

UNIVERSIDAD NACIONAL
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
POSGRADO REGIONAL EN CIENCIAS VETERINARIAS TROPICALES
MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN ANIMAL SOSTENIBLE



**FACTORES AMBIENTALES, GENÉTICOS Y DE MANEJO
QUE AFECTAN LA CIRCUNFERENCIA ESCROTAL Y EL
PESO CORPORAL DE TORETES CEBÚ EN COSTA RICA**

Sustentante:

Carolina Víquez Céspedes

Heredia, marzo 2018

Tesis sometida a consideración del Tribunal Examinador del **Posgrado Regional en Ciencias Veterinarias Tropicales** con énfasis en Producción Animal Sostenible para optar al grado de Magíster Scientiae.

**FACTORES AMBIENTALES, GENÉTICOS Y DE MANEJO
QUE AFECTAN LA CIRCUNFERENCIA ESCROTAL Y EL
PESO CORPORAL EN TORETES CEBÚ EN COSTA RICA**

Sustentante:

Carolina Víquez Céspedes

**Tesis presentada para optar al grado de Magíster Scientiae en Producción
Animal Sostenible. Cumple con los requisitos establecidos por el Sistema
de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica.**

Miembros del Tribunal Examinador

.....
Presidente del Consejo Central de Posgrado
M.Sc. José Rodríguez Zelaya

.....
Directora Programa de Posgrado
Dra. Sandra Estrada König

.....
Tutor
Dr. Jorge Chacón Calderón

.....
Asesor
Dr. Bernardo Vargas Leitón


.....
Asesor
Dr. Jorge Gil Laureiro

.....
Sustentante
Carolina Víquez Céspedes

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme permitido llegar hasta este momento de mi vida y rodearme de grandes personas que me han bendecido.

Gracias a mi familia por todo su apoyo durante la realización de este proyecto. Sin ellos no hubiera logrado gran parte de lo que soy hoy.

Al Dr. Jorge Chacón, maestro y modelo a seguir. Gracias por sus enseñanzas, paciencia, amistad y confianza.

Al Dr. Bernardo Vargas por toda la guía y colaboración brindada durante la realización de esta tesis.

Al Dr. Jorge Gil, por todo el apoyo y contribución dada no solo para este propósito si no para mi carrera.

Al Ministerio de Ciencia y Tecnología, ya que gracias al incentivo brindado por esta institución pude subsanar parte de los costos de estudio durante esta maestría para poder llevarla a término con éxito.

DEDICATORIA

A mi familia y amigos...

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN GENERAL	6
GENERAL ABSTRACT.....	8
INTRODUCCIÓN GENERAL	10
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
OBJETIVOS.....	18
Objetivo General.....	18
Objetivos Específicos	18
CAPÍTULO I.....	19
Resumen	20
Abstract.....	21
Introducción.....	22
Materiales y Métodos	23
Resultados.....	26
Discusión	36
Conclusiones.....	42
Referencias Bibliográficas.....	43
CAPITULO II.....	47
Resumen	48
Abstract.....	49
Introducción.....	50
Materiales y Métodos	52
Resultados.....	55
Discusión	63
Conclusiones.....	68
Referencias Bibilográficas.....	69
CONCLUSIONES GENERALES	73
RECOMENDACIONES GENERALES	74

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las variables Peso Corporal y Circunferencia Escrotal de toros Brahman con edades entre los 7 y los 24 meses.	27
Tabla 2. Estadísticos descriptivos de las variables Peso Corporal y Circunferencia Escrotal de toros Nellore con edades entre los 7 y los 24 meses.	27
Tabla 3. Distribución de animales (n=609) en función de las variables categóricas	28
Tabla 4. Grados de Libertad (G.L), valores F y significancia estadística ($Pr>F$) para todos los efectos fijos evaluados sobre las variables dependientes Peso Corporal y Circunferencia Escrotal	29

CAPÍTULO 2

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las variables Peso Corporal y Circunferencia Escrotal de toros Brahman con edades entre los 7 y los 24 meses.	55
Tabla 2. Correlaciones genéticas para mediciones de peso corporal de toretes Brahman entre los 7 y 24 meses de edad, obtenidas a partir de un modelo de regresión aleatoria (MRA)..	57
Tabla 3. Correlaciones genéticas para mediciones de circunferencia escrotal de toretes Brahman entre los 7 y 24 meses de edad, obtenidas a partir de un modelo de regresión aleatoria (MRA).....	58
Tabla 4. Correlaciones genéticas entre mediciones de Circunferencia Escrotal (Izquierda) y Peso Corporal (Superior) de toretes Brahman entre los 7 a 24 meses de edad, obtenidas a partir de un modelo de regresión aleatoria (MRA).....	59
Tabla 5. Correlaciones genéticas para mediciones de peso corporal de toretes Brahman entre los 7 y 24 meses de edad, obtenidas a partir de un modelo multivariado	60
Tabla 6. Correlaciones genéticas para mediciones de Circunferencia Escrotal de toretes Brahman entre los 7 y 24 meses de edad, obtenidas a partir de un modelo multivariado (MMV)	60

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1. Medias marginales (con IC 95%) de Peso Corporal (PC_kg, arriba) y Circunferencia Escrotal (CE_cm, inferior) en función de la edad (meses) según hato de procedencia (series 1 a 11) 31
- Figura 2. Medias marginales (con IC 95%) de Peso Corporal (PC_kg, arriba) y Circunferencia Escrotal (CE_cm, inferior) en función de la edad (meses) según plano nutricional (1: Pastoreo + minerales, 2: Pastoreo + minerales + 1,0 -2,9 kg de concentrado, 3: Pastoreo + minerales + ≥ 3 kg de concentrado) 32
- Figura 3. Medias marginales (con IC 95%) de Peso Corporal (PC_kg, arriba) y Circunferencia Escrotal (CE_cm, inferior) según categoría de edad de la madre (a: <4 años, b: ≥ 4 -8 años, c: >8 años) 34
- Figura 4. Medias marginales (con IC 95%) de Peso Corporal (PC_kg, arriba) y Circunferencia Escrotal (CE_cm, inferior) en función de la edad (meses) según categoría de edad del animal al destete 35

CAPÍTULO 2

- Figura 1. Estimados de varianza para los componentes genético aditivo (animal), ambiente permanente, residual y fenotípico; correspondientes a las variables Peso Corporal (izquierda) y Circunferencia Escrotal (derecha), en toretes Brahman con edades entre los 7 y 24 meses de edad, obtenidos a partir de un modelo animal bivariado de regresión aleatoria (MRA) y un modelo animal multivariado (MMV). 56
- Figura 2. Índices de heredabilidad (h^2) del Peso Corporal a diferentes edades obtenidos a partir de un modelo animal multivariado (MMV) y un modelo animal bivariado de regresión aleatoria (MRA)..... 61
- Figura 3. Índices de heredabilidad (h^2) de Circunferencia Escrotal a diferentes edades obtenidos a partir de un modelo animal multivariado (MMV) y un modelo animal bivariado de regresión aleatoria (MRA)..... 62

LISTA DE ABREVIATURAS

BSE: Evaluación del potencial reproductivo

CE: Circunferencia escrotal

cm: Centímetros

CV: Coeficiente de Variación

DE: Desviación Estándar

E.E: Error Estándar

G.L: Grados de Libertad asociados a los errores del modelo

Ha: Hectárea

F: distribución F de Fisher

F.A: Frecuencia Acumulada

h^2 : Heredabilidad

kg: Kilogramos

Máx.: Máximos

Mín.: Mínimos

PA: Porcentaje Acumulado

PC: Peso Corporal

$Pr > F$: Valor de P asociado con el estadístico de F (significancia estadística)

r_g : Correlaciones genéticas

UA: Unidad Animal

DESCRIPTORES

Circunferencia escrotal, testículos, peso corporal, heredabilidad, correlación genética, factores ambientales, factores fenotípicos, Brahman, Nellore, Cebú.

RESUMEN GENERAL

En la presente tesis, se analizó el efecto de factores ambientales y genéticos sobre la circunferencia escrotal (CE) y el peso corporal (PC) en toretes cebú. En un primer estudio se determinó el efecto de los factores ambientales sobre dichas variables en animales de las razas Nellore (n=124) y Brahman (n=485) provenientes de 11 fincas de la región Pacífico Norte de Costa Rica. Las variables fueron analizadas mediante un Modelo Lineal Mixto Generalizado (GLMM). El promedio de PC±DE (kg) a los 7 y 24 meses de edad, respectivamente, fue de 215±38,5 y 467±96,7 (Brahman) y de 197±33,2 y 461±60,3 (Nellore). El promedio de CE±DE (cm) a los 7 y 24 meses de edad, respectivamente, fue de 15,8±1,6 y 31,5±3,5 (Brahman) y de 14,3±1,3 y 30,6±2,8 (Nellore). En relación a PC, los efectos de edad del animal, edad y peso del animal al destete, plano nutricional y hato, así como las interacciones hato×edad y plano nutricional×edad, presentaron efectos altamente significativos (P<0,001). La época de nacimiento y edad de la madre al parto tuvieron un efecto significativo (P<0,05). Con respecto a CE, los efectos de edad del animal, edad y peso del animal al destete, plano nutricional, hato, así como las interacciones hato×edad, plano nutricional×edad y edad de la madre×edad presentaron efectos altamente significativos (P<0,01 y P<0,001). Los animales que presentaron un mejor desarrollo en PC y CE fueron aquellos sometidos a un plano nutricional con mayor suplementación energética, con políticas de destete menor a los 7 meses de edad, con mayores pesos al destete e hijos de vacas menores de 8 años. Estas variables tuvieron efectos estadísticamente significativos a diferentes edades del periodo de estudio. El destete temprano aunado a la optimización de las prácticas nutricionales tiene efectos positivos sobre el desarrollo de novillos en fincas de carne. En un segundo estudio se estimaron índices de heredabilidad (h^2) y correlaciones genéticas (r_g) para las variables PC y CE, con mediciones secuenciales desde los 7 hasta los 24 meses, en 485 toretes Brahman procedentes de 8 hatos, mediante un modelo animal bivariado de regresión aleatoria (MRA) y un modelo animal multivariado (MMV). Ambos modelos consideraron los efectos fijos de hato-año de nacimiento, época de nacimiento, plano nutricional, edad de destete y número de parto de la madre, además de los efectos aleatorios de ambiente permanente (solo para MRA) y el efecto genético aditivo del animal. La genealogía fue de 3000 animales distribuidos en 7 generaciones. Los promedios de h^2

para CE y PC fueron de 0,58 y 0,85 (MRA), respectivamente y 0,49 y 0,55 (MMV), respectivamente. Según ambos modelos los mayores valores de h^2 para PC se obtuvieron a los 10 y 11 meses de edad y para CE a los 7, 11 y 22 meses de edad (MMV) y a los 18 y 20 (MRA). Las r_g entre mediciones de PC a distintas edades oscilaron entre 0,67 y 1 (MRA) y entre 0,61 y 0,99 (MMV). En cuanto a la CE, las r_g oscilaron entre 0,43 y 1 (MRA) y entre 0,13 y 1 (MMV). Las r_g entre mediciones de PC y CE variaron entre 0,55 y 0,94 (MRA). La utilización rutinaria de metodologías para realizar evaluaciones genéticas y productivas de los reproductores debe ser aplicada en la selección de estos animales, para realizar estimaciones más precisas de los diversos factores que pueden afectar su desarrollo productivo y reproductivo, principalmente en etapas claves como el destete. Además, los altos valores de h^2 para PC (0,91 y 0,61 a los 10 meses y 0,92 y 0,57 a los 11 meses para MMV y MRA; respectivamente) y CE (0,75, 0,70 y 0,71 a los 7, 11 y 22 meses de edad según el MMV y 0,68 y 0,72 a los 18 y 20 meses edad según el MRA) y las r_g positivas entre ambos rasgos (1,0 entre los 7 y 8 meses y 0,9 entre los 10 y 11 meses), sugieren que la selección para PC y CE se puede hacer desde edades tempranas.

GENERAL ABSTRACT

This research assessed the effect of environmental and genetic factors on the scrotal circumference (SC) and body weight (BW) in Zebu steers. In a first study, the effect of environmental factors on BW and SC of Nellore (n = 124) and Brahman (n = 485) steers from 11 herds in the North Pacific region of Costa Rica was evaluated. The variables were analyzed using a Generalized Linear Mixed Model (GLMM). The average of BW \pm SD (kg) at 7 and 24 months of age, respectively, was 215 \pm 38.5 and 467 \pm 96.7 (Brahman) and 197 \pm 33.2 and 461 \pm 60.3 (Nellore). The average of SC \pm SD (cm) at 7 and 24 months of age, respectively, was 15.8 \pm 1.6 and 31.5 \pm 3.5 (Brahman) and 14.3 \pm 1.3 and 30.6 \pm 2.8 (Nellore). In relation to BW, the effects of age, age and weight to weaning, nutritional level and herd, as well as the interactions of herd \times age and nutritional level \times age, had highly significant effects (P<0.001). The season of birth and age of the mother at birth had a significant effect (P<0.05). With regard to SC, the effects of age, age and weight to weaning, nutritional level, herd, as well as interactions of herd \times age, nutritional level \times age and age of the mother \times age had highly significant effects (P<0.01, P<0.001). Animals with better development of BW and SC were those that were managed in a nutritional diet with high energy level, weaning at early age of 7 months, higher weaning weights and sons of cows under 8 years, presented a better development from 7 to 24 months. Early weaning coupled with the optimization of nutritional practices has positive effects on the development of beef steers.

In a second study, heritability (h^2) and genetic correlations (GC) were estimated for BW and SC with sequential measurements from 7 to 24 months, in 485 Brahman bulls from 8 herds, by a Random Regression Bivariate Animal Model (RRAM) and a Multivariate Animal Model (MVM). Both models considered fixed effects of year-year of birth, season of birth, nutritional level, weaning age and number of births of the mother, in addition the random effects of permanent environmental (only for RRAM) and the additive genetic effect of the animal. Genealogy was constituted by 3000 animals distributed in 7 generations. The average of h^2 for CE and PC were 0.58 and 0.85 (RRAM), respectively and 0.49 and 0.55 (MVM), respectively. According to both models the highest values of h^2 for BW were obtained at 10 and 11 months of age and for SC at the age of 7, 11 and 22 months (MVM) and at 18 and 20 (RRAM). The GC between measurements of BW at different ages ranged

from 0.67 to 1 (RRAM) and 0.61-0.99 (MVM). For the SC, the GC ranged from 0.43 to 1 (RRAM) and between 0.13 and 1 (MVM). The GC between BW and SC measurements varied between 0.55 and 0.94 (RRAM). The routine use of methodologies to perform productive and genetic evaluations of steers should be applied in the selection of these animals, to make more precise estimates of the many factors that affect the development of both productive and reproductive traits, mainly in crucial stages such the weaning and puberty. In addition, high values of h^2 of BW (0.91, 0.61 at 10 months; 0.92, 0.57 at 11 months for the MVM and RRAM; respectively) and SC (0.75, 0.70 and 0.71 at 7, 11 and 22 months for the MVM; 0.68 and 0.72 at 18 and 20 months for the RRAM) and the positive GC (1.0 between 7-8 months; 0.9 between 10-11 months) between both traits, suggest that selection for BW and SC can be made at early ages.

INTRODUCCIÓN GENERAL

La competencia entre el uso de insumos para la alimentación animal, producción de biocombustibles y la alimentación del humano es cada vez mayor. Esto debido a que la producción de carne bovina en la mayoría de los países tropicales está basada en el pastoreo como principal recurso alimentario (FAO, 2009). Además, aproximadamente dos terceras partes del costo total de producción de carne bovina están relacionadas con la alimentación de los animales, por lo que se deben de buscar estrategias que mejoren la eficiencia productiva, considerando aspectos como la genética, alimentación, reproducción, sanidad y el manejo general de la explotación, las cuales pueden mejorar significativamente la viabilidad económica de las empresas ganaderas (Arronis, 2003; MAG, 2008).

Las mejoras que impliquen eficiencia productiva pueden ayudar a mitigar el impacto ambiental y mejoran la sostenibilidad de la ganadería. El uso de animales genéticamente superiores permite alcanzar las mismas metas de producción con menos animales, en el mismo espacio de terreno y en menos tiempo (Arronis, 2003; MAG, 2008; Basarb *et al.*, 2013). Algunas de estas acciones pueden ser aquellas que incrementen la eficiencia genética en cuanto a precocidad sexual e índices de crecimiento con el fin de acortar los ciclos de producción, haciéndolos más rentables y sustentables considerando un enfoque integral de productividad (FAO, 2003; Urdaneta, 2009; Yokoo *et al.*, 2010; Menegassi *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2011; Yakubu y Musa-Azara, 2013).

Producción de carne bovina en Costa Rica

En Costa Rica existe una gran variedad de actividades de producción pecuaria, como lo son el ganado bovino, caprino, ovino, porcino, explotaciones acuíferas y aves de corral entre otros. Acorde con estadísticas del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) para el año 2015, el total de cabezas de ganado bovino de carne, leche y doble propósito, fue de 1 278 817 unidades animales (UA), con una distribución mayoritaria en las provincias de Alajuela (33,5%), Guanacaste (22,0%) y San José (8,6%). El sistema especializado de producción de carne bovina es el que posee la mayor cantidad de animales (42,1%), ubicados en su mayoría en fincas de la provincia de Guanacaste (145 346 UA), mientras que el ganado de doble propósito y lechero representan el 32,0% y el 25,6% respectivamente, y se

encuentran concentrados principalmente en la provincia de Alajuela (INEC, 2015). No obstante, el sistema de producción de carne bovina del país se caracteriza por desarrollarse en extensas áreas de pastoreo, con una baja carga animal por unidad de terreno (0,77 UA/Ha) (CORFOGA, 2000).

La provincia de Guanacaste (Región Chorotega) ha sido una zona ganadera de carne por excelencia, debido a que la mayor parte de su superficie está cubierta por pasturas. La producción forrajera y la concentración de animales por hectárea en esta región son moderadas, en su mayoría a causa de las sequías que se presentan en el verano. Su población bovina de carne es elevada y contribuye a la cría, desarrollo y engorde de una forma importante (CORFOGA, 2000).

En Costa Rica, los últimos estudios poblacionales realizados han confirmado un descenso constante en la superficie dedicada a la actividad ganadera y por ende una disminución significativa del hato nacional, a una tasa anual aproximada de un 3%, conjuntamente con un aumento casi imperceptible de la intensidad en el uso de las pasturas de 0,7 a 0,77 UA/Ha. El cambio más importante en la estructura del hato bovino de carne en Costa Rica a través del tiempo ha sido el descenso de las hembras destinadas para reproducción, de un 58% en 1973 a un 46% y 40% en los años 1982 y 2000, respectivamente (CORFOGA, 2000).

Esta situación va de la mano con el aumento en la producción de leche en el país, la cual ha tenido un crecimiento lineal en los últimos años, debido en su mayoría a la tecnificación e intensificación de esta industria, lo que ha conllevado un desplazamiento de los hatos de carne hacia hatos lecheros o doble propósito. En relación con los machos, la población de reproductores se encuentra distribuida en su mayoría en las fincas de carne y doble propósito, debido en gran parte al manejo extensivo empleado en estas explotaciones, las cuales utilizan la monta natural en gran escala (CORFOGA, 2000). En el país, se emplea una proporción promedio de un toro por cada 25 vacas en empadre, ya sea en un sistema de monta estacional o continua (Chacón, 2014).

Este descenso del hato bovino costarricense se asocia además a los bajos índices de producción de la actividad bovina de carne, los que pueden ser debidos al manejo extensivo que se suele emplear en el país, limitado por un aprovechamiento deficiente del recurso forrajero a causa de prácticas inadecuadas de pastoreo, como no emplear rotación de potreros,

el manejo de una carga animal inferior a la capacidad real y la falta de fertilización de los suelos dedicados a pasturas. Además, los pastos mejorados se usan de manera poco frecuente y en las fincas suele faltar infraestructura (corrales, cercas, bebederos, saladeros, romana) y maquinaria especializada para labores agrícolas. Además, la asesoría en cuanto al empleo de estrategias que brinden un aprovechamiento máximo del terreno y del potencial productivo de los animales suele ser deficiente o de difícil acceso. Estos factores dejan en evidencia la necesidad de introducir estrategias que intensifiquen la producción mediante la integración de factores políticos, socioeconómicos y agropecuarios que permitan un desarrollo integral para obtener un sistema productivo sostenible que evite el estancamiento o decaimiento de la ganadería de carne costarricense (Román, 1981; Arronis, 2003; 2010; MAG, 2008).

En el sistema productivo de carne bovina del país, predominan animales *Bos indicus*, en particular de las razas Brahman y Nellore, debido principalmente a su adaptabilidad y resistencia a las condiciones tropicales (CORFOGA, 2000; Chacón, 2014). La raza Brahman, es bien conocida por su resistencia a enfermedades y adaptación al clima tropical, lo cual se conjuga con su aptitud cárnica y conversión alimenticia. Además, se caracteriza por tener una alta habilidad materna lo cual contribuye al desarrollo de su cría. Los animales de la raza Nellore, se caracterizan por su rusticidad y adaptación al medio, poseen una aptitud principalmente cárnica sin dejar de tener una adecuada producción láctea para el desarrollo del ternero. Asimismo, los machos presentan buenos rendimientos en canal comparados con homólogos de su especie, son fértiles y longevos, lo que innegablemente favorece la rentabilidad de su explotación (Turner, 1980; Watts, 2013).

Importancia del peso corporal y circunferencia escrotal en la producción de ganado de carne

El peso corporal (PC) junto con la condición corporal y la conversión alimenticia son las principales variables empleadas para definir el rendimiento de los animales de engorde. Aquellos que tienen mayor potencial productivo poseen una mayor conversión alimenticia, ganan más peso, y logran alcanzar el peso para su comercialización en menor tiempo (Kaps *et al.*, 1999; Yokoo *et al.*, 2010).

Durante el período de amamantamiento, el desarrollo del ternero depende principalmente de la habilidad materna de la vaca, expresada en términos de cantidad y

calidad de la leche. No es sino después de que el animal es destetado, que este empieza a expresar sus características genéticas. Variables como la circunferencia escrotal (CE), y el crecimiento corporal (ganancia de peso), pueden verse modificadas por factores sanitarios, la nutrición y el clima (Chacón *et al.*, 2000; 2002; Martínez *et al.*, 2003; Chacón, 2014). En diversos estudios, se recomienda considerar la CE como una característica de importancia dentro de los programas de selección de reproductores por estar genéticamente asociada con una adecuada calidad seminal (Kealey *et al.*, 2006).

Las medidas de CE están asociadas no solamente al desarrollo testicular, sino a características físicas y morfológicas, presentando también una correlación genética favorable con la edad a la pubertad. Se estima que los toretes *Bos indicus* en el trópico con una adecuada nutrición, alcanzan la pubertad a una edad y CE promedio de 18,5 meses y 26,7 cm respectivamente (Chacón, 2014). En un estudio realizado en México con toros Brahman (n=12), se obtuvo un PC, edad a la pubertad y CE promedio de $374,6 \pm 22,5$ kg, $17 \pm 0,4$ meses y $28,6 \pm 0,6$ cm, respectivamente (Silva-Mena, 1997). En otro estudio realizado en Costa Rica con toretes Brahman (n=323) y Nellore (n=98) manejados en pastoreo extensivo y suplementados con minerales, se demostró que todos aquellos animales que lograron alcanzar una CE de 28 cm a los 16 meses de edad eran sexualmente maduros en ese momento (Chacón, 2014).

La CE se encuentra positivamente asociada a características de crecimiento corporal, por lo tanto, puede ser utilizada como criterio de selección de los machos sin ir en detrimento de su fertilidad (Brinks *et al.*, 1978; Brinks, 1985; Evans *et al.*, 1999; Martínez *et al.*, 2003; Kealey *et al.*, 2006; Garmyn *et al.*, 2011). De igual forma, su utilización como parámetro de selección sugiere un mejoramiento de la fertilidad de las hijas (Silva *et al.*, 2011). Sin embargo, en toretes, el tamaño testicular no solo depende del PC, sino de otros factores, como su genética, raza y nutrición (Dunn y Moss, 1992; Martínez *et al.* 2003; Barth *et al.*, 2008; Chacón, 2014).

Factores genéticos relacionados con el peso corporal y la circunferencia escrotal

Los estimados de heredabilidad (h^2) para CE en toros *Bos indicus* criados bajo condiciones tropicales son escasos, lo cual limita el uso de este parámetro como herramienta

para la selección de reproductores, principalmente a edades tempranas. Dicha situación provoca que se deba esperar incluso hasta 24 meses o más para diagnosticar si un semental es satisfactorio como reproductor (Garmyn *et al.*, 2011). Ese periodo de espera se traduce en pérdidas económicas debido al impacto negativo sobre la eficiencia productiva del establecimiento a raíz de la inversión de tiempo y dinero dedicados a reproductores que deben ser posteriormente descartados al no lograr alcanzar los estándares mínimos de CE.

Debido a lo anterior, surge la importancia de realizar estudios bajo condiciones típicas de la región, dado que el clima, la nutrición y la tipología racial son diferentes a las manejadas bajo otras condiciones. La CE presenta una h^2 promedio de media a alta ($0,67 \pm 0,10$) en toros Holstein (*Bos taurus*) con valores que van desde $0,21 \pm 0,13$ hasta $0,88 \pm 0,09$, en ambientes templados (Coulter *et al.*, 1976). Para toros Brahman en Venezuela ($n=214$), se ha reportado un h^2 de 0,46 a los 24 meses (Yáñez *et al.*, 1997). Por otro lado, Morris *et al.* (1992), reportaron un estimado para h^2 de la CE y peso corporal a los 18 meses de $0,21 \pm 0,09$ y $0,36 \pm 0,13$ respectivamente, empleando un modelo animal paterno en toros Hereford en Nueva Zelanda ($n=1090$).

En un estudio realizado con toros Nelore en Brasil, se obtuvo una h^2 para PC de $0,28 \pm 0,01$ al destete y $0,30 \pm 0,01$ a los 12 meses, mientras que para la CE el estimado fue de $0,26 \pm 0,05$, $0,35 \pm 0,05$ y $0,36 \pm 0,04$ a los 9, 12 y 18 meses de edad respectivamente (Boligon *et al.*, 2010). El rango de estos resultados es muy similar al reportado para machos *Bos taurus*, tanto para CE (0,25 a 0,53) como para PC (0,15 a 0,37) (Yáñez *et al.*, 1997; Forni y Albuquerque, 2005; Boligon *et al.*, 2007; Yokoo *et al.*, 2007; Boligon *et al.*, 2008).

Desde las décadas de los 80 y 90 se han reportado estimaciones de correlaciones genéticas favorables entre CE y PC (Knights *et al.*, 1984; Bourdon y Brinks, 1986; Bergmann *et al.*, 1996). Cutaia *et al.* (1999) evaluaron la correlación de la CE con la edad y el PC en toros de 9 a 19 meses de la raza Fleckvieh-Simmental ($n=40$), criados en confinamiento intensivo; encontrando una alta correlación entre la edad y la CE (0,71, $P < 0,05$) y entre la CE y el PC (0,76; $P < 0,05$). En otro estudio realizado en Panamá en toros Brahman de 18 a 60 meses de edad ($n=211$), se determinaron coeficientes de correlación entre la CE y edad de 0,38 ($P < 0,01$) y entre la CE y el PC de 0,56 ($P < 0,01$) (Batista, 2011). Boligon *et al.* (2010) obtuvieron una correlación genética positiva entre PC a diferentes edades y las mediciones

de CE (0,23 a 0,38) en toretes Nellore, concluyendo que la selección en machos por dicha variable podría resultar en mayores pesos al destete y al año de edad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arronis, D.V. 2003. Recomendaciones técnicas sobre sistemas intensivos de producción de carne: estabulación, semiestabulación y suplementación estratégica en pastoreo. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). San José, Costa Rica.
- Arronis, D.V. 2010. Manual de Recomendaciones sobre sistemas intensivos de producción de carne. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). San José, Costa Rica.
- Barth, A.D., F.C. Brito, y J.P. Kastelic. 2008. The effect of nutrition on sexual development of bulls. *Theriogenology*. 70:485–494.
- Basarb, J.A., K.A. Beauchemin, V.S. Baron, K.H. Ominski, L.L. Guan, S.P. Miller, y J.J. Crowley. 2013. Reducing GHG emissions through genetic improvement for feed efficiency: effects on economically relevant traits and enteric methane. *Animal*.7:303-315. doi: 10.1017/S1751731113000888.
- Batista, J. 2011. Relación y correlación existente entre circunferencia escrotal, peso corporal y edad, en toros Brahman de 18 a 60 meses de edad en la provincia de Chiriquí. REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63616932004>. (Consultado: 21 feb. 2016)
- Bergmann, J.A.G., L.C. Zamborlini, C.S.O. Procópio, V.J. Andrade, y V.R. Vale Filho. 1996. Estimativas de parâmetros genéticos do perímetro escrotal e do peso corporal emanimais da raça Nelore. *Arq. Bras. Med. Vet. Zoot.* 48: 69-78.
- Boligon, A.A., P.R.N. Rorato, y L.G. Albuquerque. 2007. Correlações genéticas entre medidas de perímetro escrotal e características produtivas e reprodutivas de fêmeas da raça Nelore. *R. Bras. Zootec.* 36:565–571.
- Boligon, A.A., L.G. Albuquerque, M.E.Z. Mercadante, y R.B. Lobo. 2008. Models for genetic evaluation of Nellore cattle mature body weight. *J. Anim. Sci.* 86:2840–2844.
- Boligon, A.A., J.A.V. Silva, R.C. Sesana, J.C. Sesana, J.B. Junqueira, y L.G. Albuquerque. 2010. Estimation of genetic parameters for body weights, scrotal circumference, and testicular volume measured at different ages in Nellore cattle. *J. Anim. Sci.* 88:1215–1219.
- Bourdon, R.M., y J.S. Brinks. 1986. Scrotal circumference in yearling Hereford bulls: adjustment factors, heritabilities and genetic, environmental and phenotypic relationships with growth traits. *J. Anim. Sci.* 62: 958-967.
- Brinks, J.S. 1985. Genetics of fertility traits in bulls. *Proc. Ann. Meet. Soc. Of Theriogenology*.56-64.
- Brinks, J.S., M.J. McInverney, y P.J. Chenoweth. 1978. Relationship age at puberty in heifers to reproductive trait in young bulls. *Amer. Anim. Sci. Proceeding of Western Section*.28-30.
- Chacón, J., D. Aranda, y E. Pérez. 2000. Scrotal circumference in grass-fed bulls extensively reared in Costa Rica. 14° International Congress on Animal Reproduction. Jun. 2-6. ICAR. Stockholm, Sweden. p. 105.

- Chacón, J., E. Pérez, y H. Rodríguez-Martínez. 2002. Seasonal variations in testicular consistency, scrotal circumference and spermogramme parameters of extensively reared Brahman (*Bos indicus*) bulls in the tropics. *Theriogenology*. 58:41-50.
- Chacón, J. 2014. Applied andrology in cattle (*Bos indicus*). En: P. Chenoweth, y S. Lorton, editors, *Animal andrology: theories and applications*. Australia. p. 352-389.
- CORFOGA (Corporación Ganadera). 2000. Censo Nacional Ganadero. Corporación Ganadera y Dirección Nacional de Estadística y Censos. San José, Costa Rica.
- Coulter, G.H, T.R. Rounsaville, y R.H. Foote. 1976. Heritability of testicular size and consistency in Holstein bulls. *J. Anim. Sci.* 43:10-12.
- Cutaia, I., D. Moreno, R. Tribulo, y G. Bo. 1999. Desarrollo testicular en toros Simmental de 9 a 19 meses de edad. Córdoba. III Simposio Internacional de Reproducción Animal. Argentina.
- Dunn, T.G., y G.E. Moss. 1992. Effects of Nutrient Deficiencies and Excesses on Reproductive Efficiency of Livestock. *J. Anim. Sci.* 70:1580-1593.
- Evans, J.L., B.L. Golden, R.M. Bourdon, y K.L. Long. 1999. Additive genetic relationships between heifer pregnancy and scrotal circumference in Hereford cattle. *J. Anim. Sci.* 77:2621-2628.
- FAO (Food and Agriculture Organization, United Nations).2003. Agricultura orgánica, ambiente y seguridad alimentaria. En: El-HageScialabba, N., y C. Hattam, editores, Colección FAO: Ambiente y Recursos Naturales N° 4. FAO, Roma.
- FAO (Food and Agriculture Organization, United Nations). 2009. How to Feed the World in 2050. FAO. http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf (consultado 10 Oct. 2015).
- Forni, S., y L.G. Albuquerque. 2005. Estimates of genetic correlations between days to calving and reproductive and weight traits in Nelore cattle. *J. Anim. Sci.* 83:1511–1515.
- Garmyn, A.J., D.W. Moser, R.A. Christmas, y J. Minick-Bormann. 2011. Estimation of genetic parameters and effects of cytoplasmic line on scrotal circumference and semen quality traits in Angus bulls. *J. Anim. Sci.* 89:693–698.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). 2015. VI Censo Nacional Agropecuario. San José, Costa Rica.
- Kaps, M., W.O. Herring, y W.R. Lamberson. 1999. Genetic and environmental parameters for mature weight in Angus cattle. *J. Anim. Sci.* 77:569–574.
- Kealey, C.G., M.D. MacNeil, M.W. Tess, T.W. Geary, y R.A. Bellows. 2006. Genetic parameter estimates for scrotal circumference and semen characteristics of Line 1 Hereford bulls. *J. Anim. Sci.* 84:283–290.
- Knights, S.A., R.L. Baker, D. Gianola, y J.B. Gibb. 1984. Estimates of heritabilities and of genetic and phenotypic correlations among growth and reproductive traits in yearling Angus bulls. *J. Anim. Sci.* 58: 887-893.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2008. Agro-cadena de la ganadería bovina de carne de la Región Chorotega: Manual de recomendaciones para el manejo sostenible de la ganadería bovina de carne en la Región Chorotega. San José, Costa Rica.
- Martínez, V.G., K.E. Gregory, G.L. Bennett, y L.D. Van Vleck. 2003. Genetic relationships between scrotal circumference and female reproductive traits. *J. Anim. Sci.* 81:395–401.

- Menegassi, S.R.O., J.O.J. Barcellos, V. Peripolli, y C.M. Camargo. 2011. Behavioral assessment during breeding soundness evaluation of beef bulls in Rio Grande do Sul. *Anim. Reprod.* 8: 77-80.
- Morris, C.A., R.L. Baker, N.G. Cullen, y P. Boyd. 1992. Genetic parameters for body weight, scrotal circumference, and serving capacity in beef cattle. *N. Z. J. Agric. Res.* 35:195-198.
- Navarro, L. y J. Chacón. 2016a. Deferred bulls: Are cycles per conception and pregnancy rate determined by the type of spermiogramme deviation under natural mating?. *Animal Reproduction Science Vol. 169, Special issue on the 10th biennial conference of the Association for Applied Animal Andrology*: 127-128.
- Navarro, L. y J. Chacón. 2016b. Cycles per conception achieved by extensively managed beef bulls with different andrological status under natural mating in tropical Costa Rica. *Abstracts 18th International Congress on Animal Reproduction. Tours-France. 26-30 June 2016*: 104.
- Román, H. 1981. Potencial de producción de los bovinos en el trópico de México. *Ciencia Veterinaria.* 3:394-431.
- Siddiqui, M.A.R., J. Bhattacharjee, Z.C. Das, M.M. Islam, M.A. Islam, M.A. Haque, J.J. Parrish, y M. Shamsuddin. 2008. Crossbred bull selection for bigger scrotum and shorter age at puberty with potentials for better quality semen. *Reprod. Domest. Anim.* 43:74-79.
- Silva-Mena, C. 1997. Peripubertal traits of Brahman bulls in Yucatan. *Theriogenology.* 48:675-685.
- Silva, M.R., V.B. Pedrosa, J.C. Silva, J.P. Eler, J.D. Guimarães, y L.G. Albuquerque. 2011. Testicular traits as selection criteria for young Nelore bulls. *J. Anim. Sci.* 89:2061-2067.
- Turner, J.W. 1980. Genetic and Biological Aspects of Zebu Adaptability. *J. Anim. Sci.* 50:1201-1205.
- Urdaneta, F. 2009. Mejoramiento de la eficiencia productiva de los sistemas de ganadería bovina de doble propósito. *Arch. Latinoam. Prod. Anim.* 17:109-120.
- Watts, R. 2013. *Livestock and Animal Products in the Tropics-Containing Information on Zebu, Cattle, Swine, Buffalo and Other Tropical Livestock.* ReadBooks Ltd. 30págs.
- Yáñez, L., N. Madrid, R. Contreras, y Rincón, U.E. 1997. Relaciones de circunferencia escrotal con edad y peso corporal en toros mestizos. *Arch. Latinoam. Prod. Anim.* 5: 479-481.
- Yakubu, A., y I.S. Musa-Azara. 2013. Evaluation of Three Mathematical Functions to Describe the Relationship between Body Weight, Body Condition and Testicular Dimensions in Yankasa Sheep. *Int. J. Morphol.* 31: 1376-1382.
- Yokoo, M.J.I., L.G. Albuquerque, R.B. Lobo, R.D. Sainz, J.M. C. Júnior, L.A.F. Bezerra, y F.R.C. Araujo. 2007. Estimativas de parâmetros genéticos para altura do posterior, peso e circunferência escrotal em bovinos da raça Nelore. *R. Bras. Zootec.* 36:1761-1768.
- Yokoo, M.J., R.B. Lobo, F.R. Araujo, L.A. Bezerra, R.D. Sainz, y L.G. Albuquerque. 2010. Genetic associations between carcass traits measured by real-time ultrasound and scrotal circumference and growth traits in Nelore cattle. *J. Anim. Sci.* 88:52-58.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el efecto de factores ambientales, genéticos y de manejo sobre la circunferencia escrotal y el peso corporal a diferentes edades en toretes de las razas Nellore y Brahman en Costa Rica.

Objetivos Específicos

- Determinar el efecto potencial de variables como la edad, finca de procedencia, año, época de nacimiento y destete, edad y número de parto de la madre, plano nutricional, peso a destete, año y época de destete sobre el peso corporal y la circunferencia escrotal para toretes Brahman y Nellore en Costa Rica.
- Estimar los coeficientes de heredabilidad para la circunferencia escrotal y peso corporal de toretes Brahman en Costa Rica con edades entre los 7 y 24 meses de edad.
- Determinar la correlación genética entre el peso corporal y las mediciones de circunferencia escrotal de toretes Brahman en Costa Rica con edades entre los 7 y 24 meses.

CAPÍTULO I

**FACTORES AMBIENTALES Y DE MANEJO QUE AFECTAN LA
CIRCUNFERENCIA ESCROTAL Y EL PESO CORPORAL EN TORETES BRAHMAN
Y NELLORE EN COSTA RICA**

RESUMEN

Se analizó el efecto potencial de diferentes variables ambientales y de manejo sobre el peso corporal (PC) y la circunferencia escrotal (CE) en toretes Brahman (n=485) y Nellore (n=124), con edades desde los 7 hasta los 24 meses, provenientes de 11 fincas de la región Pacífico Norte de Costa Rica. El promedio de PC y CE para toretes a los 7 y 24 meses de edad fue de $215 \pm 38,5$ kg y $15,8 \pm 1,6$ cm y de $467 \pm 96,7$ kg y $31,5 \pm 3,5$ cm respectivamente en la raza Brahman. Asimismo, en la raza Nellore los promedios para estas variables fueron de $197 \pm 33,2$ kg y $14,3 \pm 1,3$ cm y de $461 \pm 60,3$ kg y $30,6 \pm 2,8$ cm. Las variables dependientes PC y CE fueron analizadas mediante un Modelo Lineal Mixto Generalizado (GLMM). En relación a PC, los efectos principales de edad del animal, la edad, peso del animal al destete, el plano nutricional y el hato de procedencia, así como las interacciones de hato×edad y plano nutricional×edad, presentaron efectos altamente significativos ($P < 0,001$), mientras que las variables de época de nacimiento y edad de la madre al parto tuvieron un efecto significativo ($P < 0,05$). Con respecto a CE, las variables que presentaron efectos altamente significativos ($P < 0,001$) fueron la edad del animal, la edad y peso del animal al destete, el plano nutricional, el hato de origen, así como las interacciones de hato×edad, plano nutricional×edad y edad de la madre×edad del ternero (efecto con menor significancia, pero igual de alto valor $P < 0,01$). Animales sometidos a un plano nutricional con mayor aporte energético, con políticas de destete a edades menores de los 7 meses de edad, con mayores pesos al destete e hijos de vacas menores de 8 años, presentaron promedios mayores de PC y CE durante el periodo de estudio (7 a 24 meses de edad). El destete temprano aunado a la optimización de las prácticas nutricionales tiene efectos positivos sobre el desarrollo de novillos en fincas de carne.

ABSTRACT

The potential effect of different environmental variables and management on the body weight (BW) and scrotal circumference (SC) was determined in Brahman (n = 485) and Nellore (n = 124) steers, with ages from 7 to 24 months from 11 herds in the North Pacific region of Costa Rica. The average BW and SC for steers with 7 and 24 months of age was 215 ± 38.5 kg and 15.8 ± 1.6 cm and 467 ± 96.7 kg and 31.5 ± 3.5 cm, respectively in the Brahman breed. Likewise, in the Nellore breed the average of these variables were 197 ± 33.2 kg and 14.3 ± 1.3 cm and 461 ± 60.3 kg and 30.6 ± 2.8 cm. The dependent variables of BW and SC were analyzed using a Generalized Linear Mixed Model (GLMM). In relation to BW, the main effects of age of the animal, the age and weight of the animal at weaning, nutritional plane and the origin herd, as well as the interactions of herd \times age and nutritional plane \times age, presented highly significant effects ($P < 0.001$), while the variables of season of birth and age at calving of mother had a significant effect ($P < 0.05$). With respect to CE, the effects that had highly significant ($P < 0.001$) were age of animal, age and weight of the animal at weaning, nutritional level, herd, as well as the interactions of herd \times age and nutritional plane \times age, mother age \times age effects (the last had less significant than the others but also a high level, $P < 0.01$). Animals with a diet with more energetic level, weaning at early ages (less than 7 months), higher weaning weights and sons of cows under 8 years, presented a better average of BW and SC in the study (7 to 24 months). Early weaning coupled with the optimization of nutritional practices has positive effects on the development of beef steers.

INTRODUCCIÓN

En los sistemas productivos de carne bovina aproximadamente dos terceras partes del costo total de producción están relacionadas con la alimentación de los animales, por lo que la implementación de estrategias que mejoren la eficiencia productiva, considerando aspectos como alimentación, reproducción, sanidad y el manejo general de la explotación, pueden mejorar significativamente la viabilidad económica de las empresas ganaderas (MAG, 2008; Urdaneta, 2009). Además, estas mejoras pueden ayudar a mitigar el impacto ambiental de la ganadería, ya que el conocimiento y mejoramiento de diferentes variables relacionadas con el desempeño productivo y reproductivo de los animales permite alcanzar las mismas metas de producción con menos cantidad de animales, en el mismo espacio de terreno y en menos tiempo, mejorando la sostenibilidad de la explotación ganadera (Arronis, 2003; Arronis, 2010; Basarb *et al.*, 2013).

El peso corporal (PC) junto con la condición corporal y la conversión alimenticia son las principales variables empleadas para definir la respuesta o rendimiento de los animales de engorde. Aquellos que tienen mayor potencial productivo ganan más peso, poseen una conversión alimenticia más alta y logran alcanzar el estado óptimo para su comercialización en menor tiempo (Kaps *et al.*, 1999; Yokoo *et al.*, 2010). Sin embargo, estas variables, así como la circunferencia escrotal (CE) y la edad a la que el animal alcanza la pubertad, pueden verse modificadas por factores como la nutrición, el clima y eventos sanitarios durante algunas etapas de desarrollo del animal. Durante el período de amamantamiento, el desarrollo del ternero depende principalmente de la habilidad materna de la vaca, expresada en términos de cantidad y calidad de la leche, mientras que una vez que el animal es destetado, empieza a expresar sus características genéticas dependiendo del manejo y el medio ambiente (Martínez *et al.*, 2003; Chacón *et al.*, 2000, 2002, 2014).

La CE puede considerarse como un indicador de la edad a la pubertad en machos y además se encuentra positivamente asociada a características de crecimiento corporal, por lo que puede ser utilizada como criterio de selección de los machos (Brinks *et al.*, 1978; Brinks, 1985; Evans *et al.*, 1999; Martínez *et al.*, 2003; Kealey *et al.*, 2006; Garmyn *et al.*, 2011). El tamaño testicular en toretes depende de su genética, varía con la raza y el peso corporal; asimismo, la CE está negativamente correlacionada con la edad a la pubertad.

En general, reproductores de las razas *Bos indicus* alcanzan la pubertad a un mayor peso y edad en comparación con sus homólogos *Bos taurus*. Se estima que los toretes *Bos indicus* en el trópico con una adecuada nutrición, alcanzan la pubertad a una edad promedio de 16 meses, con una CE entre 27-29 cm. La CE es el indicador ideal para predecir la edad a la pubertad y madurez sexual en toros, independientemente de su raza (Chacón, 2014).

El presente estudio se realizó con el objetivo de determinar si existe un efecto significativo de las variables de edad, hato de procedencia, raza, época de nacimiento, época de destete, edad y número de parto de la madre, plano nutricional y peso al destete, sobre el peso corporal y la circunferencia escrotal en toretes Brahman y Nellore en Costa Rica entre los 7 y 24 meses de edad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestra bajo estudio

Se utilizó una muestra de 609 toretes de los cuales 485 correspondieron a la raza Brahman, tanto Gris como Rojo y 124 a la raza Nellore. Los animales estaban distribuidos en 11 fincas del Pacífico Norte (Región Chorotega) de Costa Rica, manejadas bajo condiciones de pastoreo con suplementación mineral y, en algunos casos, suministro de concentrado. Además, todos los toretes eran puros inscritos en la Asociación Costarricense de Criadores de Cebú (ASOCEBÚ), estos animales constituyeron la muestra experimental de un estudio desarrollado por el Programa de Investigación en Andrología Animal Aplicada (PIAAA, código 054523), ejecutado por el Laboratorio de Andrología de la Escuela de Medicina Veterinaria de la Universidad Nacional (UNA), en el cual se les dio seguimiento desde los 7 hasta un máximo de 24 meses de edad, con el fin de estudiar aquellos factores asociados a su desarrollo testicular. De la investigación antes mencionada, se obtuvieron mediciones secuenciales cada 30 días de su peso corporal y circunferencia escrotal, así como información adicional sobre el mes/año de nacimiento, edad y peso al destete, identificación de padre y madre, raza, finca, tipo de suplementación recibida, así como el número de parto y edad de la madre. Todas las mediciones fueron llevadas a cabo siempre por el mismo operador.

Análisis estadístico descriptivo

El análisis estadístico descriptivo incluyó el cálculo de medidas de tendencia central y dispersión para las variables de peso corporal y circunferencia escrotal a distintas edades (Daniel, 2006). Además, se elaboraron tablas de frecuencia para las variables categóricas (raza, finca, época de nacimiento, edad de la madre al parto, año de destete, época de destete, tipo de manejo nutricional y número de parto). Estos análisis se realizaron mediante el programa estadístico SAS[®] (Statistical Analysis System, versión 9.3) (SAS, 2010).

Modelo Lineal Mixto Generalizado

El efecto de los factores raciales y ambientales sobre la circunferencia escrotal y peso corporal fue estudiado mediante un modelo lineal mixto generalizado desarrollado mediante el procedimiento GLIMMIX del programa estadístico SAS[®] versión 9.3 (SAS Institute Inc. 2010), empleando el método de Máxima Verosimilitud Restringida-REML (Harville 1977).

El modelo propuesto se representa de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_1 & 0 \\ 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad [1]$$

En donde:

- y_i , $i=1,2$ Corresponde al vector de observaciones para la i -ésima característica (CE y PC, medidas a su vez en diferentes edades).
- β_i , u_i y e_i , Son respectivamente los vectores de efectos fijos y residuales para la i -ésima característica.
- X_i y Z_i , Son las matrices de incidencia para efectos fijos de la i -ésima característica (Elzo, 1996; Martínez *et al.*, 2011).

El modelo asumió una distribución normal para ambas variables de respuesta, con una función de enlace identidad. Los efectos fijos (matriz X_i) considerados dentro del modelo fueron los siguientes:

- Edad del animal (12 Clases: 7,8,9,10,11,12,14,16,18,20,22,24, obtenida por redondeo al mes próximo superior).
- Edad al destete (3 Clases: <7 meses; 7 meses; >7 meses).

- Raza (2 Clases: Brahman y Nellore).
- Hato (11 Clases: 1 hasta 11).
- Época de nacimiento (2 Clases: Seca de Enero-Julio; Lluviosa, de Julio-Diciembre).
- Edad de la madre al parto (3 Clases: < 4 años, 4 a 8 años, > 8 años).
- Época de destete (2 Clases: Seca, de Enero-Julio; Lluviosa, de Julio-Diciembre).
- Plano nutricional (3 Clases: 1: Pastoreo y suplementación ad libitum con minerales; 2: Pastoreo, suplementación ad libitum con minerales y concentrado de 1.0 a <2,9kg/día; 3: Pastoreo, suplementación ad libitum con minerales y concentrado ≥ 3 kg/día).
- Número de parto (3 Clases: Primer parto; De 2-5 partos y ≥ 6 partos).
- Peso al destete: Covariable continua (kg).

Se evaluaron además las posibles interacciones entre los siguientes factores: Raza×Edad del animal, Hato×Edad del animal, Plano nutricional×Edad del animal, Número de parto×Edad del animal, Edad de la madre×Edad del animal, y Número de parto×Raza.

Los efectos aleatorios que se consideraron en el modelo fueron los siguientes:

- a_i : animal, Cuantifica el efecto de correlaciones causadas por mediciones secuenciales repetidas de PC y CE a distintas edades de un mismo animal. Se asumió una estructura de Auto correlación de Primer Orden, basado en el supuesto de que existe mayor relación entre mediciones de periodos consecutivos (Durbin y Watson, 1951).

RESULTADOS

Estadística descriptiva

En las tablas 1 y 2 se muestran los promedios (\pm DE) de CE y PC por edad para ambas razas. En total se realizaron 5915 mediciones individuales de PC y CE (78,3% en Brahman y 21,7% en Nellore). La variación en el tamaño de la muestra entre distintas edades es debida a que las edades de destete y llegada a la madurez sexual, utilizadas como criterios de entrada y salida al estudio, fueron heterogéneas entre animales.

Se observó un incremento marcado de PC y CE a lo largo del estudio. Para la raza Brahman, el PC promedio se incrementó desde 215 hasta 467 kg, y la CE desde 15,8 hasta 31,5 cm. Se observó una alta heterogeneidad entre individuos, con rangos de variación (Máximo – Mínimo) de hasta 508 kg para PC a los 22 meses y de 25 cm para CE a los 18 meses. Para la raza Nellore, el PC promedio se incrementó desde 197 hasta 461 kg, y la CE desde 14,3 hasta 30,6 cm. De igual manera se observó una alta heterogeneidad entre los individuos, con rangos máximos de variación de 439 kg para PC a los 22 meses y de 22 cm para CE a los 18 meses.

En la Tabla 3 se muestra la distribución de la muestra en estudio (n=609) con respecto a las variables categóricas. Las categorías con mayor representación en la muestra correspondieron a individuos nacidos/destetados en época lluviosa, de raza Brahman, provenientes del ható 6, con madres de 2 a 5 partos y edades entre 4 a 8 años, con edad de destete 7 meses y con plano nutricional de Pastoreo y Minerales. Los animales de raza Nellore se distribuyeron en 3 fincas mientras que los de raza Brahman se distribuyeron en 6 fincas, además 2 fincas contaban con animales de ambas razas.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las variables Peso Corporal y Circunferencia Escrotal de toros Brahman con edades entre los 7 y los 24 meses.

Edad (meses)	n	Peso Corporal					Circunferencia Escrotal				
		\bar{X}	DE	CV	Mín.	Máx.	\bar{X}	DE	CV	Mín.	Máx. ¹
7	215	214,9	38,5	17,9	120	355	15,8	1,6	9,9	12,2	19,9
8	416	232,3	41,8	18,0	120	415	16,7	1,6	9,8	12,7	21,0
9	460	244,6	47,9	19,6	126	448	17,3	1,8	10,3	13,0	23,4
10	471	256,4	53,3	20,8	128	460	18,0	2,1	11,8	13,2	29,0
11	459	269,0	59,1	22,0	128	495	18,8	2,4	12,8	14,0	28,8
12	454	284,8	64,2	22,5	175	554	19,9	2,8	14,2	14,3	33,7
14	429	317,7	71,0	22,3	191	590	22,3	3,5	15,7	15,4	38,8
16	385	348,8	75,5	21,6	210	633	24,8	3,9	15,6	16,1	38,6
18	362	379,9	78,0	20,5	205	666	26,9	3,8	14,0	18,4	43,0
20	315	411,5	80,8	19,6	250	710	28,8	3,6	12,5	18,7	37,9
22	243	442,2	91,0	20,6	260	768	30,3	3,6	11,8	19,1	38,7
24	189	466,9	96,7	20,7	280	787	31,5	3,5	11,2	22,5	40,8

¹Promedio (\bar{x}), Desviación Estándar (DE), Coeficiente de Variación (CV), Mínimo (Mín.), Máximo (Máx.)

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de las variables Peso Corporal y Circunferencia Escrotal de toros Nellore con edades entre los 7 y los 24 meses.

Edad (meses)	n	Peso Corporal					Circunferencia Escrotal				
		\bar{X}	DE	CV	Mín.	Máx.	\bar{X}	DE	CV	Mín.	Máx. ¹
7	92	196,5	33,2	16,9	131	291	14,3	1,3	9,2	11,6	18,9
8	118	211,0	36,8	17,5	142	330	15,0	1,6	10,8	11,6	20,0
9	123	227,6	43,5	19,1	153	361	15,8	1,8	11,6	12,5	23,4
10	122	246,0	49,4	20,1	158	400	16,6	2,2	13,4	13,3	26,6
11	120	263,2	55,1	20,9	166	433	17,6	2,7	15,2	13,8	27,8
12	119	285,8	59,6	20,9	191	458	18,9	3,3	17,4	13,9	29,2
14	111	324,3	60,9	18,8	231	482	21,3	3,9	18,3	15,9	35,8
16	106	365,5	68,0	18,6	254	534	24,3	4,2	17,3	17,6	37,5
18	97	394,0	75,4	19,1	263	612	26,4	4,2	16,1	17,9	40,0
20	85	423,0	83,9	19,8	300	645	28,1	3,8	13,4	18,9	40,5
22	72	443,1	78,1	17,6	316	755	29,3	3,2	10,8	20,5	38,5
24	52	461,2	60,3	13,1	354	618	30,6	2,8	9,2	23,9	37,5

¹Promedio (\bar{x}), Desviación Estándar (DE), Coeficiente de Variación (CV), Mínimo (Mín.), Máximo (Máx.)

Tabla 3. Distribución de animales (n=609) en función de las variables categóricas.

<u>Variables</u>	<u>Categorías</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Porcentaje</u>
		<u>Absoluta</u>	<u>(%)</u>
Época de nacimiento	Lluviosa	323	53,0
	Seca	286	47,0
Época de destete	Lluviosa	316	51,9
	Seca	293	48,1
Finca	1	23	3,8
	2	24	3,9
	3	19	3,1
	4	54	8,9
	5	37	6,1
	6	192	31,5
	7	11	1,8
	8	18	3,0
	9	95	15,6
	10	63	10,3
	11	73	12,0
Raza	Brahman	486	79,8
	Nellore	123	20,2
Número de parto de la madre	1 parto	132	21,7
	2 a 5 partos	383	62,9
	≥6 partos	94	15,4
Edad de la madre	< de 4 años	151	24,8
	4 a 8 años	362	59,4
	>8 años	96	15,8
Edad del destete	<7 meses	241	39,6
	7 meses	253	41,5
	>7 meses	115	18,9
Plano	Pastoreo + Min.	337	55,3
Nutricional	Pastoreo + Min.+ Conc ² . (1,0 -2,9 kg)	167	27,4
	Pastoreo + Min. + Conc. (≥3 kg)	105	17,2

²Minerales (Min), Concentrado (Conc.)

Análisis de Regresión

Tanto el modelo para PC como para CE convergieron de manera adecuada y los patrones de distribución de residuales se ajustaron de manera adecuada a los supuestos de normalidad y homogeneidad. Se observó una tendencia al incremento en magnitud de los residuales, asociado al aumento en edad de los animales.

En relación a PC, los efectos principales de edad del animal, la edad y peso del animal al destete, el plano nutricional y el hato, así como las interacciones de hato×edad, y plano nutricional×edad, presentaron efectos altamente significativos (Tabla 4, P<0,001), mientras que las variables de época de nacimiento y edad de la madre al parto tuvieron un efecto significativo (Tabla 4, P<0,05).

Tabla 4. Grados de Libertad (G.L), valores F y significancia estadística (Pr>F) para todos los efectos fijos evaluados sobre las variables dependientes Peso Corporal y Circunferencia Escrotal.

<u>Efectos evaluados</u>	<u>G.L</u>	<u>Peso Corporal</u>		<u>Circunferencia Escrotal</u>	
		<u>Valor F</u>	<u>Pr > F</u>	<u>Valor F</u>	<u>Pr > F</u>
Edad del animal	11	312,3	<0,001	461,45	<0,001
Época de nacimiento	1	5,10	0,02	1,81	0,18
Época de destete	1	0,58	0,45	0,71	0,40
Edad del animal al destete	2	26,47	<0,001	10,25	<0,001
Peso del animal al destete (Cov)	1	942,6	<0,001	278,88	<0,001
Plano nutricional	2	37,12	<0,001	4,76	<0,01
Número de parto de la madre	2	1,49	0,23	1,90	0,15
Edad de la madre	2	3,54	0,03	0,98	0,38
Hato	8	12,61	<0,001	9,71	<0,001
Raza	1	0,63	0,43	2,11	0,15
Raza×Edad del animal	11	1,25	0,25	1,61	0,09
Hato×Edad del animal	88	4,41	<0,001	3,26	<0,001
Plano nutricional×Edad del animal	22	7,63	<0,001	5,21	<0,001
Número de parto×Edad del animal	22	0,52	0,97	1,36	0,12
Edad de la madre×Edad del animal	22	0,81	0,72	2,02	<0,01
Número de parto×Raza	2	0,27	0,76	0,29	0,75

Con respecto a CE, los efectos principales de edad del animal, la edad y peso del animal al destete, el plano nutricional, el hato, así como las interacciones de hato×edad y plano nutricional×edad y edad de la madre×edad del animal presentaron efectos altamente significativos (Tabla 4).

Los estimados de covarianza entre mediciones repetidas de un mismo animal fueron de 0,88 (EE 0,005) para PC y 0,91 (EE 0,004) para CE, ambos significativos, indicando un ajuste adecuado de la estructura de Auto correlación de Primer Orden.

No se observaron efectos estadísticamente significativos para las demás variables en estudio sobre el PC y CE.

Tanto el PC como la CE mostraron patrones de incremento no lineales en relación con la edad del animal, con una pendiente más marcada en el periodo entre los 12 y 24 meses (Figura 1). Se observaron diferencias significativas entre algunas fincas, principalmente después de los 14 meses. Entre las fincas con PC más elevados estuvieron la 1, 2 y 6. Estas fincas presentaron en común que independientemente de la raza, en su mayoría se brindaba el plano nutricional 2 y 3, sus madres tenían menos de 8 partos, con edades entre los 5,5 y 6 años, además de un peso promedio al destete de 226 kg, mientras que las más bajas fueron 4, 5 y 7, a pesar de que estas fincas en promedio presentaron un peso al destete mayor (232kg), presentaban un destete a los 8 meses en promedio, y todas brindaban el plano nutricional 1. Además, sus madres en promedio tenían 6,5 años de edad, en cuanto a número de parto y raza presentaban condiciones similares (Figura 1, superior). De manera similar, las fincas con CE más alta fueron la 2, 6 y 9, mientras que las más bajas fueron 3, 5 y 11 (Figura 1, inferior).

Con respecto a la nutrición, se encontró que el PC fue significativamente mayor ($P < 0,001$) en animales con el plano 3, comparado con los planos 1 y 2 ($331,7 \pm 11,7$ versus $319,1 \pm 11,0$ kg y $321,1 \pm 11,4$ kg, respectivamente) (Figura 2). Sin embargo, las diferencias solo fueron estadísticamente diferentes hasta después de los 12 meses de edad. No se observaron diferencias significativas en el peso corporal de los toretes sometidos a los planos 1 y 2 ($P > 0,05$). Con respecto a la CE, los machos alimentados en el plano 3 presentaron mayores circunferencias que los alimentados en el plano 1 y 2 ($22,6 \pm 0,6$ cm versus $22,4 \pm 0,6$ cm y $22,4 \pm 0,6$ cm; $P < 0,05$). No obstante, este efecto se evidenció entre los 14 y 20 meses de edad.

En relación a las variables climáticas, solo se observó un efecto significativo (acumulativo) de la época de nacimiento sobre el peso corporal promedio. Los animales nacidos en época lluviosa presentaron un peso durante el estudio significativamente mayor

($P < 0,05$) con respecto a los nacidos en la época seca, con valores promedio de $327 \pm 3,18$ kg versus $321 \pm 3,13$ kg, respectivamente.

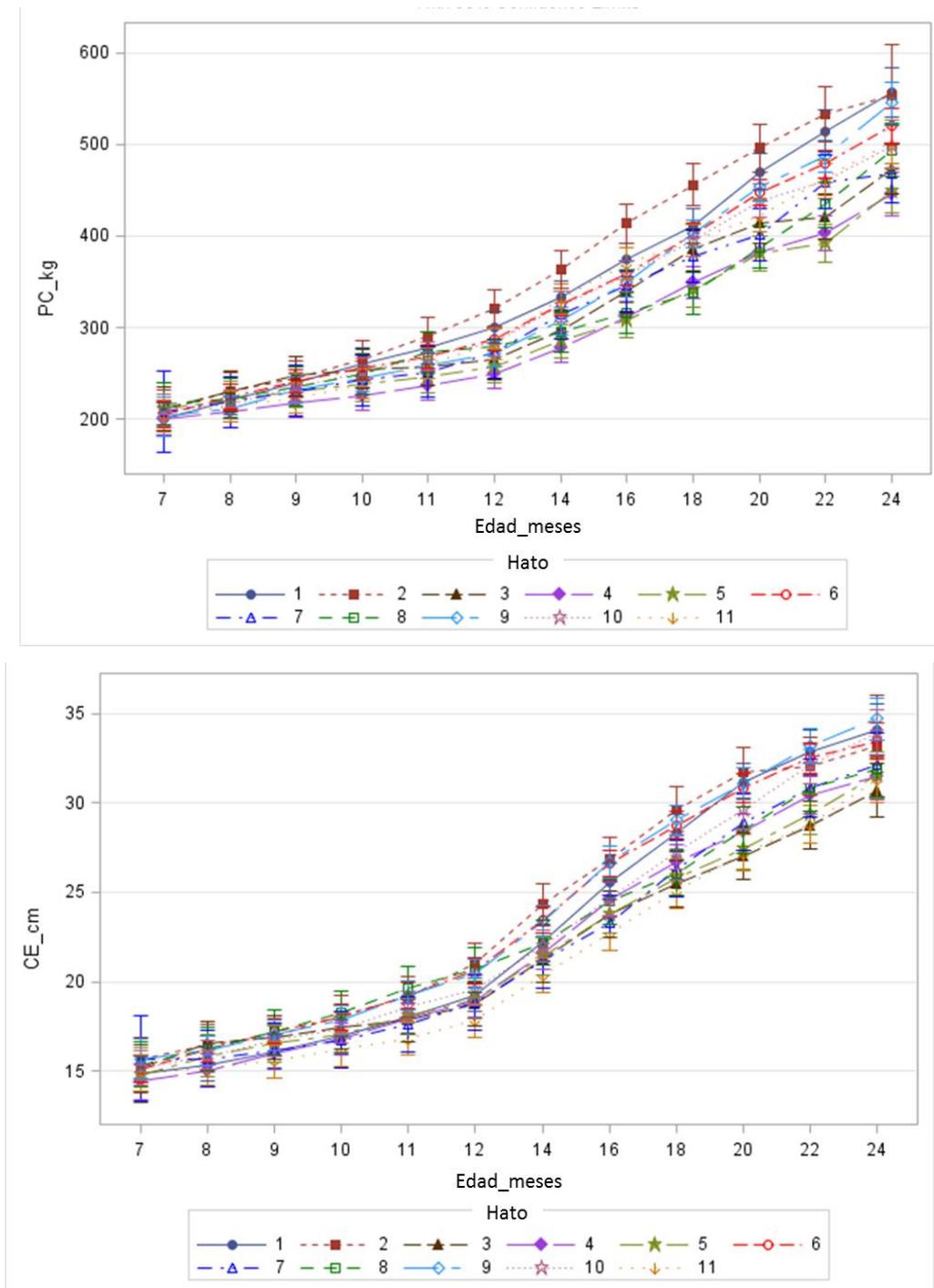


Figura 1. Medias marginales (con IC 95%) de Peso Corporal (PC_kg, arriba) y Circunferencia Escrotal (CE_cm, inferior) en función de la edad (meses) según hato de procedencia (series 1 a 11).

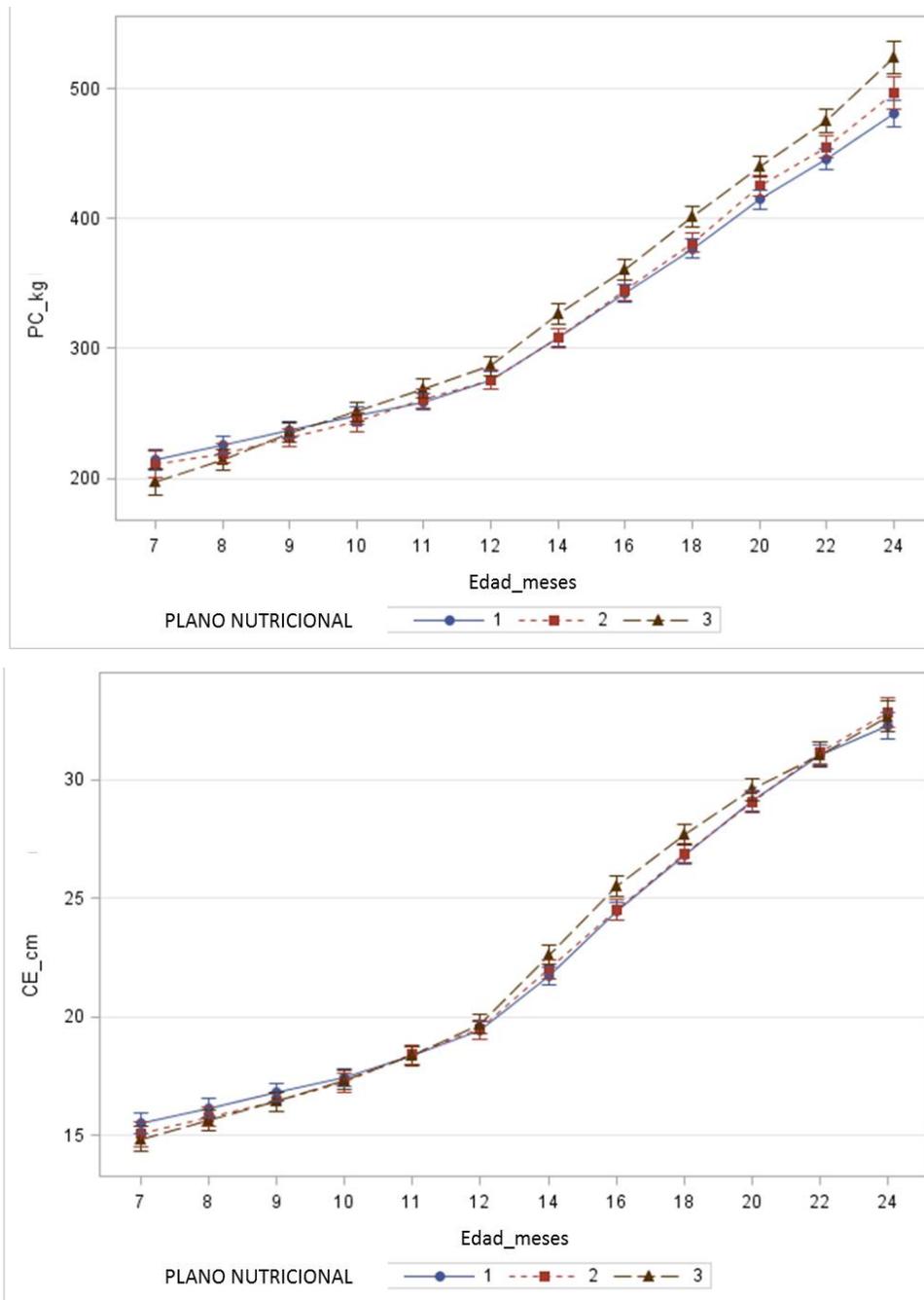


Figura 2. Medias marginales (con IC 95%) de Peso Corporal (PC, arriba) y Circunferencia Escrotal (CE, inferior) en función de la edad (meses) según plano nutricional (1: Pastoreo + minerales, 2: Pastoreo + minerales + 1,0 -2,9 kg de concentrado, 3: Pastoreo + minerales + ≥ 3 kg de concentrado).

Por otra parte, se encontró que los animales descendientes de madres menores de 4 años presentaron un mayor PC promedio que los toretes de madres mayores (Figura 3). Sin embargo, la interacción edad de la madre×edad, no fue significativa, por lo cual el efecto de la edad de la madre (vacas menores de 4 años) con respecto al PC es constante durante todo el período. Con respecto a la CE el efecto de la edad de la madre no fue estadísticamente significativa.

En cuanto al efecto de la edad del destete (Figura 4), se determinó que el peso promedio durante el estudio en animales sometidos a destete antes de los 7 meses de edad, fue significativamente mayor ($P<0,001$) que el de animales destetados a los 7 meses y edades posteriores (337, 324 y 306 kg respectivamente). Para CE, no se observaron diferencias significativas entre los grupos de destete de <7 meses y de 7 meses (22,8 cm y 22,7 cm, respectivamente, $P>0,005$), pero sí hubo diferencia significativa entre estos dos grupos y el de destete >7 meses (21,7 cm, $P<0,005$).

La covariable de peso al destete también influyó significativamente ($P<0,001$) sobre PC y CE, observándose un incremento de 1,29 kg \pm 0,04 en el promedio de PC y 0,04 cm \pm 0,002 en el promedio de CE, por cada incremento de 1 kg en peso al destete. En modelos previos se utilizó una interacción peso destete×edad, la cual no fue significativa por lo cual el efecto del peso al destete es constante durante el estudio a partir del destete.

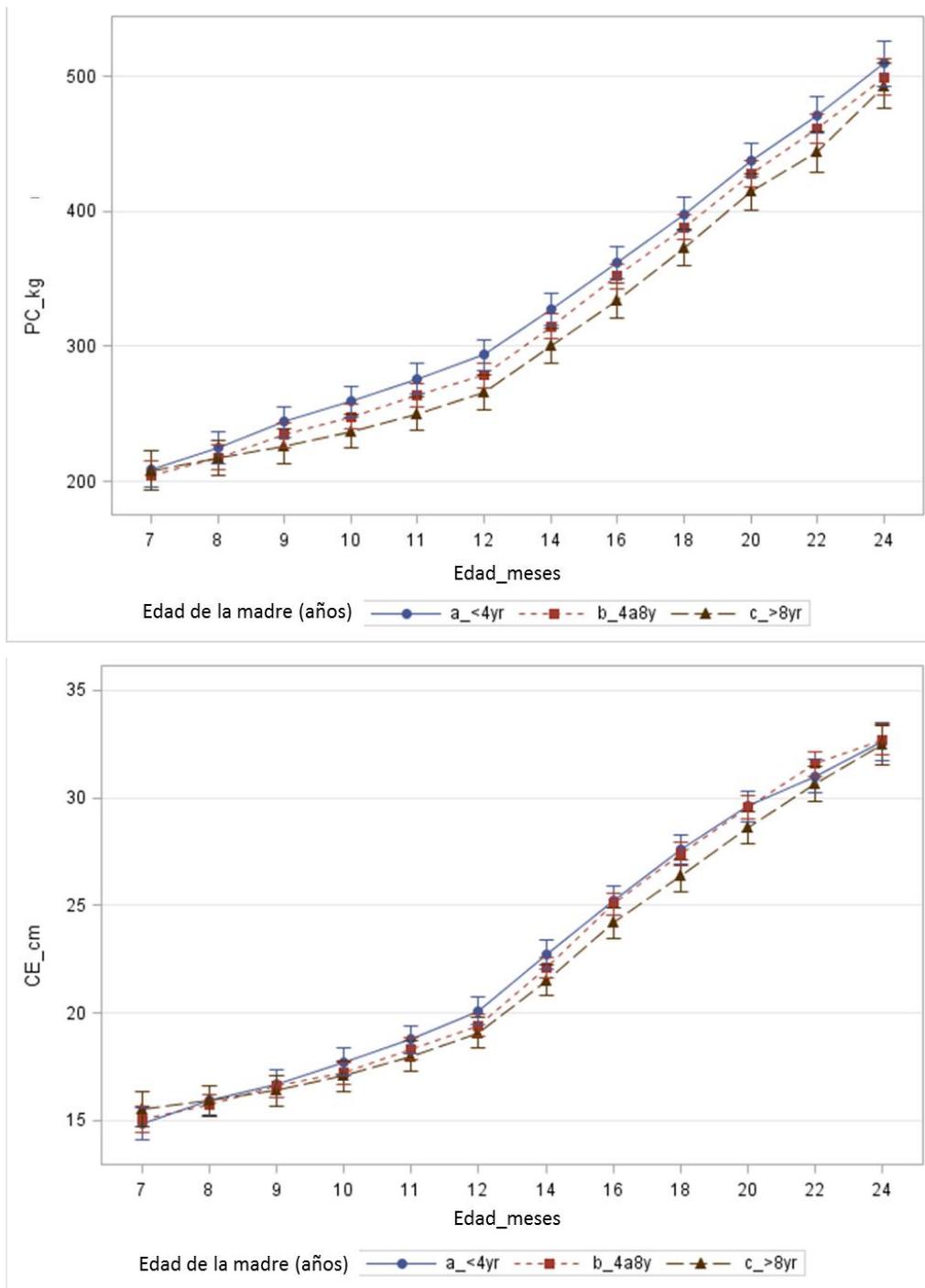


Figura 3. Medias marginales (con IC 95%) de Peso Corporal (PC_kg, arriba) y Circunferencia Escrotal (CE_cm, inferior) en función de la edad (meses) según categoría de edad de la madre (<4 años, ≥4-8 años, >8 años).

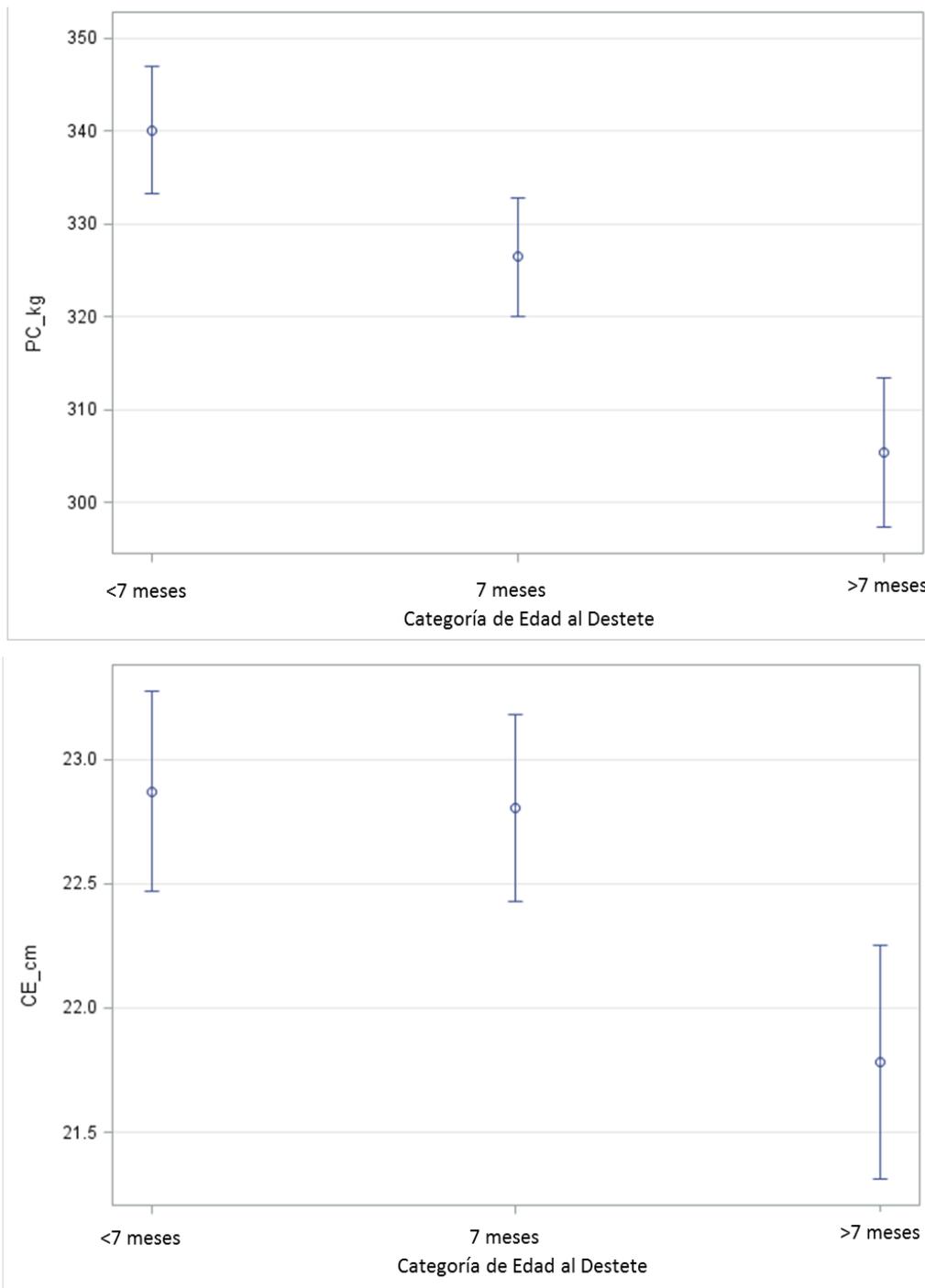


Figura 4. Medias marginales (con IC 95%) de Peso Corporal (PC_kg, arriba) y Circunferencia Escrotal (CE_cm, inferior) según categoría de edad del animal al destete.

DISCUSIÓN

En Costa Rica, la ganadería de carne se caracteriza por bajos índices productivos, particularmente en hatos comerciales de manejo extensivo, lo que se debe al efecto combinado de una serie de elementos, entre ellos, de manejo, climáticos, genéticos y sanitarios, los cuales afectan directa o indirectamente la eficiencia de este sistema (Rodríguez *et al.*, 2009).

El efecto de la edad del animal sobre el PC y CE, observado en esta investigación, va ligado al desarrollo natural del animal, que sigue una tendencia creciente desde el nacimiento hasta la edad adulta, ya que es una etapa en la que el animal presenta un proceso continuo y progresivo de crecimiento físico (Batista 2011). Los animales de razas Brahman y Nellore pueden presentar un patrón de crecimiento diferente al de otras razas, lo que se revela tanto en su precocidad como en el peso final obtenido en la madurez (Turner, 1980; Watts, 2013). En condiciones normales, conforme aumenta la edad del animal, también aumenta su PC y demás dimensiones corporales, aunque pueden existir casos en los que los animales aumenten de talla (alto y largo) y el aumento de PC no sea considerable (Watts, 2013).

Por otra parte, se ha documentado ampliamente que la CE posee una correlación positiva con el PC y la edad del animal (Elmore *et al.*, 1976; Coulter y Foote, 1977; Coulter *et al.*, 1987; Morris *et al.*, 1992; Boligon *et al.*, 2007; Yokoo *et al.*, 2007; Boligon *et al.*, 2010). Por lo tanto, el aumento de PC asociado a la edad, va de la mano también con un aumento en CE (Bourdon y Briks, 1986; Kennedy *et al.*, 2002 y Torres y Henry, 2005). Por esta razón, tanto el PC como la edad pueden ser utilizados para estimar la CE, mediante ecuaciones de regresión (Yáñez *et al.*, 1997).

El plano nutricional es una de las variables que presentó un efecto significativo en este estudio, tanto para PC como CE. Esto es importante, ya que es un factor que puede ser modificado por el hombre y que repercute directamente en el desarrollo del animal. La ingesta de energía influye sobre el desarrollo corporal y tiene efectos positivos sobre la expresión del potencial genético para la tasa de crecimiento y el desarrollo de los animales de producción. Además, la genética se va a expresar dependiendo de la habilidad de los animales para disponer de los nutrientes, de la influencia del sexo, la edad, la actividad física y factores ambientales (Lunstra *et al.*, 1978; 2003; Bourdon y Briks, 1986; Morris *et al.*, 1992; Brito *et al.*, 2004; Parkinson, 2004; Barth *et al.*, 2008).

En el presente estudio se observó que los animales mantenidos en el plano nutricional con suplementación de más de 3 kilos de concentrado por día, presentaron un mayor peso corporal con respecto a los otros dos grupos, principalmente de los 7 a los 9 meses ($P < 0,05$) y entre los 14 y 20 meses ($P < 0,001$). Esto demuestra que los cambios o mejoras dietéticas pueden tener un mayor impacto sobre el animal dependiendo del periodo en el que se realicen. Los toretes en el periodo peri puberal, presentan un punto de inflexión en su curva de crecimiento, que inicia de forma acelerada en los primeros meses de edad, pasando por una etapa de crecimiento desacelerado y llegando a una meseta cuando se alcanza el peso adulto (Kennedy *et al.*, 2002).

Con respecto a la CE, se observó el efecto del plano nutricional sobre esta variable, ya que la dieta tiene efectos positivos sobre la expresión del potencial genético para el comportamiento reproductivo de toros jóvenes, principalmente ligada a la condición corporal y la suplementación mineral (Lunstra *et al.*, 1978; 2003; Bourdon y Briks, 1986; Morris *et al.*, 1992; Brito *et al.*, 2004; Parkinson, 2004; Barth *et al.*, 2008). En el trópico costarricense, se ha documentado previamente el papel fundamental que juega la nutrición en el desempeño de los animales de producción y la relación positiva existente entre una adecuada condición corporal y cambios en la CE (Chacón *et al.*, 2002). Barth *et al.* (2008), reportan que una nutrición superior en las etapas de desarrollo de los toretes aumenta la secreción de gonadotropinas, resultando en testículos de mayor tamaño al año de edad y un inicio anticipado de la espermatogénesis.

Por otro lado, la relación inversa observada en el presente estudio entre la edad del destete, el PC y CE, puede deberse a que la evolución del peso de las crías, independientemente de la edad a la que se realice el destete, va a depender de la calidad y disponibilidad del forraje consumido, ya que, a partir de los 3 meses de edad, la ganancia de peso del ternero depende muy poco del consumo de leche (Montesano, 2001). Por esta razón, para alcanzar altas eficiencias productivas se suele incorporar la suplementación energética. Según Baker *et al.* (2001), a medida que progresa la lactancia disminuye la relación que existe entre la producción, el consumo de leche y el aumento de peso. Conforme aumenta la edad del ternero, aumenta también la cantidad de litros de leche requeridos para incrementar un kilo de PC, es decir que el proceso se vuelve menos eficiente y menos dependiente de la

madre. Por lo tanto, si el destete se realiza de forma temprana, el animal a pesar de tener un menor peso que sus homólogos mayores, podría tener una mejor conversión que estos, ya que la alimentación no dependerá de una cantidad de leche limitada, sino que será a base de pasto, minerales y concentrados, con lo que mejorará su desarrollo y se plasma en un peso promedio mayor que teneros destetados a edades mayores.

Esta mayor eficiencia de conversión en terneros de destete a edades más tempranas, se atribuye también a que los terneros de mayor edad poseen requerimientos un 20% mayores, debido al tamaño de los órganos metabólicamente activos (Baker *et al.*, 2001). La ganancia de peso de los terneros va a estar ligada a la cantidad de suplemento que se les brinde, siendo que un ternero de menor edad tendrá menores requerimientos, por lo que obtendrá una mayor eficiencia alimenticia y mejores pesos (Fluharty *et al.*, 2000), contrario a lo que se suele afirmar de que un mayor peso al destete está íntimamente ligado a un mayor peso adulto.

En congruencia con lo observado en el presente estudio, se ha reportado previamente que los animales que se destetan con pesos más altos también obtienen pesos mayores durante su desarrollo (Martínez *et al.*, 2008; Rodríguez *et al.*, 2009). Ese peso al destete puede estar asociado a factores maternos, como altas producciones de leche de la vaca. Otros factores que también pueden influir en el peso de destete son el manejo, la nutrición, la edad de destete, la edad de la madre o la condición corporal (Martínez *et al.*, 2011), tal y como se demostró en el presente estudio.

El peso de los terneros al momento del destete también está relacionado directamente con la edad del destete. Generalmente, a menor edad de destete hay menor peso, sin embargo, puede haber excepciones. Cuando el destete se hace de forma temprana, por lo general va acompañado de mayores cuidados, ya que la evolución del ternero depende de una adecuada calidad y cantidad de alimento (Martínez *et al.*, 2011). En este estudio se comprobó que el destete temprano tiene un efecto positivo sobre el desarrollo posterior del animal, por lo que la inversión en mayores cuidados al destete puede verse recompensada posteriormente.

En las ganaderías extensivas el destete tardío es más frecuente, teniendo como único recurso forrajero el pasto natural sin ninguna adición como pastos mejorados, gramíneas, leguminosas y menos aún suplementación con minerales o granos. En este estudio se demostró que destetar a los terneros antes de los 7 meses puede tener un efecto positivo sobre

el desarrollo posterior del animal, sin embargo, esto puede estar íntimamente ligado a prácticas de manejo, principalmente en el ámbito nutricional, para que así el animal pueda desarrollar su potencial genético y alcanzar pesos mejores que animales que se desteten a edades mayores (Schor *et al.*, 2005).

Un adecuado desarrollo y mantenimiento del animal durante la etapa de desarrollo no solo influye en su PC, sino también en el tamaño testicular y por ende en su CE, ya que estas variables son sumamente susceptibles a cambios que sufra el animal desde el destete hasta la pubertad y, como se mencionó previamente, existen correlaciones genéticas de moderadas a altas entre el PC a edades jóvenes y la CE (Knights *et al.*, 1984; Bourdon y Brinks, 1986).

En relación al efecto de la edad de la madre sobre la CE de los hijos, aquellos provenientes de vacas de >8 años presentaron menores CE durante el periodo de estudio. Depablos *et al.* (2013) reportaron que las vacas de edad más avanzada por lo general tienden a mostrar una disminución del peso promedio de los terneros al nacer. En esta investigación no se analizó el efecto del peso al nacimiento debido a que para muchos de los animales en estudio no se logró recabar la información de este valor. Además, al no haber datos de PC entre el nacimiento y el destete las curvas de crecimiento habrían sido muy imprecisas en esa etapa.

Si la madre, debido a su edad, produce menores cantidades de leche en comparación con vacas jóvenes, esto puede influir directamente en el desarrollo del animal durante sus primeros meses de vida, lo que puede resultar en terneros menos pesados al destete. Estas diferencias pueden deberse también a la calidad de la dieta empleada en vacas primerizas o de edades intermedias versus la de vacas viejas, las cuales, por desgaste fisiológico, paren y crían terneros menos pesados que las vacas de edad intermedia, ya que una madre de mayor edad por lo general no logra expresar su potencial para producir terneros de mayor peso (Rodríguez *et al.*, 2009).

En relación a CE, se ha reportado que esta variable está negativamente correlacionada con la edad de la madre (Bourdon y Briks, 1986; Yáñez *et al.*, 1997; Martínez *et al.*, 2003). Aun así, en el presente estudio esta variable no tuvo una influencia constante durante todo el desarrollo del torete, sino que su efecto se presenta en el período comprendido entre los 14 y 22 meses de edad ($27,2\pm 3,3$ cm, $27,2\pm 3,7$ cm y $26,3\pm 3,5$ cm; CE promedio de hijos de vacas

de <4años,4-8 años y >8años de edad, respectivamente) lo cual va muy ligado con el efecto observado para PC en el mismo periodo (Bourdon y Briks, 1986; Lustra *et al.*, 1988).

En el presente estudio, otra de las variables con efecto significativo sobre PC y CE fue el hato. Dado que los hatos estaban ubicados en una misma zona agroecológica, el efecto significativo de esta variable puede atribuirse mayormente a diferencias en el manejo como la dieta ofrecida a los animales, el manejo y calidad de pasturas, rotación de potreros, prácticas sanitarias y reproductivas, uso de registros y selección de animales, entre otras. Ya que esto sin duda influye en el desarrollo corporal de un animal, limitando o promoviendo la capacidad de los animales de expresar su potencial genético (Schenkel *et al.*, 2002; 2003; Schenkel *et al.*, 2004; Batista, 2011).

Ligado a lo anterior, el efecto significativo de hato×edad del animal, tanto para PC como para CE, deja ver que los patrones de crecimiento pueden diferir ampliamente entre hatos y en diferentes intervalos de edad. Esto sin duda alguna puede estar relacionado con prácticas de manejo específicas de cada hato. Las diferencias en manejo pueden tomar un papel relevante principalmente si se realizan cambios a edades específicas. Se pueden obtener mejores tasas de crecimiento sin necesidad de incurrir en mayor inversión de recursos, cuidado o trabajo durante todo el periodo de desarrollo luego del destete, ya que existen periodos de mayor susceptibilidad a la aplicación de estos cambios (Batista, 2011).

Además, aunque algunos hatos puedan presentar condiciones agroecológicas menos favorables que otros; los animales pueden desarrollarse y desempeñarse de manera adecuada si se les brinda suplementación estratégica a las vacas previo al parto y en periodo seco, además de un minucioso cuidado del periodo pre-puberal, aunado al uso de semen de toros con alto valor genético (Rodríguez *et al.*, 2009).

En esta investigación, la época de nacimiento tuvo un efecto significativo constante sobre el PC, ya que en un modelo estadístico previo se utilizó la interacción época de nacimiento×edad, la cual no tuvo un efecto significativo ($P>0,05$). Esto se puede deber principalmente a que en el país existen periodos en los que la disponibilidad de forraje en los sistemas de producción basados en pastoreo depende en gran medida de la precipitación pluvial y la planificación nutricional anual que se da en cada hato. En algunos periodos, el pasto puede ser escaso y las condiciones climáticas dificultan el pastoreo e incluso afectan el metabolismo, situación que afecta directamente a las madres en su preparación antes del

parto, y consecuentemente influyen sobre el tamaño que vaya a tener la cría al nacimiento y sus primeros días de vida. Además, afecta directamente la producción de leche de la madre y por ende el desarrollo del ternero en los primeros meses de vida (Martínez *et al.*, 2011).

A pesar de que las medias aritméticas para PC y CE fueron siempre superiores para los animales Brahman comparadas con sus homólogos Nellore (Tablas 1 y 2), el efecto de la raza no fue estadísticamente significativo sobre estas variables. Asimismo, las diferencias raciales fueron claramente superadas por factores de manejo (hato, nutrición) o maternos. Esto hace ver que el empleo de una raza específica no es garantía de un adecuado desarrollo de animales y que, por encima del factor racial, se debe pensar en el manejo reproductivo y nutricional del hato.

Tampoco se observaron en este estudio efectos significativos del número de parto. Esto es debido posiblemente a que, si la madre ha sido bien preparada y se le ha brindado la nutrición y controles adecuados, la cría tendrá un desarrollo apropiado, indiferentemente del número de parto. No obstante, se debe considerar también la posible confusión de efectos entre las variables de edad de la madre y el número de parto.

Por último, no se encontraron efectos significativos de la época de nacimiento sobre CE ni de la época de destete sobre PC y CE. Esto difiere a lo reportado por Chacón *et al.* (2002), quienes encontraron que la época o el mes del año tuvieron un efecto significativo sobre la CE de toros Brahman adultos en el trópico. Una posible diferencia es que, en los animales evaluados en este estudio, el factor ambiental no influenció el PC y la CE al destete, ni la época en que nació el individuo afectó la CE, debido a factores como una adecuada suplementación nutricional, un manejo en finca eficiente y que por ser individuos jóvenes son sometidos a más cuidados, menos trabajo o exposición a adversidades climáticas como pasa con los animales adultos, lo cual subsana los posibles efectos ambientales en estas dos etapas (Pruitt *et al.*, 1986).

CONCLUSIONES

El presente estudio ratifica la importancia de factores relacionados con el manejo sobre el PC y la CE en animales de razas Brahman y Nellore. Los cuales, al ser sometidos a un plano nutricional con mayor nivel energético, con políticas de destete menor a los 7 meses, con mayores pesos al destete e hijos de vacas menores de 8 años, presentaron un mejor desarrollo en PC y CE promedio durante la época de estudio (7-24 meses de edad). Por lo tanto, el destete temprano aunado a la optimización de las prácticas nutricionales tiene efectos positivos sobre el desarrollo de toretes en fincas de carne.

Para incrementar la productividad de las fincas bovinas de carne es necesario aplicar programas de salud de hato que incluyan de forma sostenida el mejoramiento y control de factores nutricionales, sanitarios, ambientales, genéticos o de manejo general. La implementación de diferentes controles como nutricionales, ganancias de peso, edad del animal según la etapa productiva en la que se encuentra e índices reproductivos, pueden tener influencia marcada en los niveles de producción de cada hato. Además, estos controles permiten tomar decisiones en los momentos más importantes, como al seleccionar los futuros reproductores o al momento de descartar un animal que no posee los valores productivos ideales para llevar a término las metas productivas del establecimiento.

La utilización rutinaria de metodologías de evaluación genética y productiva de los reproductores debe ser una herramienta que se emplee con mayor frecuencia, para ejecutar estimaciones cada vez más precisas de los diversos factores que pueden llegar a afectar el desarrollo de un semental durante las etapas claves del destete y la pubertad. El conocimiento sobre cuáles son estos factores y en qué momento el desarrollo el animal es más vulnerable a su efecto, permitirá manejar de una forma más sencilla y rutinaria el desarrollo y selección de toretes con fines reproductivos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arronis, D.V. 2003. Recomendaciones técnicas sobre sistemas intensivos de producción de carne: estabulación, semiestabulación y suplementación estratégica en pastoreo. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). San José, Costa Rica.
- Arronis, D.V. 2010. Manual de Recomendaciones sobre sistemas intensivos de producción de carne. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). San José, Costa Rica
- Baker, J.F., S.V. Tucker, R.C. Vann. 2001. Effects of Tuli, Senepol, Brahman, Angus, and Polled Hereford sire breeds on birth and weaning traits of offspring. *Prof. Anim. Sci.* 17:160-165.
- Barth, A.D., F.C. Brito, y J.P. Kastelic. 2008. The effect of nutrition on sexual development of bulls. *Theriogenology.* 70:485–494.
- Basarb, J.A., K.A. Beauchemin, V.S. Baron, K.H. Ominski, L.L. Guan, S.P. Miller, y J.J. Crowley. 2013. Reducing GHG emissions through genetic improvement for feed efficiency: effects on economically relevant traits and enteric methane. *Animal.*7:303-315. doi: 10.1017/S1751731113000888.
- Batista, J. 2011. Relación y correlación existente entre circunferencia escrotal, peso corporal y edad, en toros Brahman de 18 a 60 meses de edad en la provincia de Chiriquí. REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63616932004>. (Consultado: 21 feb. 2016)
- Boligon, A. A., P. R. N. Rorato, and L. G. Albuquerque. 2007. Correlações genéticas entre medidas de perímetro escrotal e características produtivas e reprodutivas de fêmeas da raça Nelore. *R. Bras. Zootec.* 36:565–571.
- Boligon, A.A., J.A.V. Silva, R.C. Sesana, J.C. Sesana, J.B. Junqueira, y L.G. Albuquerque. 2010. Estimation of genetic parameters for body weights, scrotal circumference, and testicular volume measured at different ages in Nelore cattle. *J. Anim. Sci.* 88:1215–1219.
- Bourdon, R.M., y J.S. Brinks. 1986. Scrotal circumference in yearling Hereford bulls: adjustment factors, heritabilities and genetic, environmental and phenotypic relationships with growth traits. *J. Anim. Sci.* 62: 958-967.
- Brito, L.F., A.E. Silva, M.M. Unanian, M.A. Dode, R.T. Barbosa y J.P. Kastelic. 2004. Sexual development in early and late-maturing *Bos indicus* and *Bos indicus* x *Bos taurus* crossbred bulls in Brazil. *Theriogenology.* 62: 1198 – 1217.
- Brinks, J.S. 1985. Genetics of fertility traits in bulls. *Proc. Ann. Meet. Soc. Of Theriogenology.*56-64.
- Brinks, J.S., M.J. McInverney, y P.J. Chenoweth. 1978. Relationship age at puberty in heifers to reproductive trait in young bulls. *Amer. Anim. Sci. Proceeding of Western Section.*28-30.
- Chacón, J. 2000. Breeding soundness evaluation of Zebu bulls: with special reference to variations in clinical parameters and sperm characteristics in sires extensively managed in the dry tropics of Costa Rica. Thesis (doctoral)--Swedish University of Agricultural Sciences.

- Chacón, J., E. Pérez, y H. Rodríguez-Martínez. 2000. Seasonal variations in testicular consistency, scrotal circumference and spermogramme parameters of extensively reared Brahman (*Bos indicus*) bulls in the tropics. *Theriogenology*. 58:41-50.
- Chacón, J., E. Pérez, y H. Rodríguez-Martínez. 2002. Seasonal variations in testicular consistency, scrotal circumference and spermogramme parameters of extensively reared Brahman (*Bos indicus*) bulls in the tropics. *Theriogenology*. 58:41-50.
- Chacón, J. 2014. Applied andrology in cattle (*Bos indicus*). En: P. Chenoweth, y S. Lorton, editors, *Animal andrology: theories and applications*. Australia. p. 352-389.
- Coulter, G.H. y R. Foote. 1977. Relationship of body weight to testicular size and consistency in growing Holstein bulls. *J. Anim. Sci.* 44: 1076 – 1079.
- Coulter, G.H., R.J. Mapletoft, G.C. Kozub, D.R.C. Bailey y W.F. Cates. 1987. Heritability of scrotal circumference in one and two-year-old bulls of different beef breeds. *Can. J. Anim. Sci.* 67:645-651.
- Daniel, W. 2006. *Bioestadística: Base Para El Análisis de Las Ciencias de la Salud*. 4ta. ed. Limusa Wiley, México.
- Depablos, L., F. Pacheco, G. Martínez y D. Vargas. 2013. Factores no genéticos y de grupo racial que afectan el peso al destete en un sistema de producción con vacunos de carne en el municipio de Pao de San Juan Bautista, Venezuela. *Livestock. Res. Rural. Dev.* 25(1):17.
- Dunn, T.G., y G.E. Moss. 1992. Effects of Nutrient Deficiencies and Excesses on Reproductive Efficiency of Livestock. *J. Anim. Sci.* 70:1580-1593.
- Durbin, J., y G.S. Watson. 1951. Testing for Serial Correlation in Least-Squares Regression. *Biometrika*. 38:159-171.
- Elmore, R.G., C.J. Bierschwal y R.S. Youngquist. 1976. Scrotal circumference measurements in 764 beef bulls. *Theriogenology*. 6:485-494.
- Elzo, M.A. 1996. Unconstrained procedures for the estimation of positive definite covariance matrices using restricted maximum likelihood in multibreed populations. *J. Anim. Sci.* 74:317–328.
- Evans, J.L., B.L. Golden, R.M. Bourdon, y K.L. Long. 1999. Additive genetic relationships between heifer pregnancy and scrotal circumference in Hereford cattle. *J. Anim. Sci.* 77:2621-2628.
- Fluharty, F., S. Loerch, S. Turner, S. Moeller y Lowe. G. 2000. Effects of weaning age and diet on growth and carcass characteristics in steers. *J. Anim. Sci.* 78: 1759-1767.
- Garmyn, A.J., D.W. Moser, R.A. Christmas, y J. Minick-Bormann. 2011. Estimation of genetic parameters and effects of cytoplasmic line on scrotal circumference and semen quality traits in Angus bulls. *J. Anim. Sci.* 89:693–698.
- Harville, H. 1977. Maximum likelihood approaches to variance component estimation and to related problems. *Jour. Am. Stat. Assoc.* 72:320-388.
- Kaps, M., W.O. Herring, y W.R. Lamberson. 1999. Genetic and environmental parameters for mature weight in Angus cattle. *J. Anim. Sci.* 77:569–574.
- Kealey, C.G., M.D. MacNeil, M.W. Tess, T.W. Geary, y R.A. Bellows. 2006. Genetic parameter estimates for scrotal circumference and semen characteristics of Line 1 Hereford bulls. *J. Anim. Sci.* 84:283–290.
- Kennedy, S.P., J.C. Spitzer, H.L. Hopkins, H.L. Higdon y W.C. Bridges. 2002. Breeding soundness evaluation of 3648 yearling beef bulls using the 1993 Society for Theriogenology guidelines. *Theriogenology*. 58: 947 – 961.

- Knights, S.A., R.L. Baker, D. Gianola, y J.B. Gibb. 1984. Estimates of heritabilities and of genetic and phenotypic correlations among growth and reproductive traits in yearling Angus bulls. *J. Anim. Sci.* 58: 887-893.
- Lunstra, D.D., J.J. Ford y S.E. Echternkamp. 1978. Puberty in beef bulls: Hormone concentrations, growth, testicular development, sperm production and sexual aggressiveness in bulls of different breeds. *J. Anim. Sci.* 46: 1054 - 1066.
- Lunstra, D.D. y L.V. Cundiff. 2003. Growth and pubertal development in Brahman, Boran, Tuli, Belgian Blue, Hereford and Angussired F1 bulls. *J. Anim. Sci.* 81: 1414 -1426.
- Martínez, V.G., K.E. Gregory, G.L. Bennett, y L.D. Van Vleck. 2003. Genetic relationships between scrotal circumference and female reproductive traits. *J. Anim. Sci.* 81:395–401.
- Martínez, G. J., A. M. Azuara, J. M. Hernández, G. M. Parra y S. P. Castillo. 2008. Características pre-destete de bovinos Simmental (*Bos taurus*) y sus cruces con Brahman (*Bos indicus*) en el trópico mexicano. *Rev. Col. Cien. Pecu.* 21:365-371.
- Martínez, G. J., J. F. Gutiérrez, F. Briones, F. Lucero y S. Castillo. 2011. Factores no genéticos que afectan el peso al nacer y destete de terneros Angus. *Zootecnia Trop.* 29: 151-159.
- Montesano, A., H. Béguet, O. Bocco, M. Chaves y E. Bagnis. 2001. Incidencia de la edad del destete sobre el crecimiento post-destete y la madurez sexual en un ciclo completo. Congreso de la Asociación Latinoamericana de Producción Animal. La Habana, Cuba.
- Morris, C.A., R.L. Baker, N.G. Cullen, y P. Boyd. 1992. Genetic parameters for body weight, scrotal circumference, and serving capacity in beef cattle. *N. Z. J. Agric. Res.* 35:195-198.
- Parkinson, T.J. (2004). Evaluation of fertility and infertility in natural service bulls. *The Veterinary Journal.* 168: 215 – 229.
- Pruitt, R.J. y L.R. Corah. 1986. Effect of energy intake after weaning on the sexual development of beef bulls. II. Age at first mating, age at puberty, testosterone and scrotal circumference. *J. Anim. Sci.* 63: 579 - 585.
- Rodríguez, Y., G. G. Martínez y R. G. Galíndez. 2009. Factores no genéticos que afectan el peso al destete en vacunos Brahman registrados. *Zootecnia Trop* 27:163-173.
- SAS Institute Inc. 2010. SAS/STAT 9.22 User's Guide.
- Schor, A., G. Guibelalde y J. Grigera. 2005. Efecto de la fecha de destete sobre la performance de vientres y terneros. *Revista Argentina de Producción Animal.* 25: 179-188.
- Schenkel, F. S., Miller, J. Jamrozik y J. W. Wilton. 2002. Two-step and random regression analyses of weight gain of station-tested beef bulls. *J. Anim. Sci.* 80: 1497–1507.
- Schenkel, F. S., S. P. Miller, y J. W. Wilton. 2003. Herd of origin effect on weight gain of station-tested beef bulls. *Livest. Prod. Sci.* 86: 93–103.
- Schenkel, F. S., S. P. Miller y J. W. Wilton. 2004. Genetic parameters and breed differences for feed efficiency, growth, and body composition traits of young beef Bulls. *Can. J. Anim. Sci.* 84: 177–185.
- Torres, J.R. y M.M. Henry. 2005. Sexual development of Guzerat bulls raised in a tropical region. *Anim. Reprod.* 2:114 – 121.
- Turner, J.W. 1980. Genetic and Biological Aspects of Zebu Adaptability. *J. Anim. Sci.* 50:1201-1205.

- Urdaneta, F. 2009. Mejoramiento de la eficiencia productiva de los sistemas de ganadería bovina de doble propósito (Taurus-Indicus). Arch. Latinoam. Prod. Anim. 17: 109-120.
- Watts, R. 2013. Livestock and Animal Products in the Tropics - Containing Information on Zebu, Cattle, Swine, Buffalo and Other Tropical Livestock. ReadBooks Ltd. 30 páginas.
- Yáñez, L., N. Madrid, R. Contreras, y Rincón, U.E. 1997. Relaciones de circunferencia escrotal con edad y peso corporal en toros mestizos. Arch. Latinoam. Prod. Anim. 5: 479-481.
- Yokoo, M. J. I., L. G. Albuquerque, R. B. Lobo, R. D. Sainz, J. M. C. Júnior, L. A. F. Bezerra, and F. R. C. Araujo. 2007. Estimativas de parâmetros genéticos para altura do posterior, peso e circunferência escrotal em bovinos da raça Nelore. R. Bras. Zootec. 36:1761–1768.
- Yokoo, M.J., R.B. Lobo, F.R. Araujo, L.A. Bezerra, R.D. Sainz, y L.G. Albuquerque. 2010. Genetic associations between carcass traits measured by real-time ultrasound and scrotal circumference and growth traits in Nelore cattle. J. Anim. Sci. 88:52-58.

CAPITULO II

ESTIMACIÓN DE LA HEREDABILIDAD Y CORRELACIONES GENÉTICAS PARA
LA CIRCUNFERENCIA ESCROTAL Y PESO CORPORAL A DIFERENTES EDADES
EN TORETES BRAHMAN

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue estimar parámetros poblacionales de heredabilidad y correlaciones genéticas para las variables Peso Corporal (PC) y Circunferencia Escrotal (CE) en 485 toretes Brahman puros, procedentes de 8 hatos, ubicados en la zona Pacífico Norte de Costa Rica. Las estimaciones se realizaron mediante dos metodologías alternativas: Modelo animal bivariado de regresión aleatoria (MRA) y un Modelo animal multivariado (MMV). Ambos modelos consideraron los efectos fijos de hato, año de nacimiento, época de nacimiento, nivel de nutrición, edad de destete y número de parto de la madre. Se agregaron además los efectos aleatorios de ambiente permanente (solo para MRA) y el efecto genético aditivo del animal. La genealogía incluyó un total de 3000 animales distribuidos en 7 generaciones. Los estimados de heredabilidad (h^2) para CE y PC obtenidos por MRA tendieron a ser mayores que los obtenidos mediante el MMV (0,58 y 0,85 versus 0,49 y 0,55, respectivamente). Según ambos modelos, los mayores valores de h^2 para PC se obtuvieron a los 10 y 11 meses de edad tanto para los modelos de MMV (0,61 y 0,57) y MRA (0,91 y 0,92), mientras que para CE se obtuvieron a los 7, 11 y 22 meses de edad según el MMV (0,75, 0,70 y 0,71, respectivamente) y a los 18 y 20 meses mediante el MRA (0,68 y 0,72, respectivamente). Las correlaciones genéticas entre mediciones de PC a distintas edades oscilaron entre 0,67 y 1 según MRA (los valores más altos se encontraron entre los meses 9 y 10, 10 y 11, 11 y 12, 12 y 14, 14 y 16, 16 y 18) y entre 0,61 y 0,99 según MMV (los valores más altos se obtuvieron entre los meses 8 y 9, 14 y 16). En cuanto a la CE, las correlaciones oscilaron entre 0,43 y 1, según MRA, obteniendo los valores más altos entre los meses 16 y 18 y entre 0,13 y 1, según MMV, obteniendo los valores más altos entre los meses 7 y 8, 10 y 11. Las correlaciones genéticas entre PC y CE variaron entre 0,55 y 0,94, según MRA. Los altos valores de h^2 y las correlaciones positivas entre ambos rasgos, sugieren que la selección para PC y CE se puede hacer desde edades tempranas.

ABSTRACT

The objective of the present study was to estimate parameters of heritability and genetic correlations for body weight (BW) and scrotal circumference (SC) in 485 Brahman pure-breed bulls from 8 herds in the North Pacific region of Costa Rica. The estimates were obtained using two alternative methodologies: bivariate random regression animal model (RRM) and multivariate animal model (MVM). Both models considered the fixed effects of herd-year of birth, season of birth, level of nutrition, age at weaning and number of calve of the mother. Random permanent environmental (only for RRM) and animal additive genetic effect were also considered. The genealogy included a total of 3000 animals distributed in 7 generations. The estimates of heritability (h^2) obtained for SC and BW by RRM tended to be higher than those obtained by the MVM (0.58 and 0.85, versus 0.49 and 0.55 respectively). According to both models, the highest values of h^2 for BW were obtained at ages 10 and 11 months for the MVM (0,61 y 0,57, respectively) and for the RRM (0,91 y 0,92, respectively). For SC highest values of h^2 were obtained at ages 7, 11 and 22 months, according to the MVM (0.75, 0.70 and 0.71, respectively); and ages 18 and 20 months, according to RRM (0.68 and 0.72, respectively). The genetic correlations between measurements of BW at different ages ranged from 0.67 to 1, according to RRM (the highest values were found between the 9-10, 10-11, 11-12, 12-14, 14-16 and 16-18 months); and from 0.61 to 0.99, according to MMV (the highest values were found between the 7-8 and 10-11 months). For SC, respective correlations ranged from 0.43 to 1, according to the RRM; and from 0.13 to 1 according to MMV. Genetic correlations between measurements of BW and SC varied between 0.55 and 0.94, according to RRM. In all cases, the correlations obtained tended to decrease as the distance between measurements increased. The high values of h^2 and positive correlations between both traits, suggest that selection for BW and SC can be performed at an early age.

INTRODUCCIÓN

La selección de toros reproductores es una de las actividades más importantes en las fincas ganaderas de carne; principalmente para las que adoptan el sistema de monta natural y por ende tienen que criar o comprar padrotes garantizados. A pesar de lo anterior, en muchas ocasiones los toros son adquiridos sin considerar factores asociados con su potencial reproductivo y su contribución al mejoramiento genético de su descendencia. Por esta razón, un adecuado programa de selección para mejorar la fertilidad de un hato debe hacer uso de las características productivas y reproductivas que presentan coeficientes de heredabilidad medios o altos, así como correlaciones genéticas favorables entre sí y con otros parámetros importantes para el sistema productivo, como lo son las variables relacionadas con el crecimiento (Siddiqui *et al.*, 2008, Yoko *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2011).

Dentro de los parámetros reproductivos de importancia, la circunferencia escrotal (CE) ha sido señalada como una característica que debe ser incluida en los programas de selección de toros de carne, ya que está genéticamente asociada de manera favorable a la calidad seminal (Kealy *et al.*, 2006). En toros Hereford, se han obtenido correlaciones genéticas (r_g) favorables entre CE y rasgos seminales como la concentración del eyaculado (0,77), motilidad (0,34), porcentaje de espermias vivos (0,63) y con morfología normal (0,33). Lo anterior sugiere que la presión de selección que se aplique para aumentar la CE puede conllevar a mejoras complementarias en todas estas variables (Kealy *et al.*, 2006).

La CE puede ser utilizada en toros de carne como útil indicador de la calidad seminal, desarrollo testicular y de la capacidad reproductiva. Además, la selección de sementales por CE influye directamente sobre la fertilidad de los toros y de su hijas e hijos (Rusk *et al.*, 2002; Latif *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2011). También tiene un efecto directo sobre la precocidad más específicamente, la edad a la que alcanzan la pubertad (Vargas *et al.*, 1998; Morris *et al.*, 1989; Chacón, 2014).

Los estimados de heredabilidad (h^2) de la circunferencia escrotal a diferentes edades en toros cebú criados bajo condiciones tropicales son escasos, por lo que el uso de este parámetro como herramienta para la selección de reproductores es limitado. Dicha situación provoca que se deba esperar incluso hasta 24 meses o más para diagnosticar si un semental es satisfactorio como reproductor (Martínez *et al.*, 2003; Garmyn *et al.*, 2011). Ese tiempo

de espera se puede traducir en pérdidas económicas debido al impacto negativo sobre la eficiencia productiva del establecimiento a mediano y largo plazo, a raíz de la inversión de tiempo y dinero en la cría y desarrollo de padrotes que no logran alcanzar los estándares mínimos de CE.

Para la estimación de parámetros genéticos en rasgos que son medidos secuencialmente a lo largo de vida de un animal se han utilizado principalmente dos modelos. Uno de ellos es el multivariado, en el cual las medidas secuenciales son consideradas como distintos rasgos, lo que deriva en un modelo estadístico muy demandante en términos computacionales, ya que implica la estimación de un alto número de componentes de varianza (Kirkpatrick *et al.*, 1990; Meyer, 1998; Nobre *et al.*, 2003; Meyer, 2005). Recientemente, se ha propuesto como alternativa el uso de modelos de regresión aleatoria, en los cuales las mediciones secuenciales en diferentes edades de un mismo individuo se consideran como repeticiones de un mismo carácter, para lo cual se utilizan funciones ortogonales de covarianza para modelar las tendencias de un rasgo como una función continua del tiempo (Meyer, 2005; Martínez *et al.*, 2011).

Las curvas de PC y CE del ganado normalmente tienen una forma sigmoidea, que se puede modificar debido a los efectos genéticos y ambientales. Este patrón puede ser ajustado de manera más adecuada con modelos de regresión aleatoria que con modelos multivariados, ya que en estos últimos se presupone que todos los animales presentan curvas similares y que los demás efectos son constantes, sin considerar posibles diferencias genéticas entre animales (Meyer, 1998; Domínguez *et al.*, 2011). Otra ventaja del uso de funciones de covarianza es que una vez obtenidos los parámetros de la función, se pueden calcular medidas genéticas a diferentes edades (Meyer, 2001, 2005; Nobre *et al.*, 2003). Las funciones de covarianza han sido utilizadas previamente para describir la variabilidad del crecimiento en función de la edad (Kirkpatrick *et al.*, 1990; Meyer 2001, 2005). Kirkpatrick *et al.* (1990) propusieron el uso de polinomios ortogonales para ajustar funciones de covarianza entre observaciones tomadas a lo largo del tiempo en un mismo individuo. Entre las ventajas de los polinomios ortogonales están su adecuada bondad de ajuste, su flexibilidad para modelar el mérito genético y la estructura de covarianzas, y el hecho de que tienden a presentar una varianza residual menor (Jamrozik *et al.*, 1996; Rekaya *et al.*, 1999; Macciotta *et al.*, 2005).

El objetivo del presente estudio fue obtener estimados de h^2 y r_g para PC y CE de bovinos Brahman bajo pastoreo con suplementación en edades entre los 7 y 24 meses, utilizando para ello un modelo multivariado *versus* un modelo de regresión aleatoria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Población de estudio

Se utilizó una muestra de 485 toretes de raza Brahman, pertenecientes a 8 hatos ubicados en el Pacífico Norte (Región Chorotega) de Costa Rica, manejados bajo condiciones de pastoreo con suplementación mineral y, en algunos casos, suministro de concentrado. Estos animales formaron parte de un estudio previo desarrollado por el Programa de Investigación en Andrología Animal Aplicada coordinado por el laboratorio de Andrología de la Escuela de Medicina Veterinaria (UNA), en el cual se les dio seguimiento desde los 7 hasta los 24 meses de edad por el mismo operador.

De la investigación antes mencionada, se obtuvieron mediciones secuenciales mensuales de circunferencia escrotal y peso corporal a partir del momento en que se destetaron los toretes. Se registraron además otras variables como fecha de nacimiento, identificación de padre y madre, finca, tipo de suplementación recibida, así como número de parto y edad de la madre.

Modelos de análisis genético

Para el análisis genético se determinó la genealogía ascendente de los animales participantes en el estudio con base en los registros históricos de los hatos disponible en la Asociación Costarricense de Criadores de Cebú (ASOCEBÚ). Este archivo incluyó un total de 3000 animales distribuidos en 7 generaciones.

Los rasgos de CE y PC fueron analizados mediante dos distintos modelos: Modelo animal bivariado de regresión aleatoria (en adelante MRA) y modelo animal multivariado (en adelante MMV).

En el enfoque bivariado de regresión aleatoria, ambas variables (CE y PC) se analizaron de manera conjunta en un solo modelo, con el fin de obtener estimados de varianza/covarianza para mediciones de CE y PC a distintas edades. Adicionalmente, las

mediciones secuenciales de CE y PC de un mismo animal fueron consideradas como mediciones repetidas del mismo rasgo y ajustadas mediante una función de covarianza.

Para el presente estudio se consideró adecuado un polinomio Legendre de segundo orden, con base en la tendencia observada en semivariogramas construidos para ambas variables a lo largo del rango de edades analizado.

La estructura asumida para el modelo MRA fue la siguiente:

$$y_1/y_2 = \mu + Ha + Ep + Nu + De + Pa + Plg_2(ed) + [Plg_2(ed)]an + [Pl_2(ed)]pe + e \quad [1]$$

(y_1/y_2)	Peso Corporal (y_1) y Circunferencia escrotal (y_2) con mediciones repetidas a edades 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22 y 24 meses (edades redondeadas al mes próximo superior),
μ	Media general común a todas las observaciones,
Ha	Efecto fijo de grupo contemporáneo conformado por categorías combinadas de 8 hatos y 3 años de nacimiento (2002, 2003 y 2004),
Ep	Efecto fijo de época de nacimiento (Clases: Seca (Enero a Julio); Lluviosa (Julio a Diciembre),
Nu	Efecto fijo del nivel de nutrición (Clases: 1: Pastoreo y minerales, 2: Pastoreo, minerales y de 1 a 2,9 kg de concentrado por día; 3: Pastoreo, minerales y ≥ 3 kg de concentrado/día),
De	Efecto fijo de la edad de destete (Clases: 1: (<7 meses), 2: (7 meses) y 3: (>7 meses),
Pa	Efecto fijo del número de parto (Clases: 1: Primer parto; 2: De 2 a 5 partos; 3: ≥ 6 partos),
$Plg_2(ed)$	Efecto general de la edad, modelado mediante un Polinomio Legendre de segundo orden,
$[Plg_2(ed)]an$	Efecto genético aditivo del animal, ligado a la genealogía, con variación aleatoria para mediciones realizadas en distintas edades, modelado mediante un Polinomio Legendre de segundo orden,
$[Plg_2(ed)]pe$	Efecto ambiental permanente, con variación aleatoria para mediciones realizadas en distintas edades, modelado mediante un Polinomio Legendre de segundo orden,
e	Variación residual aleatoria, con heterogeneidad asumida para mediciones realizadas en distintas edades de una misma variable,

Este modelo fue resuelto mediante el programa computacional VCE[®] versión 6.0 (Groeneveld, 2008) empleando el método de Máxima Verosimilitud Restringida REML (Harville, 1977) con algoritmos de convergencia basados en gradientes analíticos. Dado que las matrices de varianza y covarianza resultantes de VCE[®] corresponden a los coeficientes de la función de regresión aleatoria, los estimados de h^2 y correlaciones genéticas para PC y

CE a distintas edades requieren ser calculados posteriormente, según procedimiento descrito por Groeneveld *et al.* (2008) utilizando el procedimiento IML de SAS® (Statistical Analysis System) versión 9.3 (SAS Institute Inc. 2010).

Para el segundo enfoque (modelo MMV) las variables PC y CE fueron analizadas por separado mediante 2 modelos multivariados idénticos. Por restricciones computacionales no fue posible correr un solo modelo de 24 rasgos. En estos modelos las mediciones a diferentes edades fueron consideradas como variables separadas. La estructura de este modelo multivariado, en formato matricial, fue la siguiente:

$$y = \mathbf{Xb} + \mathbf{Za} + \mathbf{e} \quad [2]$$

Donde:

- y** = Vector de observaciones de CE (o PC), correspondiente a mediciones realizadas en edades 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22 y 24 meses,
- b** = vector de efectos fijos,
- a** = vector de efectos aleatorios genéticos aditivos directos, relacionados con el animal y ligado a la genealogía,
- e** = vector de efectos aleatorios residuales,
- X,Z** = matrices de incidencia para efectos fijos (**X**) y aleatorios (**Z**).

Los efectos fijos considerados en este modelo fueron los mismos descritos anteriormente para el modelo 1 (*Ha, Ep, Nu, De y Pa*). Este modelo fue resuelto mediante el programa computacional VCE® versión 6.0 (Groeneveld *et al.*, 2008) empleando el método de Máxima Verosimilitud Restringida REML (Harville, 1977). En este caso los valores de heredabilidad y correlaciones genéticas para mediciones de PC y CE a distintas edades fueron calculados directamente por el programa.

RESULTADOS

El peso corporal y circunferencia escrotal de los animales mostraron un comportamiento ascendente en promedio desde los 7 hasta los 24 meses de edad ($215,1 \pm 38,5$ kg a $466,8 \pm 96,7$ kg y $15,8 \pm 1,6$ cm a $31,6 \pm 3,5$ cm respectivamente) (Tabla 1). Para ambas variables, se observa un amplio rango de variación dentro de cada estrato de edad, con coeficientes de variación consistentemente mayores en PC a lo largo de todo el periodo. Los mayores coeficientes de variación (CV) para ambas variables se observan en el periodo entre 12 y 16 meses de edad (Tabla 1). Cabe señalar que el número de observaciones de PC y CE disponibles para cada estrato de edad varió entre un mínimo de 189 (24 meses) y un máximo de 470 (10 meses).

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las variables Peso Corporal y Circunferencia Escrotal de toros Brahman con edades entre los 7 y 24 meses.

<u>Edad</u> (meses)	<u>n</u>	<u>Peso Corporal</u>					<u>Circunferencia Escrotal</u>				
		\bar{X}	DE	CV	Mín.	Máx.	\bar{X}	DE	CV	Mín.	Máx.
7	213	215,1	38,5	17,9	120	355	15,8	1,6	10,1	12	20
8	414	232,5	41,8	18,0	120	415	16,8	1,7	10,1	13	21
9	458	244,8	47,9	19,6	126	448	17,4	1,8	10,3	13	23
10	470	256,5	53,2	20,7	128	460	18,1	2,1	11,6	13	29
11	458	269,1	59,1	22,0	128	495	18,9	2,4	12,7	14	29
12	452	284,8	64,2	22,5	175	554	20,0	2,9	14,5	14	34
14	428	317,8	71,0	22,3	191	590	22,4	3,5	15,6	15	39
16	384	348,9	75,5	21,6	210	633	24,8	3,9	15,7	16	39
18	361	380,0	78,1	20,6	205	666	27,0	3,7	13,7	18	43
20	314	411,5	80,9	19,7	250	710	28,9	3,6	12,5	19	38
22	243	442,2	91,0	20,6	260	768	30,4	3,6	11,8	19	39
24	189	466,9	96,7	20,7	280	787	31,6	3,5	11,1	23	41

Modelo bivariado de regresión aleatoria (MRA)

El modelo ajustado no logró converger hasta una solución óptima, sin embargo, se observó una clara tendencia hacia la reducción de los valores de verosimilitud, lo que sugiere que los componentes de varianza obtenidos son probablemente cercanos al óptimo (Groeneveld *et al.*, 2008). Para confirmar esta tendencia, se corrió el modelo iterativo

utilizando distintos conjuntos de valores iniciales, según lo sugerido por Groeneveld *et al.* (2008), dando por resultado soluciones similares, aunque no idénticas.

Para ambas variables (PC y CE), se observó una tendencia marcada de incremento conforme aumenta la edad, tanto en la varianza fenotípica como en la varianza genética aditiva (animal) (Figura 1, izquierda). Por el contrario, los estimados de varianza correspondiente al ambiente permanente y la varianza residual fueron de baja magnitud, con ligeros incrementos solo para edades mayores a 20 meses.

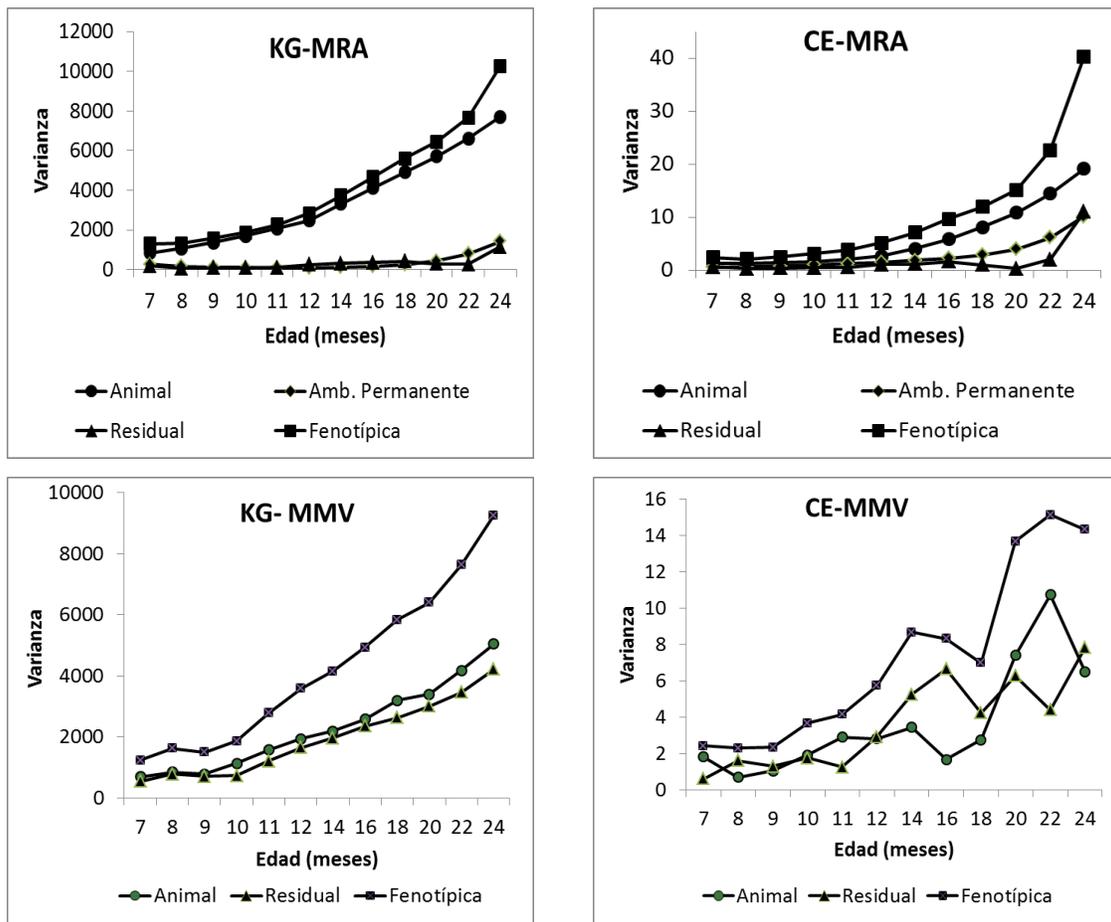


Figura 1. Estimados de varianza para los componentes genético aditivo (animal), ambiente permanente, residual y fenotípico; correspondientes a las variables Peso Corporal (izquierda) y Circunferencia Escrotal (derecha), en toretes Brahman con edades entre los 7 y 24 meses de edad, obtenidos a partir de un modelo animal bivariado de regresión aleatoria (MRA) y un modelo animal multivariado (MMV).

Las correlaciones genéticas entre mediciones de PC a distintas edades, estimadas a partir del modelo MRA, fueron positivas y de alta magnitud, todas mayores o iguales a 0,67 (Tabla 2). Se observó una tendencia a la reducción en magnitud de las correlaciones conforme aumentó el tiempo transcurrido entre las mediciones.

Tabla 2. Correlaciones genéticas para mediciones de peso corporal de toretes Brahman entre los 7 y 24 meses de edad, obtenidas a partir de un modelo de regresión aleatoria (MRA).

Edad (meses)	Correlaciones genéticas (según edad)											
	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	24
7		0,98	0,95	0,91	0,88	0,85	0,81	0,79	0,76	0,74	0,71	0,67
8	0,98		0,99	0,97	0,95	0,94	0,90	0,88	0,85	0,82	0,78	0,73
9	0,95	0,99		1,00	0,99	0,97	0,95	0,93	0,91	0,87	0,83	0,77
10	0,91	0,97	1,00		1,00	0,99	0,98	0,96	0,94	0,90	0,85	0,79
11	0,88	0,95	0,99	1,00		1,00	0,99	0,97	0,95	0,92	0,87	0,81
12	0,85	0,94	0,97	0,99	1,00		1,00	0,99	0,97	0,94	0,89	0,83
14	0,81	0,90	0,95	0,98	0,99	1,00		1,00	0,98	0,96	0,92	0,86
16	0,79	0,88	0,93	0,96	0,97	0,99	1,00		1,00	0,98	0,95	0,90
18	0,76	0,85	0,91	0,94	0,95	0,97	0,98	1,00		0,99	0,97	0,93
20	0,74	0,82	0,87	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	0,99		0,99	0,97
22	0,71	0,78	0,83	0,85	0,87	0,89	0,92	0,95	0,97	0,99		0,99
24	0,67	0,73	0,77	0,79	0,81	0,83	0,86	0,90	0,93	0,97	0,99	

Escala de coloración: verde a rojo (mayor magnitud) en función de la magnitud de la correlación.

Para CE se observó una tendencia similar, aunque las correlaciones genéticas obtenidas a diferentes edades fueron de menor magnitud, oscilando entre 0,43 y 1,0 (Tabla 3). Las correlaciones entre CE a 7 meses *versus* edades mayores a 12 meses fueron siempre menores a 0,50. Todas las demás correlaciones fueron superiores a 0,60.

Tabla 3. Correlaciones genéticas para mediciones de circunferencia escrotal de toretes Brahman entre los 7 y 24 meses de edad, obtenidas a partir de un modelo de regresión aleatoria (MRA).

<u>Edad</u> <u>(meses)</u>	<u>Correlaciones genéticas (según edad)</u>											
	<u>7</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>11</u>	<u>12</u>	<u>14</u>	<u>16</u>	<u>18</u>	<u>20</u>	<u>22</u>	<u>24</u>
7		0,96	0,87	0,77	0,67	0,59	0,49	0,45	0,43	0,43	0,44	0,45
8	0,96		0,97	0,91	0,84	0,78	0,70	0,65	0,63	0,62	0,61	0,60
9	0,87	0,97		0,98	0,94	0,91	0,84	0,80	0,78	0,75	0,73	0,71
10	0,77	0,91	0,98		0,99	0,97	0,93	0,90	0,87	0,84	0,81	0,78
11	0,67	0,84	0,94	0,99		0,99	0,97	0,95	0,92	0,89	0,86	0,82
12	0,59	0,78	0,91	0,97	0,99		0,99	0,97	0,95	0,92	0,89	0,84
14	0,49	0,70	0,84	0,93	0,97	0,99		0,99	0,98	0,96	0,93	0,88
16	0,45	0,65	0,80	0,90	0,95	0,97	0,99		1,00	0,98	0,96	0,92
18	0,43	0,63	0,78	0,87	0,92	0,95	0,98	1,00		0,99	0,98	0,95
20	0,43	0,62	0,75	0,84	0,89	0,92	0,96	0,98	0,99		0,99	0,98
22	0,44	0,61	0,73	0,81	0,86	0,89	0,93	0,96	0,98	0,99		0,99
24	0,45	0,60	0,71	0,78	0,82	0,84	0,88	0,92	0,95	0,98	0,99	

Escala de coloración: verde a rojo en función de la magnitud de la correlación

Las correlaciones genéticas entre CE y PC a diferentes edades fueron también positivas y en su mayoría superiores a 0,75, oscilando entre 0,55 y 0,94 (Tabla 4). Las correlaciones entre mediciones de CE y PC realizadas a una misma edad variaron desde 0,63 (7 meses) a 0,92 (24 meses).

Tabla 4. Correlaciones genéticas entre mediciones de Circunferencia Escrotal (Izquierda) y Peso Corporal (Superior) de toretes Brahman entre los 7 a 24 meses de edad, obtenidas a partir de un modelo de regresión aleatoria (MRA).

<u>Edad</u> <u>(meses)</u>	<u>Correlaciones genéticas (según edad)</u>											
	<u>7</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>11</u>	<u>12</u>	<u>14</u>	<u>16</u>	<u>18</u>	<u>20</u>	<u>22</u>	<u>24</u>
7	0,63	0,61	0,59	0,58	0,56	0,55	0,55	0,56	0,57	0,59	0,61	0,62
8	0,70	0,72	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,74	0,75	0,76	0,76	0,75
9	0,73	0,78	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,86	0,86	0,85	0,83
10	0,72	0,80	0,84	0,87	0,88	0,89	0,91	0,92	0,92	0,92	0,90	0,86
11	0,70	0,79	0,85	0,88	0,89	0,91	0,93	0,94	0,94	0,94	0,91	0,88
12	0,68	0,78	0,84	0,87	0,89	0,91	0,93	0,94	0,95	0,94	0,92	0,88
14	0,65	0,75	0,81	0,85	0,87	0,89	0,91	0,93	0,94	0,94	0,92	0,88
16	0,64	0,73	0,79	0,82	0,85	0,86	0,89	0,91	0,93	0,93	0,92	0,89
18	0,64	0,72	0,77	0,80	0,82	0,84	0,86	0,89	0,91	0,92	0,92	0,91
20	0,64	0,70	0,74	0,77	0,79	0,80	0,83	0,86	0,89	0,91	0,92	0,92
22	0,63	0,69	0,72	0,73	0,75	0,76	0,79	0,82	0,86	0,89	0,91	0,92
24	0,63	0,67	0,68	0,70	0,71	0,72	0,75	0,78	0,82	0,86	0,90	0,92

Escala de coloración: verde a rojo en función de la magnitud de la correlación

Modelo Multivariado (MMV)

En el caso de los modelos MMV ajustados para PC y CE, ambos convergieron a soluciones óptimas. Los estimados de varianza obtenidos presentaron tendencias similares a los observados para MRA (Figura 1, derecha), con valores crecientes de la varianza fenotípica y genética aditiva (animal) en ambos rasgos, conforme al incremento en edad de los animales. Para CE, los valores obtenidos fueron más fluctuantes, principalmente entre los 14 a 24 meses, pero con tendencia general al incremento. En ambos rasgos, los valores de varianza residual estimados por MMV tendieron a ser mayores en comparación a los obtenidos por MRA.

Las correlaciones genéticas para PC a distintas edades, obtenidas mediante MMV, presentaron tendencias similares a las obtenidas por MRA (Tabla 5), aunque ligeramente inferiores en magnitud. De nuevo se observó una tendencia marcada a la reducción en las correlaciones conforme se incrementó la distancia entre las mediciones. Para CE, las correlaciones obtenidas por MMV también fueron inferiores que las obtenidas mediante MRA, pero con diferencias mucho más marcadas a las observadas para PC. Asimismo, la

tendencia fue menos consistente a la observada con MRA, ya que se observaron marcadas fluctuaciones y altibajos en algunos de los estimados (Tabla 6).

Tabla 5. Correlaciones genéticas para mediciones de peso corporal de toretes Brahman entre los 7 y 24 meses de edad, obtenidas a partir de un modelo multivariado.

<u>Edad</u> (meses)	<u>Correlaciones genéticas (según edad)</u>											
	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	24
7		0,89	0,83	0,75	0,71	0,68	0,67	0,68	0,66	0,67	0,65	0,61
8	0,89		0,99	0,90	0,84	0,81	0,78	0,81	0,77	0,78	0,76	0,70
9	0,83	0,99		0,92	0,85	0,82	0,78	0,82	0,77	0,78	0,76	0,70
10	0,75	0,90	0,92		0,95	0,90	0,87	0,87	0,83	0,85	0,82	0,75
11	0,71	0,84	0,85	0,95		0,96	0,92	0,92	0,86	0,88	0,86	0,78
12	0,68	0,81	0,82	0,90	0,96		0,96	0,95	0,89	0,91	0,88	0,80
14	0,67	0,78	0,78	0,87	0,92	0,96		0,98	0,91	0,93	0,91	0,82
16	0,68	0,81	0,82	0,87	0,92	0,95	0,98		0,96	0,96	0,93	0,84
18	0,66	0,77	0,77	0,83	0,86	0,89	0,91	0,96		0,97	0,93	0,84
20	0,67	0,78	0,78	0,85	0,88	0,91	0,93	0,96	0,97		0,96	0,86
22	0,65	0,76	0,76	0,82	0,86	0,88	0,91	0,93	0,93	0,96		0,88
24	0,61	0,70	0,70	0,75	0,78	0,80	0,82	0,84	0,84	0,86	0,88	

Escala de coloración: verde a rojo en función de la magnitud de la correlación

Tabla 6. Correlaciones genéticas para mediciones de Circunferencia Escrotal de toretes Brahman entre los 7 y 24 meses de edad, obtenidas a partir de un modelo multivariado (MMV).

<u>Edad</u> (meses)	<u>Correlaciones genéticas (según edad)</u>											
	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	24
7		1,00	0,35	0,58	0,58	0,53	0,31	0,50	0,22	0,57	0,34	0,40
8	1,00		0,35	0,58	0,58	0,53	0,31	0,50	0,22	0,57	0,34	0,41
9	0,35	0,35		0,90	0,88	0,70	0,59	0,60	0,18	0,21	0,28	0,18
10	0,58	0,58	0,90		0,98	0,79	0,59	0,57	0,13	0,25	0,19	0,15
11	0,58	0,58	0,88	0,98		0,86	0,69	0,69	0,22	0,32	0,26	0,21
12	0,53	0,53	0,70	0,79	0,86		0,85	0,77	0,34	0,49	0,34	0,17
14	0,31	0,31	0,59	0,59	0,69	0,85		0,75	0,44	0,32	0,47	0,25
16	0,50	0,50	0,60	0,57	0,69	0,77	0,75		0,69	0,74	0,68	0,64
18	0,22	0,22	0,18	0,13	0,22	0,34	0,44	0,69		0,73	0,59	0,55
20	0,57	0,57	0,21	0,25	0,32	0,49	0,32	0,74	0,73		0,69	0,66
22	0,34	0,34	0,28	0,19	0,26	0,34	0,47	0,68	0,59	0,69		0,83
24	0,40	0,41	0,18	0,15	0,21	0,17	0,25	0,64	0,55	0,66	0,83	

Escala de coloración: verde a rojo en función de la magnitud de la correlación

Estimados de heredabilidad (MRA versus MMV)

Para el peso corporal, los estimados de h^2 obtenidos por MRA fueron mayores que los obtenidos por MMV (Figura 2), con un promedio de 0,85 (rango entre 0,64 y 0,91). Los estimados de h^2 para PC fueron mayores a los 10 y 18 meses. Para MMV, se observó una tendencia más uniforme de h^2 para PC a distintas edades, con valores que fluctuaron entre 0,52 y 0,61, con un promedio de 0,55.

Para la circunferencia escrotal, los estimados de h^2 obtenidos por MRA fueron menos fluctuantes y heterogéneos que los obtenidos por MMV (Figura 3). Los estimados obtenidos por MRA oscilaron entre 0,48 y 0,72, con un promedio de $h^2=0,58$. Por el contrario, los valores obtenidos por MMV variaron ampliamente desde 0,20 a 0,75, con un promedio de 0,49.

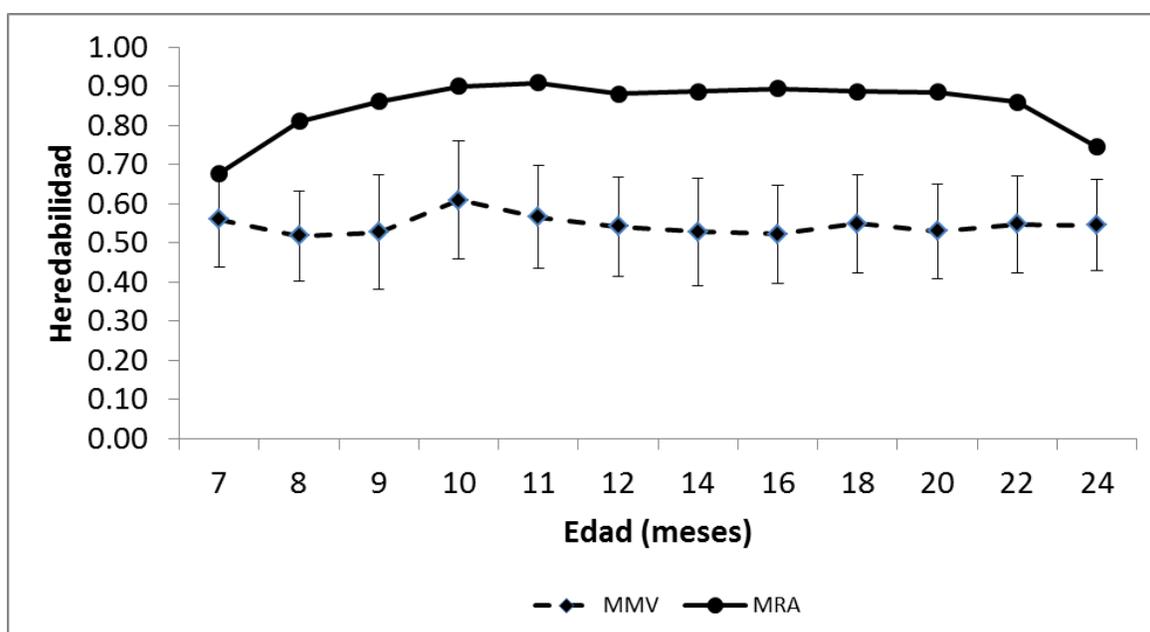


Figura 2. Índices de heredabilidad (h^2) del Peso Corporal a diferentes edades obtenidos a partir de un modelo animal multivariado (MMV) y un modelo animal bivariado de regresión aleatoria (MRA).

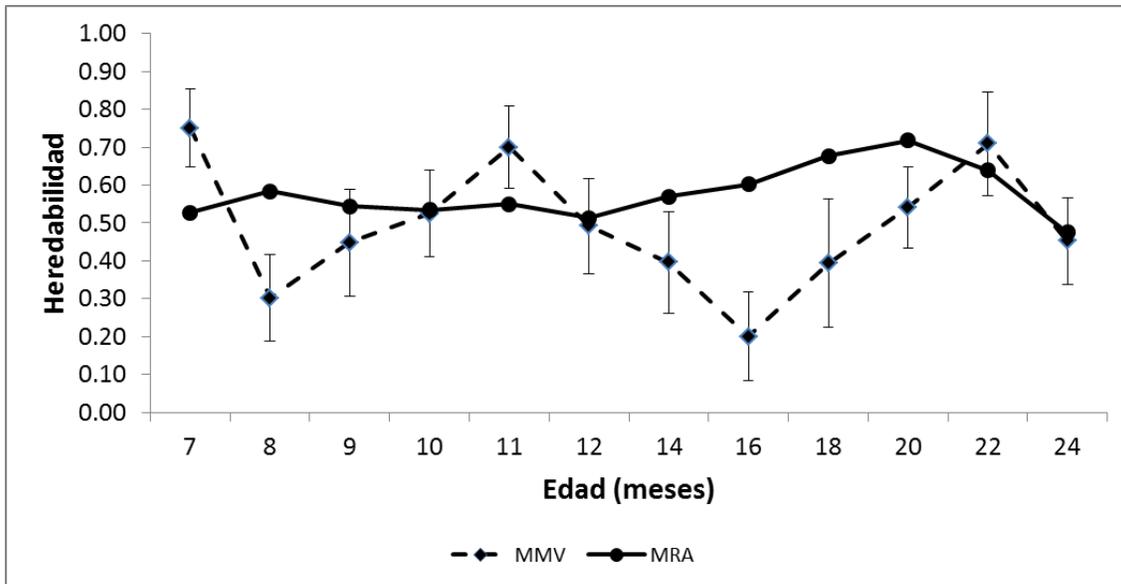


Figura 3. Índices de heredabilidad (h^2) de Circunferencia Escrotal a diferentes edades obtenidos a partir de un modelo animal multivariado (MMV) y un modelo animal bivariado de regresión aleatoria (MRA).

En ambos modelos (MMV y MRA), los mayores valores de h^2 para PC fueron a los 10 y 11 meses de edad (0,91 y 0,92 a los 10 meses para MMV y 0,61 y 0,57 a los 11 meses para MRA); mientras que para CE los valores más altos de h^2 se obtuvieron a los 7, 11 y 22 meses de edad según el MMV (0,75, 0,70 y 0,71) y a los 18 y 20 meses, según el MRA (0,68 y 0,72).

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mediante el modelo animal de regresión aleatoria (MRA), tanto para las correlaciones genéticas como para los índices de h^2 , tendieron a ser más homogéneos, a pesar de que no convergieron a soluciones óptimas. Por el contrario, los resultados obtenidos por medio del modelo animal multivariado (MMV), principalmente en lo que respecta a CE, fueron más inestables y fluctuantes, a pesar de converger a soluciones identificadas como óptimas por el programa utilizado.

Las diferencias observadas entre ambos métodos de estimación pueden deberse a varios factores. Cabe esperar que los estimados de varianza obtenidos a partir de un MRA presenten un patrón más homogéneo, puesto que se ajustan a la función seleccionada (Meyer, 1998, 2000, 2001, 2005; Nobre *et al.*, 2003; Baldi *et al.*, 2010). No obstante, esto también puede ser la causa de una mayor dificultad para lograr soluciones óptimas en el proceso de convergencia, dado que la función utilizada puede no ser suficientemente flexible para representar la alta variabilidad que se observa en los datos. Por el contrario, en MMV los estimados de varianza no necesitan ajustarse a un patrón preseleccionado, lo que podría facilitar el proceso de convergencia a una solución óptima, pero a la vez causar una mayor fluctuación en los estimados obtenidos. La estructura desbalanceada de los datos y la alta variabilidad entre individuos observada para PC y CE dentro de cada estrato de edad también pueden influir en la fluctuación observada en los resultados obtenidos por MMV (Tabla 1) (Albuquerque y Meyer, 2001a; Nobre *et al.*, 2003; Tier y Meyer, 2004; Meyer, 2005; Baldi *et al.*, 2010).

En este estudio no se exploró el uso de polinomios Legendre de más alto grado u otro tipo de funciones de covarianza. Aunque los polinomios de órdenes superiores podrían ser más flexibles, se ha reportado que estos incrementan los requerimientos computacionales, lo que a su vez afecta la convergencia (Kirkpatrick, 1990; Meyer, 1998; Nobre *et al.*, 2003; Iwaisaki *et al.*, 2005; Dias *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2013). En el presente estudio, a pesar de que el MRA no convergió a una solución óptima, se observó una clara tendencia hacia la reducción de los valores de verosimilitud, lo que sugiere que los componentes de varianza obtenidos son probablemente cercanos al óptimo.

La incapacidad para obtener una solución óptima en el caso de MRA puede estar también ligada a la complejidad del modelo, ya que se combinaron mediciones repetidas para dos variables diferentes, lo que sin duda alguna dificulta aún más la convergencia. No se encontraron estudios previos que hayan utilizado un modelo bivariado de regresión aleatoria similar el empleado en este estudio.

Los estimados de heredabilidad para PC reportados por estudios previos varían ampliamente, aunque la mayoría son menores a los obtenidos en el presente estudio. Espinoza *et al.* (2007) reportaron una h^2 de 0,24 para PC a los 18 meses. Torres *et al.* (2012) encontraron un valor de $0,33 \pm 0,11$ para PC al año en toros cebú. Domínguez *et al.* (2003) reportaron h^2 de 0,11, 0,21 y 0,19 para el peso al destete, 12 y 18 meses, respectivamente, en animales de la raza sintética Tropicarne. Plasse *et al.* (2002) estimaron h^2 de 0,13 en toros Brahman de Venezuela. Meyer *et al.* (1991) reportaron un valor de h^2 de 0,28 para PC entre 300-500 días de edad y 0,27 entre 500-700 días de edad, ambos en cruces cebuinos en Australia. Forni y Albuquerque (2005) mencionaron un valor de h^2 de 0,30 para PC a 550 días de edad en ganado Nellore. Martínez *et al.* (2006) reportaron un promedio de h^2 de $0,17 \pm 0,001$ y $0,21 \pm 0,074$ para los pesos al nacer y al destete. Por otro lado, Stelzleni *et al.* (2002) reportaron una h^2 de 0,53 para PC al año de edad en ganado Brangus, más acorde a los valores encontrados en el presente estudio.

La diferencia en magnitud de h^2 entre distintos estudios puede atribuirse a diversos factores, algunos de ellos de carácter biológico, como la raza, el periodo de edad analizado o la heterogeneidad en condiciones de manejo. Otros factores pueden ser de tipo metodológico, tales como el modelo genético asumido o incluso los algoritmos utilizados en el proceso de convergencia.

Varios estudios han reportado bajos estimados de heredabilidad para PC después del nacimiento (0,12-0,24) (Albuquerque y Meyer, 2001b; Meyer, 2001; Dias *et al.*, 2006). Algunos autores argumentan que la baja heredabilidad a edades tempranas se debe a que los toretes jóvenes son más vulnerables al estrés nutricional y ambiental en este periodo. En el presente estudio, la mayoría de los toretes fueron suplementados con concentrado y minerales, además de contar con un adecuado pastoreo, lo que podría haber atenuado los efectos ambientales mencionados.

La h^2 promedio para CE estimada por MRA en el presente estudio (0,51) se encuentra por arriba del rango que se ha reportado en otros estudios para *Bos indicus*, mientras que la obtenida por MMV (0,33) es más congruente. En general, se han obtenido índices de h^2 de medianos a bajos para este rasgo. Se reportan valores de h^2 de 0,29 a los 18 meses de edad en Brahman (Vargas *et al.*, 1998), 0,06-0,08 para la raza Nellore a los 550 días de edad (Forni y Albuquerque, 2005) o 0,13-0,27 al destete en ganado Canchim (Barichello *et al.*, 2010). En general, para el ganado *Bos taurus* y sus cruces se han reportado estimados de h^2 desde 0,36 a 0,71 (Latimer *et al.*, 1982; Bourdon y Brinks, 1986). Torres *et al.* (2012) reportaron una h^2 promedio de $0,35 \pm 0,08$ para CE en ganado Simbrah entre los 320 y 410 días de edad. Silva *et al.* (2013) en la raza Nellore, obtuvieron una h^2 promedio de 0,42 para CE a los 18 meses. En esta misma raza, Boligon *et al.* (2011a, b) reportaron valores de $0,39 \pm 0,01$; $0,41 \pm 0,01$ y $0,44 \pm 0,02$ para CE a los 9, 12 y 15 meses de edad, respectivamente y de 0,24, 0,47 y 0,52 a los 6, 8 y 15,5 meses de edad, disminuyendo posteriormente hasta 0,44. Por otra parte, Kriese *et al.* (1991) reportan estimados de h^2 de CE al año de edad de 0,16 para toros Brangus.

Las correlaciones genéticas para PC en diferentes edades obtenidas en el presente estudio tienden a ser similares o mayores a las reportadas por otros estudios. Frizzas *et al.* (2009) reportaron en animales Nellore una correlación de $0,30 \pm 0,11$ entre el peso a los 12 y 18 meses. Boligon *et al.* (2011a), también en Nellore, obtuvieron valores entre 0,37 a 0,88 para PC entre el nacimiento y el destete, utilizando un modelo animal multivariado. Por otra parte, Martínez *et al.* (2006) en la raza criolla colombiana Costeño con Cuernos, determinaron un $r_g = 0,59$ entre peso al destete y a los 480 días, similar al determinado en el presente estudio (0,68). Mascioli *et al.* (1996) reportaron una correlación de 0,77 entre peso al destete y a los 18 meses de edad, en bovinos de la raza Canchim, también similar al estimado obtenido en el presente trabajo (0,76). Otros estudios reportan correlaciones aún más altas, tales como Morris *et al.* (1992), quienes reportaron una correlación en toros de la raza Brahman de 0,95 entre peso a los 12 y 18 meses. Vostrý *et al.* (2012) mencionaron una correlación de 0,89 entre pesos a los 6 y 7 meses de edad. Por último, Baldi *et al.* (2010) obtuvieron correlaciones entre 0,70 a 0,98 a diferentes edades desde el destete hasta la edad adulta.

Existen pocos estudios en la literatura que reporten las correlaciones genéticas entre CE a diferentes edades en el ganado Brahman. No obstante, los estudios existentes reportan

resultados similares al presente trabajo. Frizzas *et al.* (2009) reportaron una correlación de $0,89 \pm 0,04$ entre CE a 12 y 18 meses, similar al obtenido en el presente estudio (0,95). Boligon *et al.* (2010) reportaron correlaciones de 0,87 (entre 9 y 12 meses), 0,80 (entre 9 y 18 meses) y 0,85 (entre 12 y 18 meses). De igual forma, encontraron valores de 0,84 (entre 9 y 12 meses), 0,76 (entre 9 y 15 meses) y 0,89 (entre 12 y 15 meses) (Boligon *et al.*, 2011a). Yokoo *et al.* (2007) mencionaron correlaciones de 0,96 (entre 12 y 14 meses), 0,81 (entre 12 y 17 meses) y 0,92 (entre 14 y 17 meses). Estos valores son de magnitud similar a los obtenidos en el presente estudio. De igual manera, en estos estudios las correlaciones genéticas entre las medidas de CE tienden a disminuir al aumentar la distancia entre las edades.

En cuanto a las correlaciones observadas entre PC y CE, los resultados del presente estudio también son similares a los reportados por otros autores. Batista (2011) estimó correlaciones de 0,56 entre PC y CE (entre 18 y 60 meses). Meyer *et al.* (1991) reportaron valores de 0,65 y 0,69 (entre 10 y 16 meses y entre 16 y 19 meses, respectivamente). Quirino y Bergmann (1998), determinaron valores de 0,58 a 0,71 cuando el peso corporal no fue incluido en el modelo como variable de ajuste. Cutaia *et al.* (1999) reportaron correlaciones de 0,76. Otros estudios han reportado también asociaciones positivas, pero de menor magnitud, tales como Morris *et al.* (1992), quienes obtuvieron estimados de 0,45 entre PC 12 meses y CE 18 meses y 0,53 a los 18 meses. Coulter *et al.* (1987) obtuvieron estimados de 0,43, Barichello *et al.* (2010) de 0,42 y Torres *et al.* (2012) de 0,36. Resultados con valores menores a los autores anteriores han reportado Boligon *et al.* (2011a) de 0,33 (entre el PC destete-año y CE 9 meses), 0,35 (entre el PC destete-año y CE 12 meses) y 0,38 (entre el PC destete-año y CE 15 meses) y Quirino y Bergmann (1998) obtuvieron estimados que variaron de 0,33 a 0,64. Otros autores reportan correlaciones menores e incluso negativas como Frizzas *et al.* (2009), quienes obtuvieron valores entre PC y CE de $0,21 \pm 0,13$ a los 12 meses, $0,21 \pm 0,11$ entre 12 meses y CE 18 meses, $-0,08 \pm 0,15$ (entre PC 18 meses y CE 12 meses) y $0,16 \pm 0,12$, (entre PC y CE 18 meses).

Las diferencias en magnitud de los estimados pueden estar ligadas a heterogeneidad racial y ambiental, así como a diferentes metodologías y modelos de estimación. A pesar de las diferencias en magnitud, la mayoría de los estudios coinciden en que existen asociaciones favorables entre ambos rasgos.

Los altos índices de heredabilidad y las altas correlaciones genéticas obtenidas en el presente estudio para PC y CE a diferentes edades, sugieren que es factible la selección por ambos rasgos incluso desde edades tempranas. La primera oportunidad para la selección y descarte de futuros sementales se presenta al momento entre el destete y los 11 meses de edad, ya que la r_g y los estimados de h^2 tienden a ser menores a otras edades. Con excepción de los valores obtenidos para CE por el MRA, en el cual se obtuvo que las edades con mayores estimados de fueron los 18 y 20 meses. Toros con CE bajas al año de edad, no logran alcanzar la medida ideal con el tiempo y aún presentan CE por debajo del rango ideal a los 2 años de edad (Barth, 2004). Por lo tanto, las decisiones finales basadas en CE podrían realizarse antes de los 24 meses de edad, incluso cuando los toros son menores de 12 meses.

La asociación favorable entre PC y CE se torna aún más importante en vista de que se han documentado asociaciones también positivas entre CE y parámetros reproductivos tales como la producción espermática, calidad seminal y la eficiencia reproductiva en monta natural (Sarreiro *et al.*, 2002; Sundararaman *et al.*, 2002; Quirino *et al.*, 2004; Kealey *et al.*, 2006; Sarder *et al.*, 2007; Siddiqui *et al.*, 2008; Latif *et al.*, 2009; Waldner *et al.*, 2010; Garmyn *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2011). Por esta razón la selección de toros con base en la CE es una estrategia que repercute directamente en las características antes mencionadas.

CONCLUSIONES

Los altos valores de heredabilidad para PC y CE obtenidos en el presente estudio, aún en edades tempranas, sugieren que es factible hacer una selección de machos antes de que hayan llegado a la madurez reproductiva, la cual en el trópico ronda los 24 meses de edad. La selección conjunta de PC y CE podría realizarse alrededor de los 10 y 11 meses que es cuando ambas variables presentan índices de heredabilidad altos. Esto redundaría en mejoras apreciables en ambos rasgos para las próximas generaciones.

Los resultados muestran que existen asociaciones favorables entre los rasgos de PC y CE en los toretes Brahman bajo las condiciones tropicales y extensivas de Costa Rica. Dadas las correlaciones entre ambos tipos de caracteres, positivas y de mediana a alta magnitud, la selección por peso ocasionaría una respuesta positiva para el productor en los caracteres reproductivos que involucran un adecuado desarrollo testicular, siempre y cuando no involucre una sobrealimentación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, L.G. y K. Meyer. 2001a. Estimates of direct and maternal genetic effects for weights from birth to 600 days of age in Nelore cattle. *J. Anim. Breed. Gen.* 118(2):83–92
- Albuquerque, L.G. y K. Meyer. 2001b. Estimates of covariance functions for growth from birth to 630 days of age in Nelore cattle. *J. Anim. Sci.* 79:2776–2789
- Baldi, F., L.G. Albuquerque y M.M. Alencar. 2010. Random regression models on Legendre polynomials to estimate genetic parameters for weights from birth to adult age in Canchim cattle. *J. Anim. Breed. Genet.* 127:289–299.
- Barichello, F., M. Mello de Alencar, T.R.A. de Almeida y S.L.O. Campos. 2010. Heritability and correlations for weight, scrotal circumference and visual scores at weaning, in Canchim beef cattle. *Pesq. Agropec. Bras.* 45(6):563-570.
- Barth, D.A. 2004. Pubertal development of *Bos taurus* beef Bulls. Proceedings of the World Buiatrics Congress. Québec, Canada. July 11-16, 2004.
- Batista, J.R. 2011. Relación y correlación existente entre circunferencia escrotal, peso corporal y edad, en toros Brahman de 18 a 60 meses de edad e la provincia de Chiriquí. *REDVET.* 12(1). <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n010111.html>
- Boligon, A.A., J.A.V. Silva, R.C. Sesana, J.C. Sesana, J.B. Junqueira y L.G. Albuquerque. 2010. Estimation of genetic parameters for body weights, scrotal circumference, and testicular volume measured at different ages in Nelore cattle. *J. Anim. Sci.* 88:1215–1219.
- Boligon, A.A., F. Baldi y L.G. Albuquerque. 2011a. Genetic parameters and relationships between growth traits and scrotal circumference measured at different ages in Nelore cattle. *Genet. Mol. Biol.* 34:225–230.
- Boligon, A.A., F. Baldi y L.G. Albuquerque. 2011b. Estimates of genetic parameters for scrotal circumference using random regression models in Nelore cattle. *Livest. Sci.* 137(1-3):205-209.
- Bourdon, R.M., y J.S. Brinks. 1986. Scrotal circumference in yearling Hereford bulls: Adjustment factors, heritabilities and genetic, environmental and phenotypic relationships with growth traits. *J. Anim. Sci.* 62:958-967.
- Chacón, J. 2014. Applied andrology in cattle (*Bos indicus*). En: P. Chenoweth, y S. Lorton, editors, *Animal andrology: theories and applications*. Australia. p. 352-389.
- Cutaia, I., D. Moreno, R. Tribulo y G. Bo. 1999. Desarrollo testicular en toros semental de 9 a 19 meses de edad. Córdoba. III Simposio Internacional de Reproducción Animal. Argentina
- Coulter, G.H., R.J. Mapletoft, G.C. Kozub, D.R.C. Bailey y W.F. Cates. 1987. Heritability of scrotal circumference in one and two-year-old bulls of different beef breeds. *Can. J. Anim. Sci.* 67:645-651.
- Dias, L.T., L.G. Albuquerque, H. Tonhati y R.A. Teixeira. 2006. Estimaco de parâmetros genéticos para peso do nascimento aos 550 dias de idade para animais da raça Tabapuã utilizando modelos de regressão aleatória. *R. Bras. Zootec.* 35:1915–1935
- Domínguez, V.J., D.R. Nuñez, V.R. Ramírez y F.A. Ruiz. 2003. Evaluación genética de variables de crecimiento en bovinos Tropicarne: I. Selección de modelos. *Agrociencia.* 37:323-335.

- Domínguez, V.J., A.F.A. Rodríguez, D.R. Nuñez, G.J.A. Ortega, V.R. Ramírez, E.E. Santellano y V.J.L. Espinosa. 2011. Ajuste de Modelos de Regresión Aleatoria en Evaluaciones Genéticas de Bovinos Tropicarner. *Agrociencia*. 45(3): 325-337
- Forni, S. y L.G. Albuquerque. 2005. Estimates of genetic correlations between days to calving and reproductive and weight traits in Nelore cattle. *J. Anim. Sci.* 83:1511-1515.
- Frizzas, O., D. Grossi, M. Buzanskas, C. Paz, L. Bezerra, R. Lôbo, J. A. Oliveira y D. Munari. 2009. Heritability estimates and genetic correlations for body weight and scrotal circumference adjusted to 12 and 18 months of age for male Nellore cattle. *Animal*. 3(3): 347-351.
- Garmyn, A.J., D.W. Moser, R.A. Christmas y J. Minick-Bormann. 2011. Estimation of genetic parameters and effects of cytoplasmic line on scrotal circumference and semen quality traits in Angus bulls. *J. Anim. Sci.* 89: 693-698.
- Groeneveld, E., M. Kovac y N. Mielenz. 2008. VCE User's Guide and Reference Manual. Version 6.0
- Harville, H. 1977. Maximum likelihood approaches to variance component estimation and to related problems. *Jour. Am. Stat. Assoc.* 72:320-388.
- Iwaisaki, H., S. Tsuruta, I. Misztal y J. K. Bertrand. 2005. Genetic parameters estimated with multitrait and linear spline-random regression models using Gelbvieh early growth data. *J. Anim. Sci.* 83:757-763.
- Jamrozik, J., L.R. Schaeffer y J.C.M. Dekkers. 1996. Genetic evaluation of dairy cattle using test day yields and random regression model. *J. Dairy. Sci.* 80:1217-1226.
- Kealey, C.G., M.D. Macneil, M.W. Tess, T.W. Geary y R.A. Bellows. 2006. J. Genetic parameter estimates for Scrotal Circumference and Semen Characteristics of Line 1 Hereford Bulls. *Anim. Sci.* 84:283-290
- Kirkpatrick, M., D. Lofsvold y M. Bulmer. 1990. Analysis of the inheritance, selection and evolution of growth trajectories. *Genetics*. 124:979-993.
- Kriese, L.A., J.K. Bertrand y L.L. Benyshek. 1991. Age adjustment factors, heritabilities and genetic correlations for scrotal circumference and related growth traits in Hereford and Brangus bulls. *J. Anim. Sci.* 69:478-489.
- Latif, M.A., J.U. Ahmed, M.M.U. Bhuiyan y M. Shamsuddin. 2009. Relationship between scrotal circumference and semen parameters in Crossbred Bulls. *Bangl. Vet.* 26(2):61-67
- Latimer, F.G., L.L. Wilson y M.F. Cain. 1982. Scrotal measurements in beef bulls: Heritability estimates, breed and test station effects. *J. Anim. Sci.* 54:473-479.
- Macciotta, N.P.P, D. Vicario y A. Cappio-Borlino. 2005. Detection of Different Shapes of Lactation Curve for Milk Yield in Dairy Cattle by Empirical Mathematical Models. *J. Dairy. Sci.* 88, 1166-1177.
- Martínez, V.G., K.E. Gregory, G.L. Bennett, y L.D. Van Vleck. 2003. Genetic relationships between scrotal circumference and female reproductive traits. *J. Anim. Sci.* 81:395-401.
- Martínez, R., J. Pérez y T. Herazo. 2006. Evaluación fenotípica y genética para características de crecimiento en la raza criolla colombiana Costeño con Cuernos. *CORPOICA. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 7(2): 12-20.

- Martínez, C.A., C. Manrique, A. Jiménez, B. Coy y M.A. Elzo. 2011. Implementación de modelos de regresión aleatoria para caracteres de crecimiento en animales cruzados en el sur del Cesar, Colombia. *AICA* 1:457-46.
- Mascioli, A., M.N. Alencar y F.P. Barbosa. 1996. Estimativas de parâmetros genéticos e proposição de critérios de seleção para pesos na raça Canchim. *Rev. Soc. Bras. Zootec.* 25(1): 72.
- Meyer, K., K. Hammond, P.F. Parnell, M.J. Mackinnon y S. Sivarajasingam. 1990. Estimates of heritability and repeatability for reproductive traits in Australian beef cattle. *Livest. Prod. Sci.* 25:15-30.
- Meyer, K., K. Hammond y M.J. Mackinnon. 1991. Estimates of covariances between reproduction and growth in Australian beef cattle. *J. Anim. Sci.* 69:3533-3543.
- Meyer, K. 1998. Estimating Covariance Functions for Longitudinal Data Using a Random Regression Model. *Genet. Sel. Evol.* 30: 221-240.
- Meyer, K. 2001. Estimates of genetic covariance functions assuming a parametric correlation structure for environmental effects. *Genet. Sel. Evol.* 33:557-585
- Meyer, K. 2005. Estimates of genetic covariance functions for growth of Angus cattle. *J. Anim. Breed. Genet.* 122:73-85.
- Morris, D.L., C.L. Tyner, P.G. Morris, R.L. Forgason, J.L. Forgason, J.S. Williams y M.F. Young. 1989. Correlation of scrotal circumference and age in American Brahman bulls. *Theriogenology.* 31(2): 489-494.
- Morris, C.A., R.L. Baker y N.G. Cullen. 1992. Genetic correlations between pubertal traits in bulls and heifers. *Livest. Prod. Sci.* 31:221-233.
- Nobre, P.R.C., I. Misztal, S. Tsuruta, J.K. Bertrand, L.O. Silva y P.S. Lopes. 2003. Analyses of growth curves of Nellore cattle by multiple-trait and random regression models. *J. Anim. Sci.* 81:918-926.
- Plasse, D., O. Verde, H. Fossi, R. Romero, R. Hoogesteijn, P. Bastidas y J. Bastardo. 2002. (Co) variance components, genetics parameters and annual trends for calf weights in a pedigree Brahman herd under selection for three decades. *J. Anim. Breed. Genet.* 119:141-153.
- Quirino, C.R. y J.A. Bergmann. 1998. Heritability of scrotal circumference adjusted and unadjusted for body weight in Nellore bulls, using univariate and bivariate animal models. *Theriogenology.* 49(7):1389-96.
- Quirino, C.R., J.A.G. Bergmann, V.R. Vale Filho, V.J. Andrade, S.R. Reis, R.M. Mendonça, y C.G. Fonseca. 2004. Genetic parameters of libido in Brazilian Nellore bulls. *Theriogenology.* 62: 1-7.
- Rekaya, R., M.J. Carabaño y M.A. Toro. 1999. Use of test-day yield for the genetic evaluation of production traits in Holstein–Friesian cattle. *Livest. Prod. Sci.* 57:203-21.
- Rusk, C.P., M.E. King, R.G. Mortimer y N.C. Speer. 2002. Relationships of Scrotal Circumference and Scrotal Volume to Growth and Semen Traits in Beef Bulls. *Prof. Anim. Sci.* 18(1):79-84
- Sarder, M.J.U., M.S.R. Sultana, L. Nahar y M.A. Islam. 2007. Phenotypic characteristics of individual bull used for artificial insemination (AI) programme in Bangladesh. *J. Bio. Sci.* 15: 99-109.

- Sarreiro, L.C., J.A.G. Bergmann, C.R. Quirino, N.R. Pineda, V.C.P. Ferreira y M.A. Silva. 2002. Herdabilidade e correlação genética entre perímetro escrotal, libido e características seminais de touros Nelore. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.* 54: 602-608.
- SAS Institute Inc. 2010. SAS/STAT 9.22 User's Guide.
- Siddiqui, A.R., J. Bhattacharjee, Z.C. Das, M.M. Islam, M.A. Islam, M.A. Haque, J.J. Parrish, y M. Shamsuddin. 2008. Crossbred bull selection for bigger scrotum and shorter age at puberty with potentials for better quality semen. *Reprod. Domest. Anim.* 43: 74-79.
- Silva, M.R., V.B. Pedrosa, J.C.B. Silva, J.P. Eler, J.D. Guimarães y L.G., Albuquerque. 2011. Testicular traits as selection criteria for young Nelore bulls. *J. Anim. Sci.* 89: 2061-2067.
- Silva, T.B.R., C.V. Araújo, T.C. Bittencourt, S.I. Araújo, R.B. Lôbo, L.A.F. Bezerra, D.A. Silva y A.A. Silva. 2013. Use of orthogonal functions in random regression models in describing genetic variance in Nelore cattle. *R. Bras. Zootec.* 42(4): 254-258
- Silva, M.R., V.B. Pedrosa, J.C.B. Silva, J.P. Eler, J.D. Guimarães y L.G. Albuquerque. 2013. Genetic parameters for scrotal circumference, breeding soundness examination and sperm defects in young Nelore bulls. *J. Anim. Sci.* 91:4611-4616.
- Stelzleni, A. M., T.L. Perkins, A.H. Brown, E.W. Pohlman, Z.B. Johnson y B.A. Sandelin. 2002. Genetic parameter estimates of yearling live animal ultrasonic measurements in Brangus cattle. *J. Anim. Sci.* 80:3150-3153.
- Sundaraman, M.N., P. Thangaraju y M.J. Edwin. 2002. Age related changes in testes size of Jersey bulls and its effects on semen production traits. *Indian. J. Anim. Sci.* 72: 567-568.
- Tier, B. y K. Meyer. 2004. Approximating prediction error covariances among additive genetic effects within animals in multiple-trait and random regression models. *J. Anim. Bree. Genet.* 121: 77-89. doi:10.1111/j.1439-0388.2003.00444.x
- Torres, V.J.A., P.C.I. Manzanilla, Z.A. Borrayo, U.Á. Ríos, M.V.E. Vega, V.G. Martínez, R.J.J. Baeza, y M.B. Montaña. 2012. Parámetros genéticos y fenotípicos para peso al año, circunferencia escrotal y talla en ganado Simmental y Simbrah en México. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 3(3):291-298.
- Vargas, C.A., M.A. Elzo, C.C. Chase, P.J. Chenoweth y T.A. Olson. 1998. Estimation of genetic parameters for scrotal circumference, age at puberty in heifers, and hip height in Brahman cattle. *J. Anim. Sci.* 76(10):2536-41.
- Vostry L., Z. Vesela y J. Pribyl. 2012. Genetic parameters for growth of young beef bulls. *Arch. Tierz.* 55: 245-254
- Waldner, C.L., R.I. Kennedy y C.W. Palmer. 2010. A description of the findings from bull breeding soundness evaluations and their association with pregnancy outcomes in a study of western Canadian beef herds. *Theriogenology.* 74: 871-883.
- Yokoo, M.J.I., L.G. Albuquerque, R.B. Lobo, R.D. Sainz, J.M.C. Júnior, L.A.F. Bezerra y F.R.C. Araujo. 2007. Estimativas de parâmetros genéticos para altura do posterior, peso e circunferência escrotal em bovinos da raça Nelore. *Rev. Bras. Zootec.* 36:1761-1768.
- Yokoo, M.J., R.B. Lobo, F.R. Araujo, L.A. Bezerra, R.D. Sainz, y L.G. Albuquerque. 2010. Genetic associations between carcass traits measured by real-time ultrasound and scrotal circumference and growth traits in Nelore cattle. *J. Anim. Sci.* 88:52-58.

CONCLUSIONES GENERALES

En el presente estudio se demostró el marcado efecto que ejercen factores relacionados con el ambiente y el manejo sobre el peso corporal y la circunferencia escrotal en toros Brahman y Nellore con edades entre los 7 y 24 meses bajo condiciones tropicales de pastoreo con suplementación. Animales sometidos a un mejor plano nutricional, con políticas de destete temprano, con mayores pesos al destete e hijos de vacas menores de 8 años, presentaron un mejor desarrollo en PC y CE hasta los 24 meses. Por lo tanto, el destete temprano aunado a la optimización de las prácticas nutricionales tiene efectos positivos sobre el desarrollo de toretes en fincas de carne.

En esta investigación también se demostró que existe un marcado efecto genético sobre ambos rasgos en la raza Brahman, lo que se manifiesta en los altos índices de heredabilidad y las altas correlaciones genéticas encontradas. Estos resultados implican que también es posible realizar mejoramiento por selección para ambas características, ya sea de manera independiente o combinada.

Las correlaciones genéticas con magnitudes de medianas a altas entre PC y CE a distintas edades en toretes Brahman son también de gran importancia, pues indican que la selección para estos rasgos, aun en edades tempranas puede tener repercusiones positivas en la edad adulta.

RECOMENDACIONES GENERALES

Es importante tener en cuenta los diversos factores que pueden influir en el desarrollo tanto corporal como reproductivo de un toro. A la hora de realizar selección de sementales, se debe tener en cuenta características objetivas, tanto cualitativas como cuantitativas que influyan realmente en el desempeño de un reproductor y que determinarán su habilidad reproductiva y productiva. Además, es relevante que estas características sean heredables y no antagonicen con otros rasgos de valor económico.

Dado que procedimientos como la evaluación andrológica no suelen ser prácticas rutinarias realizadas en la ganadería extensiva, la estimación de parámetros genéticos de características como la CE, pueden ayudar a señalar nuevos criterios de selección temprana, lo cual permitiría disminuir los costos de desarrollo de animales insatisfactorios para la labor reproductiva.

También es recomendable ampliar las investigaciones en el país a animales de otros grupos raciales. Si bien en esta investigación esta variable no tuvo un efecto significativo, es importante tener presente que no se pueden extrapolar los resultados a otras razas bajo otras condiciones de manejo.

La mejor estrategia de selección conjunta para PC y CE es mediante el uso de índices de selección que combinen ambas características, debidamente ponderadas de acuerdo a sus parámetros genéticos y a su valor económico. De esta manera se lograría aumentar la confiabilidad de los estimados de valor genético y se optimizaría la tasa de progreso genético. En este sentido, los resultados obtenidos en esta investigación pueden ayudar a definir nuevas estrategias de selección que beneficien a los productores y al sector ganadero de carne en general.

Es trascendental que en el país se realicen más estudios enfocados en el mejoramiento genético de la ganadería de carne, ya que este es uno de los pilares que determinan la eficiencia de este sistema de producción bovina. La producción ganadera local necesita ser transformada en muchos aspectos, pero principalmente en el de la eficiencia, ya que la gran mayoría de productores no siguen lineamientos de producción animal sostenible

y se enfocan solamente en el eje económico dejando de lado la parte ambiental y social. Esto afecta la estabilidad de este gremio productivo en las diversas etapas de la agro cadena.

Adicionalmente a esto, se requiere realizar programas de educación, comunicación, y organización de los productores del país, de forma seria y responsable, para que ellos consideren como una alternativa viable el mejoramiento genético y el desarrollo de toretes de forma rentable.