CH₄ y orina fueron superiores al nivel restringido. La mayor producción de CH₄ a un menor CMS coincide con lo descrito en la literatura (Bell y Eckard, 2012), ya que el menor CMS reduce la tasa de pasaje del alimento por el rumen y con ello se favorece su fermentación. Este concepto es soportado a partir de la relación producción de CH₄ (L/día) (Tabla 5) y CMS (kg/día) (Tabla 3). Esta relación fue de 26,5 y 29,8 L/kg MS para los niveles *ad libitum* y restringido, respectivamente.

Con independencia de las diferencias que se presentan en la relación entre los diferentes tipos de energía en ambos niveles de alimentación, el análisis conjunto de los datos muestra una buena relación entre el CED/CEB, CEM/CEB, y especialmente, entre el CEM/CED (Figura 2), como lo describe la literatura, lo cual hace que sea factible predecir la EM a partir de la ED. La relación EM/ED depende de muchos factores como el tipo de dieta, el crecimiento microbiano en el rumen, la producción de CH₄, la utilización de la proteína metabolizable y la excreción de diferentes compuestos energéticos en la orina (Marcondes et al., 2010). En el presente estudio, la relación EM/ED en promedio para los dos niveles de alimentación fue de 0,87, superior a los reportes del NRC (2000), CSIRO (1990) y ARC (1980), de 0,80, 0,81 y 0,82, respectivamente. Sin embargo, la AFRC (1993) propone un rango de valores más

amplio, desde 0,81 a 0,86, mientras Posada et al. (2017) reportaron valores en el límite superior, entre 0,85 y 0,87. Hales et al., (2014), por su parte, encontraron relaciones entre 0,89 y 0,92.

Borges et al. (2016) indican que la relación EM/ED es mayor a 0,82 cuando se calcula teniendo en cuenta el volumen de CH₄ medido en cámaras de respiración, y en tal sentido, otras aproximaciones utilizadas para estimar la producción de este gas pueden conducir a su sobreestimación, subestimando la relación EM/ED.

Las pérdidas de EB en forma de CH₄ ($Y_m\%$) presentaron un valor medio para los dos niveles de alimentación de $6,14\% \pm 0,76$, que se encuentra dentro del rango propuesto por Johnson y Ward (1996), entre 5,5–6,5%. Las pérdidas de ED en forma de CH₄ (7,86 y 9,55%) y de orina (3,29 y 4,62%) del presente estudio, para los niveles de alimentación *ad libitum* y restringido, respectivamente, se encuentran dentro del rango propuesto por Van Soest (1994), quien indica que las pérdidas de ED en forma de CH₄ fluctúan entre 5 y 12% y, en forma de orina entre 3 y 5%.

La PC que se muestra en el balance energético, 10,96 y 8,59 Mcal/día al nivel *ad libitum* y restringido (Tabla 4) correspondió a 173,3 y 123,5 kcal/Kg PCV^{0,75}/día, respectivamente. Estos valores coinciden con los reportados por Lofgreen y Garrett (1968) en animales alimentados con 100% de forraje a niveles de alimentación medio y bajo, correspondientemente.

Requerimiento y eficiencia de utilización de la energía.

Cuando se comparan los requerimientos de EN_m (Tabla 6), se aprecia que el valor obtenido a partir de la regresión lineal entre el logaritmo de la producción de calor (PC) (y) y el CEM (kcal/kg PCV^{0,75}/d) a dos niveles de alimentación (*ad libitum* y restringido) fue similar al obtenido por la PCay24 ajustado, en tanto que el valor obtenido a partir de PCay24 superó las dos primeras metodologías. Esto indica que la medición de la PC en ayuno durante períodos más extensos, que no se corresponden con los horarios de menor actividad animal, pueden conducir a la sobreestimación del requerimiento de

EN_m. Durante el ayuno, los animales se muestran inquietos y tienden a cambiar de posición en la cámara respirométrica cuando perciben actividad externa, lo cual explica la mayor PC, que en el presente estudio fue 18,2% superior, respecto 80,36 kcal/kg PCV^{0,75}/día (requerimiento de EN_m según PCay24 ajustado). En el trabajo de Derno et al. (2005), la superioridad en la PC, respecto el valor obtenido entre 00:00 y 06:00 horas, fue en promedio de 6,1%. Susenbeth et al. (2004) reportaron que la actividad (pararse y acostarse) dentro de la cámara, sin oferta de alimento, aumentó la PC en 3,35 kcal/kg PV/día. Estas variaciones dependen del tamaño de la cámara, adaptación y comportamiento animal. La mayor PC obtenida en el presente estudio por la metodología PCay24, respecto PCay24 ajustado, es consistente con el mayor intercambio gaseoso que se muestra en la Tabla 5. El consumo de O₂ y la producción de CO₂ fue 21,4 y 1,06% superior en PCay24, respecto PCay24 ajustado. La producción de O₂ es la que más determina la PC.

El valor de EN_m más ampliamente utilizado es el propuesto por Lofgreen y Garrett (1968) y adoptado por el NRC (2000), correspondiente a 77 kcal/PCV^{0,75}, con un intervalo de confianza que fluctúa entre 72 y 82 kcal/PCV^{0,75}, límite superior que es comparable con el requerimiento medio obtenido en este trabajo (81,84 Kcal EN_m/PCV^{0,75}/día para las metodologías basadas en PCay24 ajustado y regresión; Tabla 6). De otra parte, este valor va en contravía del concepto enunciado por el NRC (2000), modelo que le atribuye un requerimiento menor a 77 kcal/PCV^{0,75} a los animales cebuínos y mestizos. A pesar de que el NRC (2000) indica que el *Bos indicus* y sus cruces tienen menor requerimiento de EN_m, ello es controversial conforme los reportes descritos en la literatura. En varios estudios que comparan la exigencia de EN_m en *Bos indicus* vs. *Bos taurus* no encontraron diferencias entre ambos (Ferrell y Jenkins, 1998; Freitas et al., 2006; Siqueira et al., 2007), e incluso el CNCPS (Fox et al., 2004) no reconoce diferencias entre las razas Nellore y Limousin. Posada et al. (2017), trabajando con cebuínos, reportaron valores entre 84,1 y 115,9 kcal/PCV^{0,75} cuando determinados por regresión. En el mismo estudio, la cuantificación de la PC en cámaras de respiración entre 48 y 72 horas de ayuno generó valores entre 83,2 y 123,6

kcal/PCV^{0,75}. En animales mestizos, se han reportado valores entre 74,6 y 108 (Ferreira, 2014), 88 y 95,6 (Silva, 2016) y, 83,9 y 96,7 (Pancoti, 2015) kcal/PCV^{0,75}. En el sistema BR-CORTE (2016) (Marcondes et al., 2016) tampoco se evidenció ninguna diferencia en cuanto a los requerimientos de EN_m considerando animales cruzados y cebuínos de diferentes clases sexuales.

La alta variabilidad en las necesidades de mantenimiento de los animales está ligada a factores como el nivel de alimentación, la ganancia de peso, las condiciones medioambientales y el tamaño y actividad de los órganos; además, de la metodología utilizada para su determinación, sacrificio comparativo ó respirometría. De acuerdo con el procedimiento experimental llevado a cabo para la determinación del requerimiento de EN_m, en esta discusión no se abordará el efecto del nivel de alimentación, que determina las ganancias de peso y la actividad y tamaño de los órganos (Johnson et al., 1990; Garret, 1980; Dicostanzo et al., 1990). La metodología de regresión hace uso de la PC y ésta se cuantificó al nivel restricto después del período mínimo recomendado por la literatura para reducir la tasa metabólica. La PC de ayuno también se valoró superado este período. Ahora, durante el ayuno el animal moviliza reservas corporales y procesos como glucogenólisis, lipólisis y proteólisis ocurren, incrementando consecuentemente el consumo de O₂, la producción de CO₂ y la PC, que representa el insumo para estimar los requerimientos de EN_m. Después de una noche de ayuno, hasta tres cuartas partes de la glucosa en plasma se deriva del glucógeno hepático (Ferranini, 1988). La hidrólisis del glucógeno aporta 1,11 g de glucosa, por consiguiente, la oxidación del glucógeno requiere 0,829 L de O₂ por g en comparación con 0,746 L por g para la oxidación de la glucosa. Esta quizá sea una de las razones por las cuales la determinación de los requerimientos de EN_m a partir de la PC en ayuno origina valores altos, como lo describe Borges et al. (2016). Con base en estos conceptos y el superior intercambio respiratorio valorado durante 24 h de ayuno (Tabla 5), se propone la estimación de los requerimientos de EN_m conforme la metodología PCay24 ajustado.

Si bien, la anterior discusión y los reportes de la literatura toman como referente el valor de 77 kcal/kg PCV^{0,75}/día, Old et al. (2018) sostienen que este valor es dinámico y que es necesario modificar el uso de coeficientes de mantenimiento relativamente fijos, así como las aproximaciones matemáticas de los procesos metabólicos buscando mayor consistencia con la biología animal y las leyes de la termodinámica. Old et al. (2018), al probar la aproximación lineal $\text{Log PC total} = (\text{Log PC a CEM}=0) + b \times \text{CEM}$ en tres diferentes bases de datos, incluyendo la de Lofgreen y Garrett (1968), encontraron que solamente en esta última el Log de la PC a CEM=0 fue 77 kcal/Kg PCV^{0,75}. El Log PC total predicho no fue igual al observado para las dos restantes bases de datos cuando el intercepto se fijó en Log (77 kcal/kg PCV^{0,75}), indicando que el uso de ese valor como una estimativa de los requerimientos de EN_m (PC a CEM=0) carece de aplicabilidad global. Además, en el anterior modelo de regresión, se asume que las estimativas de los parámetros son estables en todo el rango de datos; es decir, que las estimativas de PC a CEM=0 y *b* son únicas. Sin embargo, la evaluación del modelo en ganado consumiendo 100% forraje resultó en superior estimación de CEM_m (ER=0) vs. el grupo con 2-40% de forraje. Esto es, Lofgreen y Garrett (1968) asumieron que 77 Kcal EN_m/kg PCV^{0,75}/día fue el parámetro correcto y único para todos los tipos de ganado y CEM, con lo cual el parámetro *b* también debería ser estable. Sin embargo, la falta de estabilidad en el parámetro *b* fue observada por Old et al. (2018) en las tres bases de datos, con lo cual los autores sostienen que la relación entre el predictor (CEM) y la variable respuesta (Log PC total) no es lineal, lo que representa una clara indicación de que la EM_m puede ser variable. La falta de estabilidad en PC a CEM=0 (requerimiento de EN_m) y EM_m permite concluir que *k_m* es dinámico y que los requerimientos de EN_m y EM_m varían con el estado metabólico, el nivel de alimentación y el tipo de dieta.

El hecho de que los animales *Bos indicus* requieran menos EN_m que los *Bos taurus*, como descrito por el NRC (2000), no necesariamente se debe a su fisiología, sino que puede obedecer a una mayor eficiencia en la utilización de la EM para el mantenimiento (*k_m*), como indicado por Borges et al. (2016). Determinar los requerimientos de EM_m es

necesario porque los animales en producción no están en ayuno y hay un costo energético asociado con el CMS. Los requerimientos de EM_m obtenidos en el presente estudio, tomando como referencia los requerimientos de EN_m determinados por regresión y por la PCay24 ajustado se encuentran dentro del rango descrito por Derno et al. (2005), entre 88,43 y 148,18 kcal/kgPCV^{0,75}/día, son ligeramente inferiores al valor reportado por Chizzotti *et al.* (2008) en ganado Nellore x *Bos taurus*, 116,0 kcal/kgPCV^{0,75}/día, pero superiores al valor informado por el BR-CORTE (2016) (Marcondes et al., 2016) para animales cruzados pesando 400 kg y ganando 0,5 y 1,0 kg/día, 101,0 y 106,8 kcal/PCV^{0,75}, respectivamente. Finalmente, los valores del presente estudio son inferiores a las estimaciones realizadas por Gomes et al. (2017), 153,1 y 124,5 kcal/kgPCV^{0,75}/día en animales Angus y Nellore, respectivamente.

Se destaca la superioridad obtenida en k_m respecto el reporte del NRC (1984), entre 0,576 y 0,686 para dietas con una densidad energética entre 2,0 y 3,2 Mcal EM/kg MS. Ello se puede deber al mayor requerimiento de EN_m y/o al menor requerimiento de EM_m . Los mayores valores de k_m obtenidos en el presente trabajo posiblemente obedecen a la inclusión de suplemento en la dieta, en virtud del aumento en la metabolicidad, la reducción en la rumia y en el incremento calórico (Posada et al., 2011) y, a la menor actividad asociada con la búsqueda del alimento, en virtud de la estabulación de los animales. De acuerdo con Church (1993), la actividad digestiva correspondiente a las actividades de comer y rumiar puede representar el 20-25% del incremento calórico. Los argumentos previamente enunciados encuentran soporte en las características de la dieta y en el sistema de crianza. En el primer caso, considerando la metabolicidad y el valor de EM de la dieta consumida al nivel restringido (0,5886 y 10,71 Mj/kg MS; Tabla 4), se obtienen estimativas de k_m de 0,714 y 0,709, de acuerdo con las ecuaciones propuestas por los sistemas CSIRO (2007) y AFRC (1993), valores próximos a los obtenidos con la metodología clásica (EN_m/EM_m). Con respecto al sistema de crianza, el BR-CORTE (Marcondes et al., 2016) demostró su influencia sobre la estimativa de EM_m y, por ende, sobre el k_m . Los autores reportaron valores de EM_m para animales en

pastoreo y confinamiento de 128 y 118 kcal/kg PCV^{0,75}/día, respectivamente, lo que indica que los animales confinados pueden presentar un mayor k_m .

El k_m es un valor que debe ser analizado con moderación, ya que contiene los errores de la estimación de los requerimientos de EN_m , que dependen altamente de la actividad, el nivel de alimentación, la ganancia de peso vacío y el k_g (animales con un mayor recambio proteico tienen mayores requerimientos de EN_m) (Borges et al., 2016). De acuerdo con Old et al. (2018), la eficiencia de los procesos biológicos asociados con el mantenimiento debe ser similar a la eficiencia de síntesis de ATP y esta última a su vez varía entre tejidos y depende del sustrato oxidado. Así, del 37,6 al 53,5% de la energía de la glucosa es convertida en ATP, mientras que la oxidación del acetato es menos eficiente y solamente del 32,2 al 45,8% de la energía del acetato se convierte en ATP. De otra parte, los autores sostienen que la eficiencia con la cual la EM se utiliza para el mantenimiento y la ganancia de peso requiere que el modelo caracterice ambos procesos simultáneamente, proponiendo para tal efecto una representación matemática que resultó en k_m y k_g de 0,42 y 0,67, respectivamente. En el presente trabajo, no obstante, $k_m > k_g$, lo cual fue consistente con el enfoque lineal utilizado para el análisis de los datos.

Los valores de EN_g (206,1 kcal/kgPCV^{0,75}) y k_g (0,84) hallados a través de la ecuación parabólica son muy altos y no tienen sentido fisiológico, por ende, en el presente estudio no se recomienda su utilización. Los requerimientos de EN_g dependen de la proporción de grasa y proteína en el tejido depositado, valores que no son medidos bajo la metodología de respirometría. Lo que determina la composición de la ganancia no es el peso corporal absoluto del animal, sino su relación con el peso a la madurez. Cuanto más proximidad existe entre el peso actual respecto el peso a la madurez, mayor es la deposición de grasa en relación a la de proteína, y por lo tanto, se aumentan los requerimientos de energía para la ganancia de peso. De otra parte, la deposición de grasa es más eficiente que la de proteína, con valores de 0,75 y 0,45 (CSIRO, 2007) y 0,79 y 0,34 (Chizzotti et al., 2008), respectivamente.

El k_g hallado cuando los requerimientos se calcularon a través de la ecuación exponencial y por la diferencia CEM-PC se encuentran dentro del rango descrito en la literatura, entre 0,26 y 0,49 (Moraes et al., 2009; Chizzotti et al., 2008; Freitas et al., 2000; Valadares Filho et al., 2006; Tedeschi et al., 2002; Véras et al., 2001). Sin embargo, la mayoría de valores están ligeramente por debajo de 0,4, similares a los del presente estudio.

Con base en los valores encontrados en el presente estudio se puede inferir que un animal de aproximadamente 300 kg PV, ganando 1 kg de PCV, requiere 6,7 o 7,1 Mcal EN_g /día con base en los resultados obtenidos con la ecuación exponencial y por la diferencia CEM-PC, respectivamente. Bajo las mismas condiciones mencionadas de PV y GPCV, Silva et al. (2012) estimaron un requerimiento de 3,75 Mcal EN_g /día para ganado Nellore, mientras que Chizzotti et al. (2008) informaron un requerimiento de 3,4 Mcal/día para ganado mestizo (*B. taurus* x *B. indicus*). En el NRC (2000) se sugiere 3,68 Mcal/día para ganado Angus. Valores muy similares (3,42 Mcal/día) también se encontraron utilizando la ecuación propuesta por Prados et al., 2015 en ganado $\frac{3}{4}$ cebu x $\frac{1}{4}$ Holstein. Los anteriores reportes son inferiores a los resultados encontrados en el presente trabajo. Sin embargo, un valor similar se reportó en un comunicado del servicio de extensión de la universidad de Oklahoma, Estados Unidos nombrado "Nutrient requirement of beef cattle". En este comunicado se encontró un valor de EN_g de 6,7 Mcal/día tomando como referencia un animal de 600 Lb (272,2 kg) y una GDP de 2 Lb (907 g). La comparación con los reportes previos permite concluir que la calorimetría indirecta, conforme el protocolo experimental desarrollado, conduce a la sobreestimación de los requerimientos diarios de EN_g (Mcal/día). Los requerimientos de EN_g determinados a través de cámaras de respiración son fluctuantes y dependen de los factores que modifiquen la PC ($ER = EM-PC$). La determinación de la EN_g a través de las cámaras de respiración bajo la metodología implementada en este trabajo no refleja la retención de energía durante periodos prolongados, ya que depende de la medición de la PC durante tres días, siendo éste el principal limitante si se le compara

con la metodología de sacrificio comparativo. En consecuencia, los valores de EN_g son altamente variables y no representan la ER del periodo completo.

La discrepancia entre los valores de ER del presente estudio y aquellos obtenidos por Silva et al (2012) con sacrificio comparativo, también se evidencia cuando se compara la ecuación reportada por los autores relacionando el CEM y la ER (Mcal/PCV^{0,75}/día), y aquella obtenida en el presente estudio (Figura 3). La ecuación de Silva et al. (2012) ($ER = 0,3325 \times CEM - 0,0198$) en animales Nellore pesando $259 \pm 24,9$ kg presenta una menor pendiente, por lo que a medida que aumenta el CEM, la ER estimada por los autores se aleja de la ER predicha con la ecuación del presente trabajo, siendo mayor la predicción con esta última.

Conclusiones

Los requerimientos de EN_m en ganado mestizo fluctuaron entre 80,36 y 83,32 kcal/kg PCV^{0,75} /día, superando el valor propuesto por Lofgreen y Garrett (1968) y adaptado por el NRC (2000), 77 kcal/kg PCV^{0,75} /día, pero coinciden con los valores descritos por otros autores. Igualmente, los resultados contradicen el concepto que los animales mestizos tienen menor requerimiento que los taurinos.

Con respecto a las metodologías evaluadas para su estimación, se recomiendan la regresión entre el Log de la PC y el CEM a dos niveles de alimentación, así como la cuantificación de la PCay24 ajustado.

Los requerimientos de EN_g determinados por calorimetría indirecta, conforme el protocolo experimental desarrollado, no se ajustan a los valores reportados en la literatura. Los datos del presente trabajo permiten inferir que la calorimetría indirecta, como metodología para predecir los requerimientos de EN_g (kcal/kg PCV^{0,75} /día), tiene a sobreestimar la ER cuando se realizan mediciones puntuales que no son representativas de mayores períodos de ganancia. Los procedimientos para estimar la

EN_g deberían de incluir un mayor número de mediciones en el tiempo y por animal. Igualmente, se recomienda evaluar un mayor número de niveles de alimentación, con el fin de generar modelos que cubran un mayor rango de GPCV y ER.

Los valores de k_m y k_g se encuentran dentro de límites biológicamente aceptables para las metodologías previamente indicadas. No obstante, los valores de k_m se encuentran en el rango superior descrito por la literatura, lo cual posiblemente obedece a un menor incremento calórico asociado con las condiciones experimentales. Los animales confinados no incurrir en gasto energético por concepto de locomoción y aprehensión del forraje, lo cual aumentó la eficiencia de utilización de la energía de la dieta. La calidad de la dieta también mejoró k_m , toda vez que la suplementación concentrada aumentó la concentración de EM y con ello su metabolicidad.

Bibliografía

Agricultural and Food Research Council (Great Britain). Technical Committee on Responses to Nutrients. Energy and protein requirements of ruminants: an advisory manual. CAB international; 1993.

Agricultural Research Council (Great Britain), Commonwealth Agricultural Bureaux. The nutrient requirements of ruminant livestock: technical review. CAB Intl; 1980.

AOAC International. Official Methods of Analysis. 18th ed. Arlington, VA: AOAC International; 2007.

AOAC International. Official Methods of Analysis. 18th ed. Gaithersburg, MD: AOAC International; 2005.

Arango AJ, Gaviria JD, Serna CM. Heterosis para el peso y la ganancia de peso desde el nacimiento hasta los 18 meses en el cruce de bovinos aberdeen Angus por Cebú. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. 2000 Jan 1;53(1):863-85.

Bell MJ, Eckard RJ. Reducing enteric methane losses from ruminant livestock—Its measurement, prediction and the influence of diet. In Tech Publishing: Rijeka, Croatia. 2012 Oct 24:135-50.

Borges AL, e Silva RR, Ferreira AL, Lage HF, Vivenza PA, de Carvalho PH, da Fonseca MP, Gonçalves LC, Rodríguez NM. Respirimetria e exigências nutricionais de zebuínos e cruzados de leite, em diferentes níveis de alimentação e estádios fisiológicos. Em: Valadares Filho SC, Costa y Silva LF, Gionbelli MP, Rotta PP, Marcondes MI, Chizzotti ML, Prados LF. Exigências nutricionais de zebuínos puros e cruzados: BR-Corte. 3 ed. Brasil: Editorial UFV. 2016; p.151-162.

Brouwer E. Report of sub-committee on constants and factors. In Proceedings of the 3rd symposium on energy metabolism of farm animals, 1965 1965 (Vol. 11, pp. 441-443). European association for animal production.

Chizzotti ML, Tedeschi LO, Valadares Filho SC. A meta-analysis of energy and protein requirements for maintenance and growth of Nellore cattle. Journal of Animal Science. 2008 Jul 1;86(7):1588-97.

Church DC. El Rumiante: fisiología digestiva y nutrición. Ed. Acribia. Zaragoza, España. 1993.

Colucci PE, Chase LE, Van Soest PJ. Feed intake, apparent diet digestibility, and rate of particulate passage in dairy cattle. Journal of Dairy Science. 1982 Aug 1;65(8):1445-56.

Derno M, Jentsch W, Schweigel M, Kuhla S, Metges CC, Matthes HD. Measurements of heat production for estimation of maintenance energy requirements of Hereford steers. Journal of animal science. 2005 Nov 1;83(11):2590-7.

DiCostanzo A, Meiske JC, Plegge SD, Peters TM, Goodrich RD. Within-herd variation in energy utilization for maintenance and gain in beef cows. Journal of Animal Science. 1990 Jul 1;68(7):2156-65.

FEDEGAN. 2016. Disponible en: <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/inventario-ganadero>; consulta: junio 2019.

Ferrannini E. The theoretical bases of indirect calorimetry: a review. *Metabolism*. 1988 Mar 1;37(3):287-301.

Ferreira AL. Exigências nutricionais de energia de bovinos machos F1 Holandês x Gir determinadas pelas metodologias de abates comparativos e respirometria calorimétrica (Doctoral dissertation, PhD thesis. Federal University of Minas Gerais, Brazil. 2014. <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9NSFWZ>).

Ferrell CL, Jenkins TG. Body composition and energy utilization by steers of diverse genotypes fed a high-concentrate diet during the finishing period: II. Angus, Boran, Brahman, Hereford, and Tuli sires. *Journal of animal science*. 1998 Feb 1;76(2):647-57.

Ferrell CL, Jenkins TG. Energy utilization by Hereford and Simmental males and females. *Animal Science*. 1985 Aug;41(1):53-61.

Fox DG, Tedeschi LO, Tylutki TP, Russell JB, Van Amburgh ME, Chase LE, Pell AN, Overton TR. The Cornell Net Carbohydrate and Protein System model for evaluating herd nutrition and nutrient excretion. *Animal Feed Science and Technology*. 2004 Feb 10;112(1-4):29-78.

Freitas JA, de Alencar Fontes CA, Soares JE, Jorge AM, Estrada LH. Composição Corporal e Exigências de Energia para Manutenção de Bovinos (Zebuínos e Mestiços) e Bubalinos Não-Castrados, em Confinamento. *Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da UNIPAR*. 2000;3(1).

Freitas JA, Queiroz AC, Dutra AR, Vieira RA, Lana RD, Leonel FD, Henrique DS, Lima AV, Souza JC. Composição corporal e exigências de energia de manutenção em bovinos Nelore, puros mestiços, em confinamento. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2006 Jun;35(3):878-85.

Garrett WN. Factors influencing energetic efficiency of beef production. *Journal of Animal Science*. 1980 Dec 1;51(6):1434-40.

Gomes RA, Busato KC, Ladeira MM, Johnson KA, Galvão MC, Rodrigues AC, Chizzotti ML. Energy and protein requirements for Angus and Nelore young bulls. *Livestock Science*. 2017 Jan 1;195:67-73.

Hales KE, Brown-Brandl TM, Freetly HC. Effects of decreased dietary roughage concentration on energy metabolism and nutrient balance in finishing beef cattle. *Journal of Animal Science*. 2014 Jan 1;92(1):264-71.

Holdridge L.R. 1967. *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center. San José, Costa Rica.

ICA. Instituto Colombiano Agropecuario. 2018. "Censo Pecuario Nacional - 2018. Disponible en: <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>; consulta: Junio 2019.

INRA. *Ruminant Nutrition*. Libbey Eurotext, Montrouge, France. 1989.

International Organization for Standardization – ISO. *Animal feeding stuffs, animal products, and feces or urine – Determination of gross calorific value – Bomb calorimeter method*. ISO 9831. 1998. Geneva, Switzerland.

Johnson DE, Johnson KA, Baldwin RL. Changes in liver and gastrointestinal tract energy demands in response to physiological workload in ruminants. *The Journal of nutrition*. 1990 Jun 1;120(6):649-55.

Johnson DE, Ward GM. Estimates of animal methane emissions. *Environmental monitoring and assessment*. 1996 Sep 1;42(1-2):133-41.

Kiesling H.E., McCroskey J.E., Wagner D.G. 1973. A comparison of energetic efficiency of dry rolled and reconstituted rolled sorghum grain by steers using indirect calorimetry and the comparative slaughter technique. *J. Anim. Sci.* 37, 790-795.

Lighton JR, Halsey LG. Flow-through respirometry applied to chamber systems: pros and cons, hints and tips. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. 2011 Mar 1;158(3):265-75.

Lofgreen GP, Garrett WN. A system for expressing net energy requirements and feed values for growing and finishing beef cattle. *Journal of animal science*. 1968 May 1;27(3):793-806.

Marcondes MI, Chizzotti ML, Valadares Filho SD, Gionbelli MP, Paulino PV, Paulino MF. Energy requirements of zebu beef cattle. Nutrient requirements of Zebu beef cattle, BR-Corte. 2nd ed. Federal University of Vicosa, MG. 2010:81-106.

Marcondes MI, Lopes da Silva A, Gionbelli MP, Valadares Filho SC. Exigências de energia para bovinos de corte. Em: Valadares Filho SC, Costa y Silva LF, Gionbelli MP, Rotta PP, Marcondes MI, Chizzotti ML, Prados LF. Exigências nutricionais de zebuínos puros e cruzados: BR-Corte. 3 ed. Brasil: Editorial UFV. 2016; p. 163-190.

Martínez R, Gallego J, Onofre G, Pérez J, Vasquez R. Evaluación de la variabilidad y potencial genético de poblaciones de bovinos criollos colombianos. Animal Genetic Resources. 2009 Apr;44:57-66.

Moraes EH, Paulino MF, Moraes KA, Figueiredo DM, Valadares Filho SD, Paulino PV, Couto VR. Exigências de energia de bovinos de corte em pastejo. Revista Brasileira de Zootecnia. 2009.

Nkrumah J.D., Okine E.K., Mathison G.W., Schmid K., Li C., Basarab J.A., Price M.A., Wang Z., Moore S.S. 2006. Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. J. Anim. Sci. 84,145-153.

NRC (National Research Council). Nutrient Requirements of Beef Cattle. 6 ed. Washington, D.C: National Academy Press; 1984.

NRC (National Research Council). Nutrient Requirements of Beef Cattle. 7th ed. National Academy Press, Washington, D.C. 2000.

NRC (National Research Council). Nutrient Requirements of Beef Cattle. 8th ed. National Academy Press, Washington, D.C. 2016.

Nutrient Requirements of Beef Cattle. Department of Animal Science, Oklahoma Cooperative Extension Service, Division of Agricultural Sciences and Natural Resources, Oklahoma State University. Disponible en: <http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-1921/E-974web.pdf>

Old CA, Rossow HA, Lean IJ, Famula TR. Energetic efficiency and the first law: the California net energy system revisited. *Journal of animal science*. 2018 Nov 21;96(11):4882-901.

Owens FN, Gill DR, Secrist DS, Coleman SW. Review of some aspects of growth and development of feedlot cattle. *Journal of animal science*. 1995 Oct 1;73(10):3152-72.

Pancoti C. Exigências nutricionais de energia de novilhas Gir, Holandês e F1–Holandês x Gir. 2015. 121p (Doctoral dissertation, Tese (Doutorado)–Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte).

Posada SL, Noguera RR, Rodríguez NM, Borges AL, Reis R. Energy requirements for beef cattle: concepts and experimental results in tropical conditions. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 2011 Dec;24(4):617-22.

Posada-Ochoa SL, Noguera RR, Rodríguez NM, Costa AL, Reis R. Indirect calorimetry to estimate energy requirements for growing and finishing Nellore bulls. *Journal of integrative agriculture*. 2017 Jan 1;16(1):151-61.

Prados LF, Valadares Filho SC, Detmann E, Zanetti D, Santos SA, Sathler DF, Mariz LD, Borges AL, Nunes AN, Rodrigues FC, Amaral PM. Energy and protein requirements of 3/4 Zebux 1/4 Holstein crossbreds fed different calcium and phosphorus levels in the diet. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*. 2015 Apr;67(2):555-63.

Putrino SM, Leme PR, Silva SD, FZEA U, Alleoni GF, Lanna DP, Grossklaus CS. Exigências líquidas de proteína e energia para ganho de peso de novilhos Nelore alimentados com dietas contendo grão de milho úmido e gordura protegida. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2006.

Rompala RE, Johnson DE, Rumpler WV, Phetteplace HW, Specht SM, Parker CF. Energy utilization and organ mass of Targhee sheep selected for rate and efficiency of gain and receiving high and low planes of nutrition. *Journal of animal science*. 1991 Apr 1;69(4):1760-5.

Sanson DW, Hixon DL. Dry matter intake for beef cattle. Adapted from the Cattle Producer's Library. Beef Cattle Handbook. 1999. URL: <http://www.iowabeefcenter.org/bch/DryMatterIntake.pdf>

SAS 2019. SAS® University Edition. URL: http://www.sas.com/en_us/software/university-edition.html

Scientific C. Industrial Research Organization–CSIRO. Feeding Standards for Australian Livestock, Ruminants. CSIRO Publications, East Melbourne, Victoria, Australia. 266 p. 1990.

Scientific C. Industrial Research Organization–CSIRO. Nutrient requirements of domesticated ruminants. Collingwood, Australia: CSIRO Publishing. 2007.

Shirley KL, Thomas MG, Keisler DH, Hallford DM, Montrose DM, Silver GA, García MD. A Chihuahuan Desert Brangus Breeding Program: Feed Efficiency, Metabolic Hormones, and Puberty in Heifers Sired by Bulls with Differing Expected Progeny Differences for Growth and Scrotal Circumference. *The Professional Animal Scientist*. 2006; 22:48-58

Silva JS. Exigências de energia em bezerros lactentes F1 Holandês x Gir, utilizando a respirometria. 2016. (Doctoral dissertation, Tese (D. Sc.)–Escola De Veterinária, Belo Horizonte, MG, Brasil).

Silva LF, Valadares Filho SC, Zanetti D, Rotta PP, Marcondes MI, Prados LF, Paulino MF, Azevedo HO. Energy and protein nutritional requirements for Nelore bulls¹. *Braz. J. Anim. Sci.*. 2012;41:1516-24.

Siqueira JG, Fontes CA, Pereira AL, Lombardi CT, Vieira RA. Exigência de energia de manutenção e composição corporal e do ganho de vacas de corte adultas de três grupos genéticos confinadas. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2007 Dec;36(6):2159-67.

Susenbeth A, Dickel T, Sudekum KH, Drochner W, Steingass H. Energy requirements of cattle for standing and for ingestion, estimated by a ruminal emptying technique. *Journal of animal science*. 2004 Jan 1;82(1):129-36.

Tedeschi LO, Boin C, Fox DG, Leme PR, Alleoni GF, Lanna DP. Energy requirement for maintenance and growth of Nelore bulls and steers fed high-forage diets. *Journal of Animal Science*. 2002 Jun 1;80(6):1671-82.

Valadares Filho SD, Paulino PV, Magalhães KA. Exigências nutricionais de zebuínos e tabelas de composição de alimentos BR-CORTE. Viçosa, MG: UFV, Suprema Gráfica Ltda. 2006. VALADARES FILHO SD, Paulino PV, Magalhães KA. Exigências nutricionais de zebuínos e tabelas de composição de alimentos BR-CORTE. Viçosa, MG: UFV, Suprema Gráfica Ltda. 2006.

Valadares Filho SC, Costa y Silva LF, Gionbelli MP, Rotta PP, Marcondes MI, Chizzotti ML, Prados LF. Exigências nutricionais de zebuínos puros e cruzados. BR-Corte. 3 ed. Brasil: Editorial UFV. 2016; 327 p.

Van Soest P J. *Nutritional Ecology of the Ruminant*. 2nd ed. Cornell University Press, NY, USA 1994.

Van Soest PV, Robertson JB, Lewis BA. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of dairy science*. 1991 Oct 1;74(10):3583-97.

Varlamoff NB, Cipolini MF, Jacobo RA, Martínez DE, Ragazzi A. Ganancia de peso en terneros Brahman y Brangus 1/4, 3/8 y 5/8 desde el nacimiento al destete en Corrientes (Argentina). *Revista Veterinaria*. 2011 Sep 9;22(1):60-3.

Véras AS, Valadares Filho SD, Coelho da Silva JF, Paulino MF, Cecon PR, Valadares RF, Ferreira MD, Paulino PV, Rocha CV. Composição corporal e requisitos líquidos e dietéticos de macroelementos minerais de bovinos Nelore não-castrados. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2001;30(3):1106-11.

Wilmore JH, Costill DL. Adequacy of the Haldane transformation in the computation of exercise V O₂ in man. *Journal of Applied Physiology*. 1973 Jul;35(1):85-9.

CONCLUSIONES GENERALES

- Las cámaras de respiración de circuito abierto representan una metodología de alta precisión para cuantificar las emisiones de metano y la producción de calor, sin embargo, hay que ser riguroso en su uso y entender sus limitaciones. Los protocolos experimentales que se siguieron en este trabajo permitieron determinar el balance energético a diferentes niveles de alimentación y los requerimientos de energía neta para el mantenimiento con bastante precisión, dada la coherencia biológica de los resultados obtenidos. No obstante, el protocolo experimental conducente a la determinación de los requerimientos de energía neta para la ganancia de peso debe ser ajustado, como se soporta más adelante.
- Del capítulo 2 se puede concluir que la inclusión de orujo de uva, pulpa de café, semilla de algodón y *Gliricidia sepium*, representando el 15% de la dieta y el 37,5% del suplemento, no afectó la digestibilidad aparente de los nutrientes, el balance de energía y de nitrógeno. Sin embargo, su introducción en la dieta no disminuyó la producción de metano por unidad de materia seca consumida o respecto la energía bruta consumida (Y_m) cuando comparada con la dieta control. En tal sentido, no fue posible confirmar la hipótesis planteada en el presente trabajo, recomendando un mayor nivel de inclusión en próximos estudios para evaluar su efecto sobre la mitigación de metano. Se llama la atención sobre el bajo consumo de materia seca que se reportó en la dieta incluyendo pulpa de café, asociado con su baja palatabilidad, por lo cual mayores niveles de inclusión deberán ser acompañados de otros ingredientes que mejoren la palatabilidad de la dieta.
- Con base en los resultados del capítulo 3, tampoco fue posible confirmar la segunda hipótesis del trabajo. El requerimiento de energía neta para el mantenimiento (EN_m) del ganado Brangus (ganado mestizo) superó el valor propuesto por Lofgreen y Garrett (1968) y adaptado por el NRC (2000), 77

kcal/kg PCV^{0,75} /día para ganado *Bos taurus*. No obstante, el requerimiento fue similar a otros reportes para ganado *Bos indicus* y mestizo. Con respecto a las metodologías evaluadas para su estimación, se recomiendan la regresión entre el Log de la PC y el CEM a dos niveles de alimentación, así como la cuantificación de la PCay24 ajustado.

- El requerimiento de EN_g, bajo la metodología que se siguió en este trabajo, superó los reportes de la literatura. Los datos del presente trabajo permiten inferir que la calorimetría indirecta, como metodología para predecir los requerimientos de EN_g (kcal/kg PCV^{0,75} /día), tiene a sobreestimar la ER cuando se realizan mediciones puntuales que no son representativas de mayores períodos de ganancia. Los procedimientos para estimar la EN_g deberían de incluir un mayor número de mediciones en el tiempo por animal. Igualmente, se recomienda evaluar un mayor número de niveles de alimentación, con el fin de generar modelos que cubran un mayor rango de GPCV y ER.