



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN
Y SERVICIO EN ZOOTECNIA
POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL

ASOCIACIÓN GENÉTICA DE FERTILIDAD REAL CON
CARACTERÍSTICAS REPRODUCTIVAS Y DE
CRECIMIENTO EN BOVINOS

TESIS

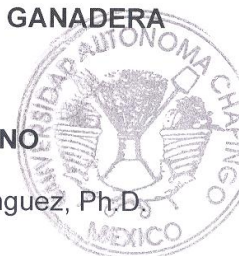
Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

Presenta:

JORGE ÁNGEL HIDALGO MORENO

Bajo la supervisión de: Rafael Núñez Domínguez, Ph.D.



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
COMISIÓN DE EXÁMENES PROFESIONALES

Junio 2014

Chapingo, Estado de México

ASOCIACIÓN GENÉTICA DE FERTILIDAD REAL CON CARACTERÍSTICAS
REPRODUCTIVAS Y DE CRECIMIENTO EN BOVINOS

Tesis realizada por **JORGE ÁNGEL HIDALGO MORENO** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

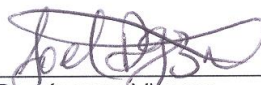
DIRECTOR:


Ph.D. Rafael Núñez Domínguez

ASESOR:


Ph.D. Rodolfo Ramírez Valverde

ASESOR:


Dr. Joel Domínguez Viveros

ASESOR:


Ph.D. Felipe Alonso Rodríguez Almeida

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS.....	v
ABREVIATURAS USADAS	viii
DEDICATORIA	ix
AGRADECIMIENTOS.....	x
DATOS BIOGRÁFICOS	xii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Eficiencia de la vaca.....	7
2.2 Eficiencia en la producción de becerros.....	9
2.3 Mejoramiento de la fertilidad	10
2.3.1 Edad a la pubertad	14
2.3.2 Tasa de preñez en vaquillas.....	15
2.3.3 Edad al primer parto	16
2.3.4 Intervalo entre partos.....	17
2.3.5 Fecha de parto y días al parto.....	20
2.4 Mejoramiento de la vida productiva.....	21
2.5 Relación entre crecimiento de las crías y fertilidad de la vaca.....	24
2.6 Indicadores de productividad en bovinos carne	32
2.7 Literatura citada.....	41
3 ASOCIACIÓN GENÉTICA DE LA FERTILIDAD REAL EN BOVINOS CARNE CON CARACTERÍSTICAS REPRODUCTIVAS Y DE CRECIMIENTO.....	48
3.1 RESUMEN.....	48
3.2 ABSTRACT.....	49
3.3 INTRODUCCIÓN.....	50

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	52
3.4.1 Animales y datos	52
3.4.2 Características.....	53
3.4.3 Grupos contemporáneos	54
3.4.4 Análisis estadístico	55
3.4.5 Predicción de la respuesta a la selección	58
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
3.5.1 Análisis univariados.....	59
3.5.2 Análisis bivariados.....	63
3.5.3 Predicción de la respuesta a la selección	68
3.6 CONCLUSIONES.....	71
3.7 LITERATURA CITADA.....	71

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Eficiencia biológica y económica por vaca expuesta al empadre para tres grupos de bovinos carne con diferente nivel de producción de leche (Oijen <i>et al.</i> , 1993).	8
Cuadro 2. Heredabilidad (h^2) estimada para características reproductivas en bovinos carne.	12
Cuadro 3. Correlaciones genéticas de características reproductivas con características de crecimiento.	13
Cuadro 4. Medias ² del intervalo entre partos (IEP) en función del número de parto de la vaca en ganado Nelore (Viu <i>et al.</i> , 2008).	18
Cuadro 5. Parámetros estimados para habilidad de permanencia a tres años de edad [HPV3 (c1)] y características de crecimiento (c2) en bovinos Angus a través del análisis de un modelo animal bivariado (Rasali <i>et al.</i> , 2005a).	27
Cuadro 6. Estimaciones de heredabilidad directa (h^2) para fecha del primer parto (FP1), fecha de parto (FP) e intervalo entre partos (IEP) y correlaciones genéticas directas (r_a) y maternas (r_{am}) con características de crecimiento (Rasali <i>et al.</i> , 2005b).	27
Cuadro 7. Estimaciones de heredabilidades (entre paréntesis), correlaciones genéticas (r_g), fenotípicas (r_p) y residuales (r_e) para características de toros y vaquillas con tasa de preñez en la vida de la vaca (TP) (Mwansa <i>et al.</i> , 2000).	28
Cuadro 8. Efecto del nivel de alimentación en la edad a la pubertad y reproducción en vaquillas (Short y Bellows, 1971).	30

Cuadro 9. Heredabilidad (en la diagonal), y correlaciones genéticas (encima de la diagonal) y fenotípicas (debajo de la diagonal) para características reproductivas y características de la canal (Oyama <i>et al.</i> , 2004).	32
Cuadro 10. Comportamiento productivo de varias razas de bovinos carne (Gregory <i>et al.</i> , 1992).....	33
Cuadro 11. Valores promedio y heredabilidades reportadas en la literatura para fertilidad real en bovinos Nelore.	35
Cuadro 12. Correlaciones genéticas de fertilidad real (FR) con intervalo entre partos (IEP), edad al primer parto (EPP), fecha de parto (FP), peso al nacimiento (PN) y peso al destete (PD) en bovinos Nelore.....	37
Cuadro 13. Valores promedio y heredabilidades reportadas en la literatura para productividad acumulada en bovinos Nelore.....	38
Cuadro 14. Estadísticos descriptivos, número de observaciones (n) y número de grupos contemporáneos (nGC) utilizados en la estimación de componentes de (co)varianza y parámetros genéticos para fertilidad real (FR), edad al primer parto (EPP), intervalo entre partos (IEP) y peso al destete (PD).....	55
Cuadro 15. Componentes de (co)varianza ^z (kg ²) y parámetros genéticos ^y (± error estándar) para peso al destete estimados utilizando un modelo animal univariado.....	60
Cuadro 16. Componentes de (co)varianza ^z y parámetros genéticos ^y (± error estándar) para intervalo entre partos ^x y edad al primer parto ^w estimados utilizando un modelo animal univariado para cada característica.	61
Cuadro 17. Componentes de (co)varianza ^z [(kg vaca ⁻¹ año ⁻¹) ²] y parámetros genéticos ^y (± error estándar) para fertilidad real estimados utilizando un modelo animal univariado.	62

Cuadro 18. Componentes de (co)varianza ^z y parámetros genéticos ^y ($\pm$ error estándar) para fertilidad real (FR) y peso al destete (PD) estimados utilizando un modelo animal bivariado (FR-PD).	65
Cuadro 19. Componentes de (co)varianza ^z y parámetros genéticos ^y ($\pm$ error estándar) para fertilidad real (FR) e intervalo entre partos (IEP) estimados utilizando un modelo animal bivariado (FR-IEP).....	66
Cuadro 20. Componentes de (co)varianza ^z y parámetros genéticos ^y ($\pm$ error estándar) para fertilidad real (FR) y edad al primer parto (EPP) estimados utilizando un modelo animal bivariado (FR-EPP).	68
Cuadro 21. Respuesta esperada en fertilidad real (FR) al practicar selección directa o indirecta a través de las características peso al destete (PD), intervalo entre partos (IEP) o edad al primer parto (EPP) con base en los resultados de análisis bivariados (FR y PD; FR e IEP; FR y EPP).....	70

ABREVIATURAS USADAS

A = alto(a)
B = bajo(a)
BN = Brangus Negro
CE = circunferencia escrotal
DP = días al parto
EAP = efecto de ambiente permanente
EGA = efecto genético aditivo
EPP = edad al primer parto
ER = efecto residual
FR = fertilidad real
GC = grupo contemporáneo
HP = habilidad de permanencia
IEP = intervalo entre partos
LA = línea alta
LB = línea baja
LC = línea control
M = medio(a)
PA = peso al año
PAC = productividad acumulada
PD = peso al destete
PN = peso al nacimiento
SA = Salers
SE = Suizo Europeo

DEDICATORIA

Con todo cariño para mi familia; en especial para mi esposa Ise y mi hijo Jorge Ángel, este es el fruto de un esfuerzo conjunto, cada día de trabajo del cual ustedes también formaron parte está reflejado en este documento. Ustedes son el motor de arranque de mi vida, sin ustedes esto no hubiese sido posible. Las palabras me quedan cortas, sólo me resta agregar que seguiremos cosechando triunfos juntos.

A mi madre, por haberme guiado por el camino del aprendizaje, siempre fomentó mi ánimo a seguir con mi preparación, usted es un gran ejemplo, gracias por todas sus enseñanzas y por la vida que me dio.

A mis hermanos Andy, Salvador y Lupita, ustedes también son parte de mi inspiración, gracias por estar conmigo siempre.

A mis suegros: Don Enrique y Doña Luz, que como unos segundos padres me han apoyado y acompañado tanto en los buenos momentos de mi vida como en los difíciles, fomentando siempre el valor de la familia.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Producción Animal, por la oportunidad que me brindaron para continuar con mi formación profesional en una de las instituciones con más prestigio a nivel internacional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de Maestría en Ciencias.

A los Doctores Rafael Núñez Domínguez y Rodolfo Ramírez Valverde por su incomparable dirección, sabiduría y empeño, no sólo en el desarrollo de mi trabajo de investigación, sino en todos los aspectos de mis estudios de Maestría en Ciencias e incluso en mi vida personal, sus enseñanzas me hicieron crecer en todos los aspecto de la vida, gracias.

A los Doctores Joel Domínguez Viveros y Felipe Alonso Rodríguez Almeida por las valiosas aportaciones para el desarrollo y culminación satisfactoria de esta investigación. Un especial agradecimiento por el apoyo que me brindaron durante mi estancia en la Universidad Autónoma de Chihuahua, gracias a ustedes se convirtió en una segunda casa, clave fue para un servidor este periodo para culminar la investigación.

Expreso también mi agradecimiento al Doctor Maximino Huerta Bravo, por todas sus enseñanzas, consejos y el apoyo brindado durante mis estudios de Maestría en Ciencias.

No podría perder la oportunidad de agradecer a la Doctora McManus de la Universidad de Brasilia, por su disposición para ayudarme a dilucidar las dudas que surgieron durante la presente investigación, hasta Brasil, gracias.

A las Asociaciones Mexicanas de Criadores de Ganado Brangus, Salers y Suizo Europeo, por permitir el acceso a la información utilizada en la presente investigación.

En especial a Juan Hernández del Rancho Los Cipreses de Ganado Suizo Europeo por su colaboración, y a Juan Fernández de la Asociación Mexicana de Criadores de Ganado Brangus por su cálido recibimiento en Chihuahua.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Jorge Ángel Hidalgo Moreno
Fecha de nacimiento	5 de mayo de 1986
Lugar de nacimiento	Calpulalpan, Tlaxcala
CURP	HIMJ860505HTLDRR08
Matrícula cartilla militar	C-7062805
Profesión	Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia
Cédula profesional	7340054

Desarrollo académico

Preparatoria	Colegio de Bachilleres del Estado de Tlaxcala, Plantel 03 (2001-2004)
Licenciatura	Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo (2004-2009)
Maestría en Ciencias	Posgrado en Producción Animal, Universidad Autónoma Chapingo (2012-2013)

1 INTRODUCCIÓN

El ganadero permanentemente se enfrenta a la disyuntiva sobre cuáles hembras y machos producidos en la unidad de producción debe dejar para reemplazo o cuáles reproductores o semen adquirir, con el propósito de mejorar la productividad de la progenie. El desarrollo de programas de mejoramiento genético en México implica la definición de objetivos y criterios de selección, con base en evaluaciones genéticas de características de importancia económica. Entre las principales características a evaluar están las relacionadas con aptitud como precocidad, fertilidad y longevidad o vida productiva; las relacionadas con crecimiento como pesos a diferentes edades; y las asociadas con el rendimiento y calidad de la carne, como rendimiento en canal y área del ojo de la costilla, marmoleo y suavidad de la carne.

En México, desde 1999 se realizan evaluaciones genéticas para varias razas de bovinos. Sin embargo, las características que se han evaluado en bovinos carne son pesos al nacimiento (PN), destete (PD) y año (PA), así como circunferencia escrotal (CE), debido a la facilidad de medida y a que cuentan con heredabilidades de magnitud mediana a alta.

La eficiencia biológica y económica de los sistemas vaca-becerro depende principalmente del éxito en reproducción (Dickerson, 1970). Sin embargo, los indicadores de fertilidad presentan heredabilidades bajas o se expresan tarde en la vida del animal. Lo anterior, aunado a la falta de registros ha obstaculizado la implementación de la predicción genética de tales características, además de que se ha relegado la posibilidad de aplicar la selección para eficiencia reproductiva junto con características de crecimiento (Grossi *et al.*, 2008; Cammack *et al.*, 2009).

En algunos componentes de reproducción como edad a la pubertad, definida como la edad a la que una vaquilla ha exhibido dos fases lúteas con concentraciones de progesterona mayores a 1 ng mL^{-1} , y fecha de parto (FP), definida como el número del día en que ocurrió el parto de la vaca dentro de la

época de partos (Cammack *et al.*, 2009), las heredabilidades son de mayor magnitud (MacNeil *et al.*, 1985; Gutiérrez *et al.*, 2002). Además, existen importantes correlaciones genéticas entre características reproductivas y características de crecimiento que son de heredabilidad moderada a alta, por lo que la consideración de características reproductivas en programas de selección es factible, ya sea por selección directa o indirecta (Meyer *et al.*, 1991).

Considerando que la rentabilidad de los sistemas vaca-becerro está relacionada además de con la reproducción, con el peso de los animales que van al mercado, una buena vaca debe ser capaz de conjuntar desempeño reproductivo y habilidad materna adecuados. Frente a estas múltiples exigencias, la evaluación de una vaca demanda el establecimiento de índices que engloben, además de características reproductivas, su habilidad materna que es importante y se refleja en mayor supervivencia y peso de sus crías al destete, determinando su valor económico (Azevêdo *et al.*, 2005). Para evaluar bovinos Nelore en Brasil, Lôbo (1996) propuso el índice fertilidad real (FR), que expresa los kilogramos de becerro destetado durante un año por una vaca e incluye su fertilidad y habilidad materna.

En el capítulo dos de esta tesis se presenta una revisión de literatura donde se discuten aspectos importantes sobre eficiencia biológica y económica de los sistemas vaca-becerro, mejoramiento de la fertilidad, mejoramiento de la vida productiva y los indicadores que se han utilizado para medir productividad en bovinos carne. En este capítulo también se presentan los resultados más relevantes de una serie de investigaciones publicadas que han estudiado los temas antes mencionados. El capítulo tres se compone por un trabajo de investigación que tuvo por objetivo estimar componentes de (co)varianza y parámetros genéticos para FR, características reproductivas y de crecimiento, así como correlaciones genéticas de FR con características reproductivas y de crecimiento en tres razas de bovinos carne en México.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

El mejoramiento genético animal y su disseminación son importantes, debido a que son la punta de la pirámide de la producción animal, y por tanto, definen la calidad genética de los animales usados a nivel comercial. En la mayoría de las especies de interés zootécnico, se han documentado cambios significativos en el comportamiento productivo en las décadas más recientes. Una parte importante de este cambio es genético, producido por selección entre y dentro de poblaciones (Mäki-Tanila, 2007).

El propósito del mejoramiento genético en bovinos carne es el beneficio económico, aumentando la rentabilidad de cada animal a lo largo de su vida productiva. En los sistemas de producción vaca-becerro se invierten por lo menos dos años en el crecimiento y desarrollo de las vaquillas de reemplazo, para que en caso de quedar gestantes y destetar su primera cría, comiencen a recuperar dicha inversión hasta los tres años de vida. La posibilidad de amortizar la inversión y generar ingresos adicionales depende de la fertilidad posparto, habilidad materna y longevidad de las vacas, ya que el productor obtiene ingresos reducidos por venta de animales de desecho. Lo anterior significa que el animal debe ser capaz de recuperar el costo de su crianza y obtener utilidades que compensen las pérdidas que se dan en la venta por desecho.

La alta cantidad de insumos gastados en el hato de vacas es una de las limitantes importantes para aumentar la eficiencia de los sistemas de producción vaca-becerro, ya que los gastos de mantenimiento, lactancia y crecimiento de las vacas ocupan entre 65 y 70% del total de la energía requerida para la producción de carne (Notter *et al.*, 1979; Pitchfor, 2004). Por tanto, la estrategia más importante para mejorar la eficiencia es distribuir los costos entre un mayor número de crías producidas.

El comportamiento reproductivo de los hatos es importante porque determina en gran medida, la eficiencia de producción tanto biológica como económica.

Según Meacham y Notter (1987), los hatos en que las vacas presentan alta precocidad sexual y fertilidad poseen mayor disponibilidad de animales para venta y selección, permitiendo mayor progreso genético y rentabilidad.

Una de las metas del mejoramiento genético en bovinos carne es incrementar la proporción de ciertos genes para mejorar la eficiencia reproductiva de las vacas. Una alternativa es incluir tanto características de crecimiento como reproductivas en las evaluaciones genéticas, con el fin de desarrollar índices de selección para identificar los mejores reproductores y, así, incrementar la producción y la productividad (Chin *et al.*, 2012).

Las características de crecimiento son fáciles de medir e interpretar, presentan heredabilidades de magnitud mediana a alta y responden bien a la selección; las características reproductivas son difíciles de medir e interpretar porque son influidas por interacciones entre el becerro, la vaca y el semental; además, presentan heredabilidades bajas (Mercadante *et al.*, 2000). Lo anterior ha provocado que la variación en eficiencia reproductiva se asocie principalmente con diferencias en el manejo y la nutrición de los animales (Meacham y Notter, 1987).

En los sistemas de producción vaca-becerro, la cantidad total de carne producida por año influye directamente sobre la rentabilidad del sistema. Para mejorar el comportamiento productivo, los programas de mejoramiento genético de bovinos carne han utilizado características de crecimiento como criterio de selección; sin embargo, seleccionar para estas características puede traer efectos secundarios desfavorables sobre otras características de importancia económica, tales como talla de la vaca, depósito temprano de grasa y características reproductivas (Dziuk y Bellows, 1983; Grossi *et al.*, 2008). Rauw *et al.* (1998) señalaron que esto es debido a que la selección para características de crecimiento puede resultar en una respuesta correlacionada en otras características, como consecuencia de ligamiento y pleiotropía.

La selección genética ha incrementado considerablemente los niveles de producción de la mayoría de las especies de interés zootécnico; sin embargo, además de estos aumentos favorables en producción, los animales de una población que han sido seleccionados para alta producción parecen estar más expuestos a problemas fisiológicos, inmunológicos y de comportamiento; la selección genética tradicional (utilizando características de crecimiento) puede conducir a la pérdida del equilibrio homeostático, con la consecuente aparición de patologías y deterioro del bienestar animal (Rauw *et al.*, 1998).

Shook (2006) reportó que durante un periodo de 20 años (1985-2005) en la población de bovinos Holstein (Estados Unidos) hubo una mejora de 3,500 kg de leche, 130 kg de grasa y 100 kg de proteína por lactancia por vaca como resultado del mejoramiento genético, nutricional y de manejo; sin embargo, al mismo tiempo, el intervalo parto-concepción aumentó (desfavorablemente) 24 d. La genética fue responsable del 55% del cambio observado en las características productivas y del 33% de la variación en el intervalo parto-concepción. Otros autores mencionaron que la tasa de concepción declinó 25% de 1951 a 2005 (Lucy, 2001), y la tasa de preñez disminuyó 0.45% año⁻¹ de 1975 a 1997 (Royal *et al.*, 2002).

Los efectos desfavorables observados en conformación, fertilidad y salud de los animales como resultado del criterio tradicional de selección, indican la necesidad de obtener información sobre la variabilidad genética de características productivas y no productivas, con el fin de predecir los resultados esperados al aplicar selección conjunta (Dickerson, 1970; Mäki-Tanila, 2007).

El rápido desarrollo de nuevas técnicas reproductivas como inseminación artificial, transferencia de embriones, producción de embriones *in vitro*, sexado de semen y clonación de embriones, así como el uso de nuevas tecnologías moleculares, permite incrementar la intensidad y precisión de la selección, por ende, el cambio genético puede darse más rápido (Nicholas, 1996), esto a su vez, puede acelerar la expresión de los efectos detrimentales relacionados con

la selección para características de crecimiento. Por lo anterior, es importante empezar a practicar la selección en conjunto con otras características, para de este modo, evitar tales efectos negativos.

De acuerdo con Funk (2006), los criterios de selección están cambiando a través del tiempo, de características productivas a no productivas, en especial hacia salud y características relacionadas con aptitud, específicamente la fertilidad se ha convertido en una prioridad para los productores. Mwansa *et al.* (2000) mencionaron que facilidad de medición, variabilidad genética, precisión, intervalo generacional y costo son los factores primarios que determinan la elección de los criterios de selección para el mejoramiento de la eficiencia reproductiva del hato.

El costo de los productos de origen animal depende principalmente de la eficiencia de tres funciones básicas: reproducción, producción de la vaca y crecimiento del becerro. Las características implicadas en el sistema producción vaca-becerro son distintas a las consideradas en el crecimiento del becerro posterior al destete, de tal modo que los costos totales se dividen en costos de las vacas (reproducción y producción) y los costos de la progenie que va al mercado (Dickerson, 1970).

La eficiencia reproductiva determina en gran parte la eficiencia biológica y económica de los sistemas de producción vaca-becerro. La eficiencia económica global se mide por la relación de los costos totales y el total de productos (equivalentes económicos) de las vacas y su progenie, en un periodo de tiempo determinado (Dickerson, 1970). Por otra parte, la eficiencia biológica se define como la capacidad de convertir los insumos físicos (alimentación) en productos comerciales (carne), en las condiciones de producción prevalecientes (Notter *et al.*, 1979).

En los sistemas actuales de producción bovina resulta prácticamente imposible separar la eficiencia biológica de la económica; además, las condiciones imperantes obligan al productor a poner la eficiencia económica por encima de

la biológica, debido a que el éxito del productor se mide en utilidad, aunque ambas están correlacionadas (Notter *et al.*, 1979).

2.1 Eficiencia de la vaca

La eficiencia biológica de la vaca se refleja en la relación entre los kilogramos de becerro destetado y el total de energía del alimento consumido; la eficiencia económica se determina por la relación entre ingresos obtenidos por el producto (kilogramos de becerro destetado) y los costos necesarios para generar el producto (Oijen *et al.*, 1993).

La eficiencia de la vaca se mejora en parte con animales mejor adaptados a las condiciones de pastoreo (mejor capacidad de cosecha y utilización adecuada de nutrientes) y con bajos requerimientos de mantenimiento. Mejorar la eficiencia reproductiva de las vacas influye directamente sobre los kilogramos de becerro destetado por año en una unidad de producción, esto a su vez determina en parte la rentabilidad del sistema de producción, por ello las vacas que no destetan becerros con un peso adecuado y que no paren regularmente, es decir con intervalo entre partos (IEP; definido como el número de días entre dos partos sucesivos) corto, no son útiles para el sistema de producción (Grossi *et al.*, 2008). De modo similar, la edad al primer parto (EPP), que representa la velocidad de crecimiento y la edad a la cual alcanza la pubertad una vaquilla, es un factor importante de la eficiencia reproductiva de las vacas e influye sobre la rentabilidad del sistema. Su presentación tardía reduce el valor económico del animal al disminuir el número potencial de crías durante su vida útil (Frazier *et al.*, 1999).

Oijen *et al.* (1993) estimaron la eficiencia económica y biológica, al destete y al sacrificio, en tres grupos con potencial de crecimiento similar, pero con diferente nivel de producción de leche [bajo (B) = Hereford x Angus, medio (M) = Red Poll x Angus, y alto (A) = Milking Shorthorn x Angus]; los grupos M y A fueron menos eficientes que el grupo B (Cuadro 1). En un experimento similar, Stokes *et al.* (1986) reportaron resultados similares, afirmando que es mayor la

rentabilidad neta generada por genotipos de baja producción de leche. Según Montaño-Bermudez *et al.* (1990), las vacas de los grupos A y M necesitaron 12% más energía por unidad de peso metabólico que las vacas del grupo B para mantener su peso corporal durante la gestación y la lactancia. Los autores afirmaron que las diferencias en la producción de leche explicaron 23% de la variación en requerimientos de energía para mantenimiento.

Cuadro 1. Eficiencia biológica y económica por vaca expuesta al empadre para tres grupos de bovinos carne con diferente nivel de producción de leche (Oijen *et al.*, 1993).

Eficiencia	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
<i>Biológica</i>			
Al destete ^y	28.1	27.2	27.5
Al sacrificio ^x	22.0	20.4	20.3
<i>Económica</i>			
Al destete ^z	90.3	89.2	88.1
Al sacrificio ^z	99.5	96.5	95.3

^zDólares de ingreso 100⁻¹ dólares de egresos, ^ygramos de peso al destete Mcal⁻¹ de EM, ^xgramos de peso en canal Mcal⁻¹ de EM.

En el caso específico de tamaño corporal, en ambientes libres de estrés y con abundancia de alimento, los animales de talla grande pueden ser más rentables, mientras que, en situaciones de estrés o escasez de alimento los animales rústicos y de tamaño medio son los adecuados (BIF, 2010). Rosa (1999) estimó una heredabilidad de 0.26 para peso adulto en bovinos Nelore, lo cual es importante debido a que la mayoría de las razas de bovinos carne han incrementado el peso adulto como resultado de la selección para características de crecimiento, con implicaciones negativas en la eficiencia reproductiva y económica.

Morris y Wilton (1976) reportaron que la eficiencia biológica para PD y PA de las crías fue superior en vacas de talla pequeña. Los costos de alimentación, especialmente para mantenimiento, son grandes y contribuyen a la variación en eficiencia; Montaño-Bermudez *et al.* (1990) estimaron que el 50% del total de la

energía necesaria para producir carne fue usado para satisfacer los requerimientos de mantenimiento de las vacas.

2.2 Eficiencia en la producción de becerros

Debido a la baja tasa reproductiva y al alto costo de mantenimiento de las vacas para carne, es importante el mejoramiento de la eficiencia del crecimiento, especialmente en hatos donde toda la leche se destina a los becerros lactantes. En la selección para eficiencia del crecimiento, el objetivo es disminuir el costo de alimentación “por cabeza” y otros costos por una unidad de valor de la carne, incluyendo el costo de alimentación para mantenimiento de las vacas (Dickerson, 1970).

La eficiencia en la fase de crecimiento de animales que van al mercado, depende de características como apetito, conversión alimenticia, tasa de crecimiento, requerimientos para mantenimiento, y contenido de grasa en la canal. La mayoría de estas características son independientes de las que definen la eficiencia de la vaca y aunque pueden existir algunos antagonismos, no son suficientemente grandes para comprometer un programa de mejoramiento genético integrado (Notter *et al.*, 1979). Archer *et al.* (1999) señalaron que la selección para eficiencia en el uso del alimento por animales en crecimiento tiene una respuesta correlacionada deseable en la eficiencia de la vaca.

De acuerdo con Herd *et al.* (2003), existe variación individual importante en el consumo de alimento por encima o debajo de lo esperado con base en el peso y la tasa de crecimiento de bovinos carne; esta diferencia en consumo es calculada como el consumo residual de alimento. Los autores anteriores reportaron que hay variación genética en el consumo residual de alimento durante el crecimiento (animales que van al mercado y vaquillas de reemplazo; heredabilidades estimadas en un rango de 0.16 a 0.43) y en animales adultos (hato reproductivo; heredabilidad estimada de 0.23), señalaron que la selección divergente para menor consumo residual de alimento después del destete (8 a

12 meses de edad) en animales de la raza Angus provocó cambios correlacionados favorables en consumo diario de alimento (9.2 ± 0.2 vs 9.8 ± 0.2 kg d⁻¹), conversión alimenticia, definida como los kilogramos de alimento requeridos por un animal para producir un kilogramo de carne (7.0 ± 0.2 vs 7.6 ± 0.2 kg d⁻¹) y en el consumo residual de alimento (-0.20 ± 0.11 vs 0.17 ± 0.10 kg d⁻¹), sin reducir el comportamiento productivo de los animales.

Por otro lado, las correlaciones genéticas del consumo residual de alimento después del destete con el consumo diario de alimento de la vaca (0.64) y el consumo residual de alimento de la vaca (0.94) fueron altas y favorables (Herd *et al.*, 2003). Lo anterior es importante, ya que sugiere que la selección para menor consumo residual de alimento después del destete en vaquillas conduce a disminuir el consumo de alimento y a incrementar la eficiencia alimenticia de vacas maduras, mejorando la eficiencia de producción y la rentabilidad del sistema.

2.3 Mejoramiento de la fertilidad

En un mercado con competencia global, como el actual, se debe buscar la máxima productividad para optimizar la rentabilidad. En este contexto, en la ganadería bovina productora de carne, la productividad del sistema está íntimamente relacionada con la eficiencia reproductiva de las vacas. La eficiencia reproductiva de la vaca ha sido identificada como un factor de importancia económica en la producción comercial, por lo que incrementarla debe ser un objetivo importante para reducir los costos por unidad de producto (Dickerson, 1970; Rege y Fabula, 1993). En un sistema de producción vaca-becerro donde el principal objetivo es producir un becerro saludable cada año, ningún factor juega un papel más importante que la aptitud reproductiva de las vacas (Doyle *et al.*, 2000).

Es conocido que las vacas más precoces y fértiles proporcionan un aumento en la tasa de nacimientos del hato, haciendo posible una mayor producción de carne por año; lo ideal es que una vaca destete becerros pesados y al mismo

tiempo consiga mantener una condición corporal para parir un becerro cada año (Azevêdo *et al.*, 2005).

En bovinos carne, la fertilidad es una característica inherente (es decir, el potencial genético subyacente que expresa el sistema endocrino y las funciones fisiológicas de una vaca) que no puede ser explicada completamente por mediciones fenotípicas hechas directamente sobre los animales (Eler *et al.*, 2002). Sin embargo, aunque la fertilidad es una característica compleja para los sistemas de producción vaca-becerro y para los procedimientos de evaluación genética, debe incluirse en los objetivos de selección (Cammack *et al.*, 2009).

El mejoramiento del comportamiento reproductivo puede ser hasta cuatro veces más importante que el de características de crecimiento en un sistema de producción vaca-becerro, donde las crías son vendidas al destete. Sin embargo, dado que los indicadores de fertilidad presentan heredabilidades bajas, se expresan tarde en la vida del animal, y los registros son limitados, se ha obstaculizado la implementación de la predicción genética de tales características (Cammack *et al.*, 2009).

La mayoría de las heredabilidades reportadas para fertilidad y desempeño reproductivo son bajas (Cuadro 2), esto ha traído consigo la suposición de que existe escasa variabilidad genética; por tanto, que la selección para estas características es poco eficaz (Cammack *et al.*, 2009). Sin embargo, en algunos componentes de reproducción como edad a la pubertad, EPP, IEP y FP, algunos autores han estimado heredabilidades de magnitud media a alta (MacNeil *et al.*, 1985; Bertazzo *et al.*, 2004; Silveira *et al.*, 2004). Además, existen correlaciones genéticas favorables entre características reproductivas y características de crecimiento que son de heredabilidad moderada a alta (Cuadro 3). Por tanto, la consideración de las características reproductivas en los programas de selección es factible, ya sea por selección directa o indirecta (Meyer *et al.*, 1991).

Cuadro 2. Heredabilidad (h^2) estimada para características reproductivas en bovinos carne.

Característica	h^2	Raza	Referencia
EPP ^z	0.01	Hereford, Angus y Brangus	Smith <i>et al.</i> , 1989
	0.05	Nelore	Silveira <i>et al.</i> , 2004
	0.06	Nelore	Forni y Albuquerque, 2005
	0.07	Hereford, Angus y Brangus	Bourdon and Brinks, 1982
	0.07	Nelore	Grossi <i>et al.</i> , 2008
	0.14	Nelore	Boligon <i>et al.</i> , 2008
	0.20	Wagyu	Oyama <i>et al.</i> , 2004
	0.22	Angus	Frazier <i>et al.</i> , 1999
	0.23	Asturiana de los Valles	Gutiérrez <i>et al.</i> , 2002
	0.27	Nelore	Gressler <i>et al.</i> , 2005
	0.29	Nelore	Oliveira <i>et al.</i> , 2007
	0.30	Nelore	Mercadante <i>et al.</i> , 1999
	0.37	Nelore	Bertazzo <i>et al.</i> , 2004
IEP ^y	0.01	Nelore	Bertazzo <i>et al.</i> , 2004
	0.03	Angus	Frazier <i>et al.</i> , 1999
	0.03	Nelore	Gressler <i>et al.</i> , 2005
	0.04	Simmental	Meacham y Notter, 1987
	0.05	Negro Japonés	Oyama <i>et al.</i> , 2004
	0.10	Nelore	Oliveira, 2007
	0.10	Nelore	Mercadante <i>et al.</i> , 1999
	0.12	Asturiana de los Valles	Gutiérrez <i>et al.</i> , 2002
	0.32	Nelore	Campello <i>et al.</i> , 1999
	0.42	Nelore	Silveira <i>et al.</i> , 2004
FP ^x	0.21	Asturiana de los Valles	Gutiérrez <i>et al.</i> , 2002
	0.33	Nelore	Silveira <i>et al.</i> , 2004
DP ^w	0.08	Cebú	Meyer <i>et al.</i> , 1991
EP ^v	0.10	Hereford	Smith <i>et al.</i> , 1989
	0.41	Hereford y Angus	Laster <i>et al.</i> , 1979
	0.61	Hereford y Angus	MacNeil <i>et al.</i> , 1985

^zEdad al primer parto, ^yintervalo entre partos, ^xfecha de parto, ^wdías al parto que se define como el intervalo, en días, del primer día de la época de apareamiento a la fecha del parto subsecuente, ^vedad a la pubertad.

Las heredabilidades para características reproductivas son en general bajas; sin embargo, debido su importancia económica es importante considerarlas en los programas de selección. A pesar de obtener progreso genético modesto, la prevención de su deterioro es importante.

Cuadro 3. Correlaciones genéticas de características reproductivas con características de crecimiento.

Característica/referencia	Peso al nacimiento	Peso al destete	Peso al año
<i>Intervalo entre partos</i>			
McManus <i>et al.</i> (2002)	-0.14	-0.05	
<i>Edad al primer parto</i>			
Bourdon y Brinks (1982)	-0.17	-0.22	-0.17
Boligon <i>et al.</i> (2008)		-0.16	-0.23
Gressler <i>et al.</i> (2005)		-0.20	
<i>Edad a la pubertad</i>			
Smith <i>et al.</i> (1989)	0.58	-0.04	-0.14
<i>Fecha de parto</i>			
Koots <i>et al.</i> (1994)		-0.53	-0.13
<i>Días al parto^y</i>			
Meyer <i>et al.</i> (1991)			-0.36
Boligon <i>et al.</i> (2008)		-0.09	-0.13

^yDías al parto se define como el intervalo, en días, del primer día de la época de apareamiento a la fecha del parto subsecuente.

Las correlaciones genéticas entre características reproductivas y características de crecimiento, en general, son bajas pero favorables. Ese sinergismo genético sugiere que al aplicar selección conjunta para fertilidad y crecimiento se puede mejorar el potencial genético en ambos componentes. También, la selección indirecta puede resultar en progreso genético para ambos. Además, se puede concluir que, los genes involucrados en mayor crecimiento son también responsables de un adecuado desempeño reproductivo, por lo que las vaquillas con mayor potencial para crecimiento pueden ser más precoces y fértiles.

Algunos genes pueden afectar más de una característica, por tanto, las características pueden estar genéticamente correlacionadas (MacNeil *et al.*, 1985). El conocimiento de las correlaciones genéticas es necesario cuando se considera la selección para varias características, ya que esto puede modificar los factores de ponderación y la eficacia total de la estrategia de mejoramiento (Oyama *et al.*, 2004). Las correlaciones genéticas permiten predecir, por ejemplo, los efectos de la selección para características como pesos o ganancia de peso obtenidos a diferentes edades sobre el desempeño reproductivo de las vacas (Boligon *et al.*, 2008).

2.3.1 Edad a la pubertad

La edad a la pubertad es una característica que se usa como indicador de la fertilidad de vaquillas y puede influir en su comportamiento reproductivo futuro; está influida por el PD, el estado nutricional y la raza. En general, las razas de crecimiento rápido y tamaño adulto grande alcanzan la pubertad a mayor edad que las de crecimiento lento y tamaño adulto pequeño, siendo la correlación genética entre tamaño adulto y edad a la pubertad 0.57 para *Bos taurus* y 0.25 para *Bos indicus*; las razas seleccionadas para producción de leche son más precoces a la pubertad que las no seleccionadas para este fin, con una correlación genética entre producción de leche y edad a la pubertad de -0.87 para *Bos taurus* y -0.19 para *Bos indicus* (Martin *et al.*, 1992).

La edad a la pubertad es importante en los sistemas de producción con épocas de empadre definidas, donde las vaquillas se aparean para parir a los dos años de edad, ya que no sólo deben alcanzar la pubertad y concebir, sino que además, para maximizar la eficiencia de producción, las vaquillas deben concebir temprano en la época de empadre. Las vaquillas que alcanzan pronto la pubertad, pueden concebir temprano en su primera época de empadre y tener mayor vida productiva que aquellas que conciben tarde (Martin *et al.*, 1992). Laster *et al.* (1979) publicaron correlaciones genéticas de -0.75 entre edad a la pubertad y parto a los dos años de edad en los primeros 25 d de la época de partos, y de -0.42 entre edad a la pubertad y porcentaje de preñez.

Por otro lado, Brinks *et al.* (1978) apoyaron el uso de la CE al año de edad como criterio de selección útil para aumentar la tasa de preñez al año en vaquillas, así como predictor de la edad a la pubertad en las mismas; estos autores estimaron una correlación genética de -0.71 entre CE y edad a la pubertad en vaquillas (medias hermanas).

2.3.2 Tasa de preñez en vaquillas

La tasa de preñez en vaquillas ha sido utilizada como medida de madurez sexual y es una característica binaria (1 = gestante; 0 = vacía). Se define como la probabilidad de que una vaquilla quede gestante durante la época de empadre y permanezca así al momento de la palpación (aproximadamente 120 d después de la época de empadre). De acuerdo con Eler *et al.* (2002), en vaquillas Nelore de un año de edad, la probabilidad de preñez es una característica con heredabilidad alta ($h^2 = 0.57$), por lo cual es recomendable incluirla como criterio de selección. Por otro lado, Doyle *et al.* (2000) demostraron que la tasa de preñez en vaquillas es una característica heredable ($h^2 = 0.21$) que puede responder bien a la selección, y que además existe suficiente variabilidad genética entre los animales para tomar decisiones de selección, con el propósito de promover mayores tasas reproductivas entre las vaquillas de reemplazo.

En un experimento con selección divergente para la tasa de preñez, Davis *et al.* (1993) demostraron que la selección para esta característica conduce al mejoramiento de la fertilidad sin efectos adversos sobre el crecimiento de la progenie. Las vaquillas de la línea de alta tasa de preñez presentaron menor valor (309 d vs 315 d) para la característica días al parto (DP; definida como la diferencia, en días, entre el primer día de la época de apareamiento y la fecha de parto) y sus becerros mayor valor para ganancia diaria de peso posdestete (350 g d^{-1} vs 327 g d^{-1}).

Las vaquillas de reemplazo requieren tiempo y recursos considerables, así que para mejorar la rentabilidad del sistema de producción, es deseable que tengan

su primer parto a los dos años de edad; además, deben permanecer en el hato productivo para continuar aportando. Por lo anterior, la tasa de preñez en toda la vida de la vaca es una característica de interés económico, que puede ser calculada dividiendo el número de gestaciones entre los años que estuvo expuesta a apareamiento. La tasa de preñez puede ser afectada por diversos factores, pero principalmente por el largo de la época de empadre; por lo general épocas largas incrementan la tasa de preñez, pero provocan menor PD de las crías (Eler *et al.*, 2002).

2.3.3 Edad al primer parto

Otra medida de la eficiencia reproductiva de la vaca es la EPP, una característica compleja en vaquillas, ya que está en función de la edad a la pubertad, la fecha de cubrición y la duración de la gestación. La EPP está relacionada con el desempeño posparto, ya que una edad avanzada al primer parto provoca una disminución en la vida productiva de la vaca (Frazier *et al.*, 1999). Lo ideal es que una vaquilla llegue a la pubertad, para luego quedar gestante de 12 a 15 meses de edad, y parir alrededor de los 24 meses (Eler *et al.*, 2002).

Según Núñez-Domínguez *et al.* (1991), esta característica es importante para los productores porque puede afectar el tamaño de las vacas, el número y el peso de los becerros disponibles para la venta y el progreso genético anual potencial para el hato. Estos autores reportaron que las vaquillas que paren a los dos años de edad, al ser evaluadas hasta los 12 años de edad, experimentan 1.1 épocas de empadre, 1.2 preñeces, paren 1.1 becerros, producen 1.0 becerro vivo a las 72 horas después del nacimiento, destetan 0.9 becerros y 138 kg de becerro más que las vaquillas que tienen su primer parto a los tres años de edad. Así mismo, reportaron que el costo por unidad de producto generado puede ser menor cuando las vaquillas paren a los dos años que cuando paren a los tres años de edad (8 y 6% cuando todas las vacas son desechadas a edades óptimas de 7 y 9 años, respectivamente).

Forni y Albuquerque (2005) estimaron una correlación genética para EPP con DP favorable y de magnitud alta (0.76), afirmando que existe la posibilidad de obtener una respuesta correlacionada favorable para reducir la EPP usando DP como criterio de selección. Estos resultados concuerdan con los reportados por Boligon *et al.* (2008), quienes estimaron una correlación genética de 0.73 entre EPP y DP.

Grossi *et al.* (2008) reportaron tendencias genéticas por año de nacimiento para EPP y productividad acumulada (PAC), otro índice que evalúa el desempeño de las vacas y expresa los kilogramos de becerro destetado por una vaca durante su permanencia en el hato. Estos autores estimaron un incremento de 0.166 kg año⁻¹ para PAC y una reducción de 0.01 meses año⁻¹ para EPP, concluyendo que estas características responden bien a la selección y que el mejoramiento genético reproductivo es posible.

2.3.4 Intervalo entre partos

Una vaca permanece en el hato en función de su capacidad para generar crías con IEP lo más cortos posibles, y de su habilidad para después destetar la cría con un peso aceptable. El IEP se compone del periodo de servicios y el periodo de gestación; es una característica fácil de medir, y ha sido utilizada como indicador de la fertilidad y salud reproductiva de la vaca (Campello *et al.*, 1999).

En la mayoría de las unidades de producción, la meta para IEP es 365 d; esta característica es influida por el número de partos de la vaca. El primer IEP tiende a ser largo debido al estrés sufrido en la lactancia, de igual manera las vacas de más de cinco partos pueden presentar intervalos largos debido a que son más propensas a sufrir infecciones en el tracto reproductivo, y esto se traduce en mayor número de servicios por concepción (Frazier *et al.*, 1999; Silveira *et al.*, 2004). El mes y año de nacimiento del becerro influyen también de manera importante en el IEP de las vacas. Los años con escasez de lluvia y poca disponibilidad de forraje dificultan en las vacas la recuperación del estrés provocado por el parto (Silveira *et al.*, 2004).

Viu *et al.* (2008) evaluaron el comportamiento reproductivo de vacas de la raza Nelore sin época de empadre definida; los autores reportaron que vacas de segundo y séptimo parto presentaron los IEP más largos (Cuadro 4). De acuerdo con estos autores, las vacas de segundo parto sufrieron el estrés del primer parto; estas vacas se vieron en la necesidad de utilizar los nutrientes recibidos para mantener la lactancia y completar su propio crecimiento, lo cual compromete en cierto grado sus funciones reproductivas. Por otro lado, las vacas de séptimo parto presentaron alteraciones uterinas (infecciones) que provocaron IEP más largos.

Cuadro 4. Medias^z del intervalo entre partos (IEP) en función del número de parto de la vaca en ganado Nelore (Viu *et al.*, 2008).

Número de parto	Número de animales	IEP, días ($\bar{x} \pm \sigma$)	CV ^y , %
2	273	485.97±79.38 ^a	16.33
3	234	418.51±80.16 ^c	19.16
4	175	442.90±133.67 ^{bc}	30.18
5	139	444.73±145.35 ^{bc}	32.68
6	93	447.51±133.82 ^b	29.90
7	103	474.02±153.37 ^a	32.35

^zMedias sin una letra en común indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$), ^ycoeficiente de variación.

El IEP es especialmente útil para evaluar la eficiencia reproductiva de hatos que no son sometidos a épocas de empadre definidas, pues refleja la habilidad de la vaca para superar el estrés del parto, teniendo que concebir 80 a 85 d después del mismo para poder mantener un IEP adecuado de aproximadamente un año (Viu *et al.*, 2008).

El PN de la cría es un factor capaz de influir en el IEP. Un becerro de mayor peso demanda más nutrientes, esto implica mayor desgaste de la vaca y menor disponibilidad de nutrientes en el torrente sanguíneo para un pronto retorno a la actividad reproductiva. Una cría excesivamente grande puede provocar problemas al parto y retardar la involución uterina exponiendo más a la vaca a infecciones del tracto reproductivo (Campello *et al.*, 1999; Viu *et al.*, 2008). El

sexo de la cría es otro factor que tiene un efecto considerable en el IEP; Frazier *et al.* (1999) reportaron que los becerros macho incrementaron el segundo IEP de las vacas en 0.771 d.

Algunos autores afirman que existe una relación genética favorable entre IEP y EPP; las correlaciones genéticas reportadas entre estas características, por Mercadante *et al.* (1999), Gutiérrez *et al.* (2002), Oyama *et al.* (2004) y Oliveira (2007) fueron 0.25, 0.23, 0.54 y 0.53, respectivamente. Los autores citados concluyeron que las vacas que paren su primer cría a edades tempranas tienden a tener IEP cortos durante de su vida productiva. Por otro lado, cabe señalar que otros autores han encontrado antagonismo genético entre IEP y EPP. Frazier *et al.* (1999), Silveira *et al.* (2004) y Gressler *et al.* (2005) reportaron correlaciones genéticas negativas (-0.93, -0.69 y -0.92, respectivamente).

La gestación debe ser considerada como el periodo fisiológico durante el cual la vaca se prepara para tener un intervalo parto-concepción corto y, por ende, un IEP corto. La condición corporal de las vacas al parto está relacionada de manera importante con la longitud del intervalo parto-concepción, por ello, la vaca se debe preparar durante la gestación para llegar al parto con una condición corporal adecuada, y así evitar periodos más largos de anestro posparto, como consecuencia de vacas paridas con baja condición corporal (Bellows y Short, 1978). Las vacas que paren con adecuada condición corporal, es decir, no demasiado flacas ni tampoco muy gordas, presentaron IEP más cortos, así como mayor FR (McManus *et al.*, 2002).

Bertazzo *et al.* (2004) concluyeron que la selección para reducir el IEP resulta en vacas con mayor permanencia funcional (longevidad) que producen más kilogramos de becerro destetado durante su vida útil. También concluyeron que los IEP largos traen consigo baja productividad de la vaca comprometiendo la eficiencia reproductiva del hato.

2.3.5 Fecha de parto y días al parto

Las características FP y DP son relativamente fáciles de medir y han sido propuestas como indicadores de fertilidad debido a su importancia económica. El mejoramiento de estas características en general se ve reflejado en mayor eficiencia reproductiva de las vacas e incrementos en el PD de las crías.

En hatos con época de empadre definida, las vacas que presentan un valor pequeño para la característica FP, es decir, las que paren al inicio de la época de partos, tienden a destetar becerros con mayor peso y a ser más eficientes, debido a que tienen un mayor número de días posparto, dado que permite que regresen al estro sin complicaciones. Por el contrario, las vacas que paren al final de la época de partos probablemente aún experimenten anestro posparto a la llegada de la siguiente época de empadre; además, las vacas que paren al inicio gastan una mayor proporción de su ciclo anual en lactancia, diluyendo los gastos de mantenimiento como una fracción de los costos totales (Gutiérrez *et al.*, 2002; Cammack *et al.*, 2009).

De acuerdo con Forni y Albuquerque (2005), la característica DP refleja la variabilidad genética de las hembras en presentar actividad estral durante la época de empadre, el número de servicios requeridos para una preñez, la duración de la gestación y la FP; además, permite la identificación de animales con mayor fertilidad dentro del hato, es decir, hembras que conciben más pronto durante la época de empadre y sementales que producen hijas con esta habilidad de concebir temprano. Meyer *et al.* (1991) reportaron correlaciones genéticas favorables de -0.25 y -0.28 para CE al año de edad con DP, para ganado Hereford y Angus, respectivamente.

Las vaquillas que conciben al inicio de su primera época de apareamiento, tienen probabilidad de destetar un mayor número de becerros con mayor PD durante su vida productiva (Dziuk y Bellows, 1983).

2.4 Mejoramiento de la vida productiva

En los sistema de producción vaca-becerro la longitud de la vida productiva (longevidad) de una vaca, el número de crías producidas por vaca por unidad de tiempo, y los kilogramos de becerro destetado son los factores de mayor importancia económica (Santana *et al.*, 2013). Los hatos en los que las vacas permanecen por un periodo largo de tiempo y paren con regularidad requieren menos vaquillas de reemplazo que aquellos hatos en los cuales las vacas tienen altas probabilidades de permanecer vacías y por ende ser desechadas pronto (Garrrick, 2006).

Considerando que las vacas también son desechadas cuando destetan becerros con bajo PD, la longitud del tiempo por el cual una vaca permanece en el hato no solo está relacionada con su precocidad sexual y fertilidad, sino que también con el PD de sus crías (Santana *et al.*, 2013).

La producción de carne depende de factores ambientales y genéticos que tornan viable o inviable la actividad para los productores; de entre ellos, destaca la permanencia del animal en el rebaño, que está ligada a aspectos de producción, reproducción, nutrición y económicos. La maximización de la longevidad genera más ingresos con la disminución de la tasa de desechos involuntarios, y permite al productor realizar mayor tasa de desecho voluntario, lo cual se refleja en mayor progreso genético. Adicionalmente, los costos por concepto de reemplazos disminuyen y el número de vacas en producción en el hato aumenta, generando mayor rentabilidad (Bertazzo *et al.*, 2004).

Es importante que las vacas y vaquillas seleccionadas por mayor mérito genético perduren produciendo becerros, para recuperar la inversión de tiempo y recursos requeridos para su reemplazo. En este contexto, con el fin de lograr una eficiencia óptima de producción, el potencial biológico para una vida productiva más larga es importante en bovinos carne (Rasali *et al.*, 2005a). Tanida *et al.* (1998) reportaron la existencia de variación genética moderada para características relacionadas con longevidad, y en consecuencia la

posibilidad de mejora de estas características. Diferentes medidas de longevidad, tales como vida en el hato, duración de la vida productiva y habilidad de permanencia (HP) han sido utilizadas para bovinos lecheros y para carne (Snelling *et al.*, 1995).

La HP se define como la probabilidad de que una vaca persista en el hato a una determinada edad cuando se le da la oportunidad (Rasali *et al.*, 2005a). Las estimaciones de heredabilidad para HP varían desde 0 hasta 0.68 (Snelling *et al.*, 1995). Rasali *et al.* (2005a) estimaron una heredabilidad que varió de 0.23 a 0.24 para HP de las vacas a tres años de edad. Por otro lado, Doyle *et al.* (2000) definieron la HP como la probabilidad de que una hembra tenga al menos cinco crías, habiendo tenido su primer parto a los dos años de edad; ellos estimaron que es una característica heredable ($h^2 = 0.15$) y puede responder bien a la selección.

Las medidas de longevidad son influidas por varias características, incluyendo las reproductivas. El incremento de la longevidad de las hembras se traduce en pocas vaquillas de reemplazo, más vacas maduras altas productoras y menos vacas desechadas de manera involuntaria; sin embargo, la expresión tardía de estas características en la vida de los animales dificulta la inclusión de las mismas en los programas tradicionales de evaluación genética. Al igual que la longevidad, la HP influye en la rentabilidad del sistema de producción a través de la reproducción de las vacas y el desempeño de los becerros, ya que, vacas más maduras, tienden a destetar becerros más pesados (Snelling *et al.*, 1995).

La facilidad al parto juega un papel importante en la vida productiva de la vaca, el PD del becerro y el comportamiento reproductivo futuro se reducen en vacas con distocia, y algunas veces significa el término de la vida productiva de la vaca (Brinks *et al.*, 1973). Becerros con PN elevado son la causa más importante de distocia, como resultado de una desproporción entre la talla del becerro y la apertura pélvica de la vaca. Laster *et al.* (1973) reportaron que la dificultad al parto se incrementó 2.3% por cada kilogramo de incremento en PN;

en vacas que experimentaron dificultad al parto, el porcentaje de detección de estros durante el periodo de inseminación artificial se redujo 14.4%, la tasa de concepción disminuyó 15.9% y la FP se retrasó 5.8 d en promedio.

Fleck *et al.* (1980) concluyeron que las vaquillas con nivel de nutrición adecuado presentan mayor abertura pélvica y menos problemas al parto que aquellas con bajo nivel nutricional. Meacham y Notter (1987) reportaron que el IEP se alarga 4.9, 6.5 y 19.6 d en vacas que presentan distocia y requieren de poca ayuda, ayuda considerable o cesárea, respectivamente.

Es conocido que las vacas nulíparas corren mayor riesgo de distocia, se ha intentado predecir distocias mediante la determinación de la abertura pélvica; sin embargo, el éxito ha sido parcial debido a la incapacidad de predecir con exactitud el PN. Los factores que afectan el PN incluyen alimentación durante la gestación, sexo del becerro, longitud de la gestación, raza de los progenitores, consanguinidad, y edad o número de parto de la hembra (Dziuk y Bellows, 1983).

La selección para rápido crecimiento posnatal se acompaña de mayor crecimiento prenatal, que a su vez, resulta en becerros más pesados al nacimiento. Dickerson *et al.* (1974) propusieron un índice ($I = PA - 3.2 PN$) que permite progreso continuo en crecimiento posnatal y posdestete, reduce el incremento en PN y con ello el riesgo de distocias. De acuerdo con estos autores, la selección para este índice causa una disminución de 44% en la respuesta correlacionada para PN en comparación con la selección directa para PA, mientras que la respuesta para PA se reduce sólo 10%.

Usando el mismo índice, Bourdon y Brinks (1982) observaron una disminución de 12% en la respuesta para PA y la respuesta correlacionada para PN declinó 37%; mediante el uso de este índice lograron un cambio genético de $-0.7 \text{ kg generación}^{-1}$ para PN. Los mismos autores afirman que la selección para ganancia diaria de peso del nacimiento al año, reduce la respuesta correlacionada de PN en un 9%, en comparación con la selección para PA. Por

tal motivo, la selección para ganancia diaria de peso se ha propuesto como una medida para disminuir el aumento en PN, mientras que se mantiene la respuesta para altas tasas de crecimiento.

Dziuk y Bellows (1983) concluyeron que el ambiente uterino materno que proporcionan las hembras Brahman da como resultado bajo PN y reduce las distocias. Ellos especulan que la incidencia de dificultades al parto se puede reducir al seleccionar hembras que tienen la habilidad de “controlar el PN”; sugieren que esto se puede llevar a cabo seleccionando animales que contengan genes de Brahman en su genotipo, o bien seleccionando hembras dentro de otras razas que tengan esta habilidad.

2.5 Relación entre crecimiento de las crías y fertilidad de la vaca

La rentabilidad de los sistemas de producción bovina para carne depende de la eficiencia reproductiva, la tasa de crecimiento pre y posdestete, y de la eficiencia de utilización del alimento (MacGregor y Casey, 2000). El objetivo ideal es obtener mayor eficiencia en el crecimiento, acompañado por una madurez sexual temprana para reducir los costos de reemplazos, alargar la vida productiva y minimizar el incremento en tamaño adulto.

Los programas de mejora genética en bovinos carne se han enfocado tradicionalmente en la selección para características de crecimiento (Meyer *et al.*, 1991). Estas características son comúnmente registradas y se sabe que tienen heredabilidades moderadas o altas. Ríos (2008) en una extensa revisión proveniente de 89 grupos raciales localizados en 38 países, reportó heredabilidades directas promedio de 0.37, 0.27 y 0.26 para PN, PD y ganancia diaria de peso, respectivamente.

En bovinos carne es común hacer selección para mejorar características de crecimiento. Sin embargo, existe preocupación acerca de que la selección para mejorar la tasa de crecimiento (uno de los principales criterios de selección alrededor del mundo) puede reducir el comportamiento reproductivo de las

vacas e incrementar la incidencia de distocias. Las relaciones genéticas entre características de crecimiento y otras de importancia económica han sido estudiadas a través de la estimación de heredabilidades y correlaciones genéticas de datos de animales sin seleccionar en la mayoría de los casos. Sin embargo, pocos estudios se han realizado con selección experimental para estimar la respuesta real de la selección para tasa de crecimiento en otras características, en particular en las reproductivas (Archer *et al.*, 1998b). Estos autores evaluaron el efecto de la selección para tasa de crecimiento en el comportamiento reproductivo de las vacas. Animales de la raza Angus fueron seleccionados para alta [línea alta (LA)] o baja [línea baja (LB)] tasa de crecimiento del nacimiento al año de edad, también hubo animales en los que no se hizo selección [línea control (LC)]. Después de 17 años de selección se logró una divergencia de 30% para tasa de crecimiento entre LA y LB. La tasa reproductiva, como proporción de las vacas expuestas al empadre, en LA fue similar al momento del diagnóstico de preñez (0.86), al parto (0.86) y al destete (0.83), en comparación con la LC (0.85, 0.84 y 0.78, respectivamente), mientras que la LB (0.77, 0.77 y 0.69, respectivamente) tuvo tasas reproductivas menores que la LC. Las vaquillas de LA fueron más precoces a la pubertad que las de LC y LB (324, 336 y 355 d, respectivamente). Los DP fueron similares para las tres líneas. El largo de la gestación fue mayor en LA (281.5 d) que en LC (279.3 d) y en LB (278.1 d). Las diferencias en el largo de la gestación y la ausencia de diferencias en DP sugieren que las vacas de LA tienden a concebir antes que las vacas de LC y LB. Las vacas de LA tuvieron 3% de pérdidas reproductivas del diagnóstico de preñez al destete, mientras que las de LC y LB tuvieron 7 y 8%, respectivamente. La incidencia de distocia en vaquillas fue similar entre líneas (0.03, 0.05 y 0.04, para LA, LC y LB, respectivamente).

Archer *et al.* (1998b) reportaron que la selección para alta tasa de crecimiento no compromete el comportamiento reproductivo cuando la selección se lleva a cabo dentro del mismo hato, ya que el progreso genético obtenido de esta manera no provoca gran disparidad entre el PN de los becerros y la talla de las

vaquillas, lo contrario ocurre cuando se introducen del exterior toros con alto potencial de crecimiento (superior al del hato).

Al evaluar el peso y la altura de las vacas a diferentes edades (usando las mismas líneas de selección), Archer *et al* (1998a) concluyeron que la selección para tasa de crecimiento del nacimiento al año de edad conduce a cambios en la talla de los animales a todas las edades. Las vacas de LA fueron más pesadas (9%) y altas (4%) al nacimiento y a la madurez (9 y 3%, respectivamente) que las vacas de LC. Por otro lado, las vacas de LB fueron más livianas (13 y 16%) y de menor altura (5 y 6%) al nacimiento y a la madurez, respectivamente, que las de LC. Comparadas con las vacas de LC, las vacas de LA maduraron 6% más rápido para peso y altura, mientras que las de LB maduraron 5% más lento.

Rasali *et al.* (2005a) estudiaron la asociación genética entre HP a tres años de edad y características de crecimiento como PN, PD y PA, en hatos Angus (Cuadro 5). Ellos estimaron correlaciones genéticas directas negativas de HP a tres años de edad con PN, PD y PA, lo que indica un antagonismo entre características de crecimiento y supervivencia. Por el contrario, hubo correlaciones genéticas favorables entre los efectos genéticos directos de HP a tres años de edad y los efectos genéticos maternos de PN, PD y PA.

Rasali *et al.* (2005b) estimaron parámetros genéticos en características de crecimiento (PN, PD y PA) y características relacionadas con eficiencia reproductiva, como FP e IEP, los autores estimaron que FP respondió a la selección; asimismo, la mayoría de las correlaciones entre características reproductivas y de crecimiento fueron favorables, indicando la posibilidad de mejorar el crecimiento y la eficiencia reproductiva de las vacas en forma simultánea (Cuadro 6).

Cuadro 5. Parámetros estimados para habilidad de permanencia a tres años de edad [HPV3 (c1)] y características de crecimiento (c2) en bovinos Angus a través del análisis de un modelo animal bivariado (Rasali *et al.*, 2005a).

Parámetros	Par bivariado de características		
	HPV3-PN ^z	HPV3-PD ^y	HPV3-PA ^x
Heredabilidad directa (c1)	0.24	0.23	0.23
Heredabilidad directa (c2)	0.54	0.73	0.47
Heredabilidad materna (c2)	0.14	0.33	0.13
r_g^w directa materna (c2,2)	-0.18	-0.70	0.39
r_g directa (c1,2)	-0.10	-0.09	-0.15
r_g directa materna (c1,2)	0.20	0.23	0.25

^zPeso al nacimiento, ^ypeso al destete, ^xpeso al año, ^wcorrelación genética.

Cuadro 6. Estimaciones de heredabilidad directa (h^2) para fecha del primer parto (FP1), fecha de parto (FP) e intervalo entre partos (IEP) y correlaciones genéticas directas (r_a) y maternas (r_{am}) con características de crecimiento (Rasali *et al.*, 2005b).

	Características reproductivas		
	FP1	FP	IEP
h^2	0.18	0.25	0.10
Características de crecimiento			
		r_a	
PN ^z	-0.01	-0.19	-0.23
PD ^y	0.28	-0.31	-0.38
PA ^x	0.04	-0.21	-0.65
		r_{am}	
PN	0.02	-0.02	0.00
PD	-0.73	-0.18	0.07
PA	-0.75	-0.36	0.51

^zPeso al nacimiento, ^ypeso al destete, ^xpeso al año.

Las heredabilidades mostradas en el Cuadro 6 indican que FP, con una mayor heredabilidad que IEP, puede ser una mejor opción como criterio de selección, cuando se trata de mejorar la eficiencia reproductiva en bovinos carne.

Rasali *et al.* (2005b) también estimaron tendencias genéticas directas a través de regresiones de los valores genéticos sobre el año de nacimiento para características de crecimiento y características relacionadas con eficiencia reproductiva. Las tendencias genéticas para PN, PD y PA fueron 0.167, 1.817 y 4.394 kg año⁻¹, respectivamente, y las tendencias genéticas para FP e IEP fueron -1.089 y -0.088 d año⁻¹, respectivamente. Estos autores concluyeron que existe la posibilidad de mejorar simultáneamente el crecimiento y la eficiencia reproductiva de las vacas.

En un estudio llevado a cabo con una población mezclada de bovinos (incluyendo las razas Hereford, Angus, Charolais, Shorthorn y Limousin), Mwansa *et al.* (2000) estimaron correlaciones genéticas negativas para tasa de preñez en la vida de la vaca con CE al año de edad, y positivas para tasa de preñez en la vida de la vaca con consistencia testicular al año, tasa de preñez en vaquillas, PN, PD y PA (Cuadro 7). Estos autores concluyeron que tasa de preñez en la vida de la vaca se puede predecir con éxito a través de características de crecimiento de fácil medición en vaquillas.

Cuadro 7. Estimaciones de heredabilidades (entre paréntesis), correlaciones genéticas (r_g), fenotípicas (r_p) y residuales (r_e) para características de toros y vaquillas con tasa de preñez en la vida de la vaca (TP) (Mwansa *et al.*, 2000).

Característica	TP (0.16)		
	r_g	r_p	r_e
Toros			
CE ^z (0.64)	-0.25	-0.08	0.00
CT ^y (0.17)	0.22	0.04	0.00
Vaquillas			
PN ^x (0.66)	0.58	0.09	-0.17
PD ^w (0.43)	0.57	0.13	-0.02
PA ^v (0.78)	0.33	0.14	0.07
TP ^u (0.21)	0.97	0.86	0.84

^zCircunferencia escrotal, ^yconsistencia testicular, ^xpeso al nacimiento, ^wpeso al destete, ^vpeso al año, ^utasa de preñez en la vida de la vaca.

Mwansa *et al.* (2000) indicaron que el uso de índices, incluyendo características del escroto y de crecimiento en vaquillas, puede generar un cambio genético anual para tasa de preñez en la vida de la vaca 3.1 veces mayor que la selección directa.

La ganancia diaria de peso del destete hasta la pubertad influye de manera importante sobre la edad al primer estro. Short y Bellows (1971) determinaron el efecto del nivel de alimentación en la edad a la pubertad y el comportamiento reproductivo futuro de vaquillas agrupadas para ganar aproximadamente 0.23 (B), 0.45 (M) y 0.68 (A) kg d⁻¹ por un periodo de 153 d (de 7 a 12 meses de edad). Las vaquillas del grupo B mostraron el peor comportamiento (Cuadro 8). Estos resultados concuerdan con los reportados por Ferrell (1982), quien afirma que las vaquillas desarrolladas lentamente con dietas bajas en energía, alcanzan la pubertad a edades mayores y tienen menores tasas de preñez que las desarrolladas rápidamente, cuando ambas se exponen al semental al año de edad. Estos datos, sin embargo, no indican que la sobrealimentación sea deseable. Arnett *et al.* (1971) señalaron que alimentación excesiva en vaquillas puede resultar en síntomas débiles de celo, bajas tasas de concepción, alta mortalidad embrionaria, pobre desarrollo de la glándula mamaria y baja producción de leche.

Varner *et al.* (1977) separaron las vaquillas al destete en dos grupos: el grupo uno con vaquillas de peso superior a la media, y el grupo dos con vaquillas de peso inferior a la media; las alimentaron por separado y encontraron que 19% más vaquillas alcanzaron la pubertad al inicio de la época de empadre; además, 19% más de ellas lograron concebir, en comparación con el manejo tradicional de no dividir en grupos de acuerdo con el PD. Los autores atribuyeron las diferencias a la disminución en la competencia entre vaquillas pesadas y livianas; por tanto, el desempeño reproductivo también puede ser mejorado usando técnicas de manejo simples, pero planeadas.

Cuadro 8. Efecto del nivel de alimentación en la edad a la pubertad y reproducción en vaquillas (Short y Bellows, 1971).

	Nivel de alimentación		
	Bajo	Moderado	Alto
<i>Número de vaquillas</i>	30	29	30
<i>Ganancia de peso, kilogramos día⁻¹</i>			
Invierno	0.27	0.45	0.68
Verano	0.59	0.54	0.41
<i>Edad a la pubertad, días^{**}</i>	433	411	388
<i>PVPEE^z</i>	80	97	100
<i>Porcentaje de concepción</i>			
0-20 d de la época de apareamiento	30	62	60
21-40 d de la época de apareamiento	10	21	20
41-60 d de la época de apareamiento	10	3	7
Total	50	86	87

^{**} $p \leq 0.01$, ^zporcentaje de vaquillas que presentaron su primer estro durante la época de empadre.

Smith *et al.* (1989) utilizaron vaquillas de un año de edad y estimaron correlaciones genéticas favorables para edad a la pubertad con PD, PA y ganancia diaria de peso del nacimiento al año (-0.04, -0.14 y -0.21, respectivamente); por otro lado, la correlación genética con PN fue desfavorable (0.58). Los resultados indican la posibilidad de un mejoramiento simultáneo para crecimiento posnatal y reproducción temprana.

Al estudiar el efecto de la FP y el IEP en el crecimiento de las crías en un hato con época de empadre definida, MacGregor y Casey (2000) encontraron que las vacas que presentaron IEP corto y parieron al inicio de la época de partos produjeron los becerros más ligeros al nacimiento, y con mayor PD; esto último se debió a que presentaron mayor ganancia diaria de peso y fueron de mayor edad al momento del destete. Por el contrario, aquellas vacas que parieron al final de la época de partos y presentaron IEP largo, tuvieron becerros con mayor PN, pero con menor PD (27.96 kg menos). Los autores concluyeron que el incremento de un día en el IEP resulta en una disminución de 0.29 kg para

PD y 0.54 kg para peso de las vaquillas antes del empadre, así como en un incremento de 0.06 kg para PN.

De acuerdo con Bourdon y Brinks (1982), existe una relación favorable entre crecimiento y reproducción temprana, con correlaciones genéticas negativas entre EPP y ganancias de peso predestete (-0.21) y posdestete (-0.16). De manera similar, Smith *et al.* (1989) estimaron correlaciones genéticas favorables de la FP en vaquillas con ganancia diaria de peso del nacimiento al año de edad (-0.16).

En un estudio diseñado para evaluar el efecto de la raza en la tasa de ganancia posdestete, Ferrell (1982) reportó: 144, 114, 176, 176, 134 y 164 kg de becerro destetado por vaquilla expuesta; 0.76, 0.67, 0.85, 0.75, 0.61 y 0.70 becerros destetados por vaquilla expuesta, para las razas Angus, Hereford, Red Poll, Pardo Suizo, Charolais y Simmental, respectivamente. Al dividir las vaquillas en tres grupos con diferente tasa de ganancia posdestete [bajo (B) = 0.4 kg d⁻¹, medio (M) = 0.6 kg d⁻¹, y alto (A) = 0.8 kg d⁻¹], reportó 150, 164 y 139 kg de becerro destetado por vaquilla expuesta; 0.72, 0.77 y 0.69 becerros destetados por vaquilla expuesta para los grupos B, M y A, respectivamente. Los resultados anteriores ponen en evidencia una vez más que la alimentación deficiente o excesiva provocan una disminución del comportamiento productivo de los animales.

En la mayoría de las unidades de producción, el objetivo es mejorar el crecimiento; aunque en algunas razas como la Wagyu, la selección se dirige principalmente a incrementar el marmoleo. Existe preocupación sobre si la selección intensiva para mejorar características de la canal puede afectar negativamente el comportamiento reproductivo y la vida productiva de las vacas. Oyama *et al.* (2004) estimaron correlaciones genéticas y fenotípicas entre características reproductivas y de la canal para los bovinos Wagyu (Cuadro 9). El estudio reveló que las relaciones genéticas entre características reproductivas de las vacas y características de la canal de animales en engorda son bajas pero favorables, lo cual, implica que tanto las características

reproductivas como las de la canal pueden ser mejoradas genéticamente en forma simultánea.

Cuadro 9. Heredabilidad (en la diagonal), y correlaciones genéticas (encima de la diagonal) y fenotípicas (debajo de la diagonal) para características reproductivas y características de la canal (Oyama *et al.*, 2004).

Característica	EPP	LG	DA	IEP	PC	AOC	MAR
EPP ^z	0.20	-0.04	0.27	0.25	-0.27	-0.13	-0.24
LG ^y	0.03	0.40	-0.11	0.16	0.09	0.10	0.02
DA ^x	0.08	-0.03	0.05	1.00	0.05	0.08	0.00
IEP ^w	0.06	0.00	1.00	0.05	0.05	0.08	0.01
PC ^v	-0.08	0.04	0.01	0.01	0.42	0.45	0.11
AOC ^u	-0.04	0.04	0.01	0.01	0.48	0.46	0.40
MAR ^t	-0.08	0.01	0.00	0.00	0.16	0.38	0.56

^zEdad al primer parto, ^ylargo de la gestación, ^xdías abiertos, ^wintervalo entre partos, ^vpeso de la canal, ^uárea del ojo de la costilla, ^tmarmoleo.

2.6 Indicadores de productividad en bovinos carne

Durante los últimos años se ha intensificado el interés en la eficiencia total de los sistemas vaca-becerro. En este contexto, varios métodos han sido utilizados para evaluar la productividad de la vaca, la cual depende de la eficiencia reproductiva y a menudo es medida como el número de crías por vaca expuesta al empadre durante un intervalo de tiempo. Una medida común de productividad es el número de becerros destetados por vaca expuesta al empadre (cosecha neta de becerros); mientras que otra más completa es kilogramos de becerro destetado por vaca expuesta al empadre (Dziuk y Bellows, 1983).

Gregory *et al.* (1992) evaluaron la productividad de varias razas utilizando los siguientes indicadores: cosecha de becerros nacidos, cosecha de becerros destetados, y kilogramos de becerro a 200 d de edad por vaca expuesta. Los resultados de esta investigación se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Comportamiento productivo de varias razas de bovinos carne (Gregory *et al.*, 1992).

Raza	CBN ^y , % ^z	CBD ^x , % ^z	KBVE ^w , kg ^z
Red Poll	81.3	76.2	161.4
Hereford	76.3	68.2	127.1
Angus	81.0	72.6	145.2
Limousin	73.4	66.0	139.0
Braunvieh	82.4	73.9	181.4
Pinzgauer	83.7	74.8	181.8
Gelbvieh	83.2	75.5	187.5
Simmental	80.8	70.0	173.3
Charolais	80.8	73.7	175.5

^zCon base en el número total de animales expuestos a empadre, ^ycosecha de becerros nacidos, ^xcosecha de becerros destetados, ^wkilogramos de becerro a 200 d de edad por vaca expuesta.

Una cosecha neta de becerros menor que 100% indica pérdidas en alguna etapa del ciclo de producción, lo que puede deberse a vacas no gestantes al final de la época de empadre, muertes fetales durante la gestación, muertes perinatales y muertes del nacimiento al destete. Dentro de los factores anteriores, destaca la incapacidad de lograr que una vaca quede gestante (Dziuk y Bellows, 1983).

Kress *et al.* (1990) evaluaron la productividad en bovinos carne utilizando kilogramos de becerro destetado por kilogramo de peso de la vaca, y kilogramos de becerro destetado por unidad de peso metabólico de la vaca. Estos indicadores se expresan de la manera siguiente:

$$KDP = \frac{pbd}{pvd} \quad KDPM = \frac{pbd}{pvd^{0.75}}$$

donde, KDP = kilogramos de becerro destetado por kilogramo de peso de la vaca; pbd = peso del becerro al destete; pvd = peso de la vaca al destete de su cría; y $KDPM$ = kilogramos de becerro destetado por unidad de peso metabólico de la vaca. Estos autores observaron que las vacas que destetaron las crías más pesadas no necesariamente fueron las más productivas.

En un estudio realizado con bovinos de la raza Angus, durante 17 años se practicó selección divergente para tasa de crecimiento del nacimiento al año de edad en tres líneas: alta, control y baja (Arthur *et al.*, 1997); el PD de las líneas alta y baja fue 223 y 168 kg, respectivamente. Usando las mismas líneas de selección, Archer *et al.* (1998b) obtuvieron una productividad por vaca (kilogramos de becerro destetado por vaca expuestas al toro) de 185 y 116 kg para las líneas alta y baja, respectivamente. Los resultados indican que las vacas de la línea alta fueron más productivas, y que la selección para altas tasas de crecimiento no comprometió el desempeño reproductivo.

Considerando que la rentabilidad del sistema vaca-becerro está relacionada con el peso de los animales que van al mercado, una buena vaca debe ser capaz de conjuntar desempeño reproductivo y habilidad materna. Frente a estas múltiples exigencias, la evaluación de una vaca necesita del establecimiento de índices que engloben, además de características reproductivas, su habilidad materna, que es importante y se refleja en mayor supervivencia y peso de sus crías al destete, determinando su valor económico (Azevêdo *et al.*, 2005).

Para evaluar bovinos Nelore en Brasil, Lôbo (1996) propuso el índice FR. Este índice expresa los kilogramos de becerro destetado durante un año por una vaca e incluye su fertilidad y habilidad materna. Esta última representa un factor de suma importancia, ya que involucra una serie de atributos que la vaca debe poseer para favorecer el adecuado desarrollo de su cría, entre los que se encuentran inmunidad pasiva, atención, protección y capacidad genética de adaptación. El índice además toma en cuenta la supervivencia y el potencial de crecimiento del becerro antes del destete, y se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$FR = \frac{PBD * 365}{IEP}$$

donde, *FR* = fertilidad real; *PBD* = peso del becerro al destete; e *IEP* = intervalo entre partos.

La productividad materna de las vacas debe ser constantemente evaluada y para ello la FR constituye una valiosa herramienta, además de ser un indicador útil en la selección de animales superiores genéticamente (Viu *et al.*, 2008). La variación fenotípica observada en algunos de los valores promedio de FR reportados en la literatura (Cuadro 11), indica que es una característica compleja, pues involucra eventos reproductivos, habilidades maternas y la expresión de genes de crecimiento.

Respecto a la heredabilidad (Cuadro 11), algunos autores han encontrado que es de magnitud baja, lo cual indica pobre influencia de los genes aditivos en la característica, reflejando la necesidad de mejorar el manejo reproductivo, sanitario y nutricional de los animales para incrementar su FR; mientras que otros autores han reportado que es de magnitud media a alta, indicando que existe suficiente variabilidad genética aditiva para obtener respuesta a la selección con base en tal característica, por ello estos últimos autores recomiendan incluir FR en los programas de selección.

Cuadro 11. Valores promedio y heredabilidades reportadas en la literatura para fertilidad real en bovinos Nelore.

Promedio, kg	Heredabilidad	Referencia
144.00	0.06	Silveira <i>et al.</i> , 2004
141.00	0.13	Mercadante <i>et al.</i> , 1999
88.41	0.16	Oliveira, 2007
184.69	0.49	Campello <i>et al.</i> , 1999

La FR es afectada por el mes de parto de la vaca, ya que a través del año cambia la disponibilidad de forraje y en consecuencia la producción de leche por parte de las hembras para alimentar a sus crías. Como es de esperarse, en los meses lluviosos se incrementa la disponibilidad y calidad del forraje, y se mejora la producción de leche. El PD de las crías y en consecuencia la FR de la hembra se mejora cuando las hembras paren en los meses de la época seca (agosto para el caso de la región oeste de Brasil), debido a que en la fase inicial

del desarrollo del becerro el volumen de leche necesario para su supervivencia no es muy grande. Después, al mismo tiempo que ocurre el desarrollo y el aumento de las exigencias nutricionales del becerro, inicia la época de lluvias que mejoran la calidad y cantidad del forraje disponible. Por otro lado, de manera inversa la FR de las vacas se reduce cuando el parto ocurre durante la época de lluvias (Silveira *et al.*, 2004; Viu *et al.*, 2008).

Las vacas con más partos mejoran su habilidad materna; por tanto, destetan becerros de mayor peso, esto se traduce en un mayor valor para FR (Campello *et al.*, 1999). Viu *et al.* (2008) reportaron que las hembras del tercer al sexto parto destetaron becerros de mayor peso, tuvieron IEP más cortos y por ende presentan un mayor valor de FR que las hembras de segundo y séptimo parto.

Silveira *et al.* (2004) mencionaron que al aplicar selección sólo para obtener mayor PD, se puede tener una disminución de la eficiencia reproductiva de las hembras cuando el nivel nutricional no es óptimo (lo cual ocurre muchas veces en bovinos carne criados de manera extensiva), debido a que la EPP puede aumentar en función de un mayor periodo de crecimiento, retardando los eventos reproductivos, además de un mayor peso a la edad adulta, lo cual implica mayores requerimientos de mantenimiento y se traduce en IEP más largo y menor FR. Por otro lado, el acabado de la canal de los machos se tendrá a edades más tardías.

El sexo de la cría es una importante fuente de variación para FR. En el estudio realizado por Silveira *et al.* (2004), las vacas con crías macho presentaron un valor promedio de 153 kg, mientras que para vacas con crías hembra el valor promedio fue de 144 kg (la FR de las vacas se incrementó 6.5% cuando parieron crías macho). Las vacas primíparas que amamantan a crías macho presentan IEP más largo que aquellas que amamantan crías hembra, lo cual puede traer consigo menores valores de FR; sin embargo, como FR depende también de la ganancia predestete de la cría y como los machos son más pesados, la FR es mayor, a pesar de que éstas tengan IEP más largos. Lo

anterior indica que la ganancia predestete de la cría afecta con mayor intensidad que el IEP al índice de FR.

Viu *et al.* (2008) reportaron valores promedio de FR para vacas que parieron becerros machos y hembras (156.0 ± 36.7 y 145.0 ± 32.3 , respectivamente); estas diferencias fueron atribuidas a que los machos son más pesados al nacimiento y al destete por efecto de la testosterona. McManus *et al.* (2002) reportaron que la FR para las vacas con crías machos fue 113.9 kg, mientras que para las vacas con crías hembra fue 111.85 kg.

Para examinar las posibilidades de implementar selección de FR y otras características, las correlaciones genéticas entre tales características deben ser estudiadas. Los resultados publicados al respecto son escasos pero prometedores. La mayoría de ellos manifiestan la existencia de relaciones genéticas favorables de FR con reproducción y crecimiento (Cuadro 12).

Cuadro 12. Correlaciones genéticas de fertilidad real (FR) con intervalo entre partos (IEP), edad al primer parto (EPP), fecha de parto (FP), peso al nacimiento (PN) y peso al destete (PD) en bovinos Nelore.

Referencia	Par de características				
	FR-IEP	FR-EPP	FR-FP	FR-PN	FR-PD
McManus <i>et al.</i> , 2002	-0.82			0.27	0.19
Silveira <i>et al.</i> , 2004	-0.90	-0.89	-0.86		
Oliveira, 2007	0.33				0.64

Otro índice propuesto por Lôbo (1996) es el de productividad acumulada (PAC). Este índice considera la producción total de becerros destetados (kg), el tiempo total de producción de becerros (en meses o días) y el inicio de pariciones (teniendo como meta 30 meses de edad) de una vaca. Este indicador se expresa de la manera siguiente:

$$PAC = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} PBDi * 365}{EVPn - 912}$$

donde, PAC = productividad acumulada (kilogramos de becerro destetado por año); n = número de partos; $PBDi$ = peso del becerro al destete en el i -ésimo parto (kg); y $EVPn$ = edad de la vaca en el n -ésimo parto (días).

Este índice refleja la contribución de la vaca durante su permanencia en el hato, por tanto, está directamente relacionado con la eficiencia reproductiva, y depende de la EPP y del IEP. Es un fiel indicador de la fertilidad, habilidad materna, precocidad sexual y longevidad de la vaca (Rosa, 1999). Debido a que este índice incorpora varias características de importancia económica en la selección de vacas, expresa variabilidad genética (Cuadro 13) y su inclusión en los objetivos de selección puede mejorar la producción de kilogramos de becerro destetado por vaca por año (Grossi *et al.*, 2008).

Cuadro 13. Valores promedio y heredabilidades reportadas en la literatura para productividad acumulada en bovinos Nelore.

Promedio, kg	Heredabilidad	Referencia
96.74	0.11	Azevêdo <i>et al.</i> , 2005
149.00	0.14	Grossi <i>et al.</i> , 2008
130.00	0.15	Schwengber, 2001
144.00	0.19	Rosa, 1999

Rosa (1999) reportó una correlación genética de 0.18 entre PAC y peso adulto en bovinos Nelore. Esta relación entre PAC y peso adulto se considera de magnitud media, si bien existe una relación genética directa entre estas características, la selección conjunta de las mismas no es sencilla; al llevar a cabo un programa de selección conjunta, la productividad de las vacas tenderá a disminuir a partir de determinado punto. Con el aumento de tamaño ocurrirá un aumento proporcional de las demandas nutricionales de los animales que el medio ambiente podría no suplir adecuadamente. Además de esto, el aumento de tamaño puede acarrear otros efectos negativos en salud, reproducción y longevidad. Tomando en cuenta esta relación de naturaleza cuadrática, se debe poner especial atención en buscar el punto ideal, es decir, el peso al cual las

vacas alcanzan la máxima PAC considerando los recursos genéticos y ambientales disponibles.

Las correlaciones genéticas negativas y de magnitud media entre EPP y PAC (-0.33) indican que las vacas que inician pronto su actividad reproductiva pueden producir más kilogramos de becerro destetado por año, las vacas que tienen su primer parto a edades tempranas tienen mayor vida productiva en el hato, mejorando su contribución total. Por otra parte, las correlaciones positivas y de magnitud alta entre PAC y características de crecimiento [PA (0.70) y peso a 450 d de edad (0.65)] indican que vacas con mayor peso corporal a estas edades producen más kilogramos de becerro destetado por año. Sin embargo, se deben establecer límites máximos de peso corporal, debido a que vacas muy pesadas pueden exhibir bajas tasas de fertilidad y tener crías muy grandes. Los becerros muy pesados y grandes al nacimiento no son una ventaja económica debido a una mayor incidencia de distocias, además de que estos becerros demandan mayor habilidad materna (Grossi *et al.*, 2008).

La baja heredabilidad de PAC, denota que se pueden obtener mayores valores de una manera más rápida al implementar prácticas de manejo que mejoren las condiciones nutricionales, sanitarias y reproductivas del hato. No obstante, cabe señalar que existe suficiente variabilidad genética aditiva para incluir PAC como criterio de selección en programas de mejoramiento genético, lo cual ocasionará mayor productividad de las vacas del hato a consecuencia de la selección de reproductores evaluados y considerados superiores para PAC. De esta forma, al utilizar el productor reproductores con superioridad genética para PAC, estará mejorando habilidad materna, precocidad sexual y fertilidad en su hato de manera simultánea, aunque el progreso genético sea lento (Schwengber *et al.*, 2001; Azevêdo *et al.*, 2005).

Existe una relación favorable entre la productividad de la vaca y su longevidad, de acuerdo con Santana *et al.* (2013), la correlación genética es de magnitud alta (0.85 y 0.99 para bovinos Nelore y bovinos de una población compuesta, respectivamente) entre la productividad promedio anual de la vaca, que es un

índice que mide la productividad de la vaca expresada en kilogramos de becerro destetado por vaca por año, y la HP de la misma, definida como el éxito para parir un becerro cada año hasta los seis años de edad cuando tiene la oportunidad de aparearse.

Según Rahnefeld *et al.* (1993), la productividad de una vaca debe ser evaluada a través de una medida que considere diferencias en eficiencia reproductiva, peso de la vaca y PD de la cría. Los autores anteriores compararon cuatro medidas de productividad: (1) kilogramos de becerro destetado por oportunidad de apareamiento; (2) kilogramos de becerro destetado por oportunidad de apareamiento con el peso de la vaca al destete de la cría como covariable; (3) kilogramos de becerro destetado por oportunidad de apareamiento por unidad de peso de la vaca al destete de la cría; y (4) kilogramos de becerro destetado por oportunidad de apareamiento por unidad de peso metabólico ($\text{kg}^{0.75}$) de la vaca al destete de la cría. Los autores determinaron que el método 3 fue el mejor indicador de productividad de la vaca, ya que fue el que más redujo la varianza del error. De acuerdo con estos autores, las medidas de productividad que no consideran las diferencias en tamaño de las vacas son inadecuados y reportaron también que las vacas ligeras son más productivas que las pesadas.

2.7 Literatura citada

- Archer, J. A., E. C. Richardson, R. M. Herd, and P. F. Arthur. 1999. Potential for selection to improve efficiency of feed use in beef cattle: a review. *Australian Journal of Agricultural Research* 50: 147-161.
- Archer, J. A., P. F. Arthur, P. F. Parnell, and R. J. Van de Ven. 1998b. Effect of divergent selection for yearling growth rate on female reproductive performance in Angus cattle. *Livestock Production Science* 57: 33-40.
- Archer, J. A., R. M. Herd, P. F. Arthur, and P. F. Parnell. 1998a. Correlated responses in rate of maturation and mature size of cows and steers to divergent selection for yearling growth rate in Angus cattle. *Livestock Production Science* 54: 183-192.
- Arnett, D. W., G. L. Holland, and T. Robert. 1971. Some effects of obesity in beef females. *Journal of Animal Science* 33: 1129-1136.
- Arthur, P. F., P. F. Parnell, and E. C. Richardson. 1997. Correlated responses in calf body weight and size to divergent selection for yearling growth rate in Angus cattle. *Livestock Production Science* 49: 305-312.
- Azevêdo, M. R., D. M., R. Filho M., R. N. Lôbo B., R. Lôbo B., A. A. A. Moura N., E. C. Filho P., e C. H. Malhado M. 2005. Produtividade acumulada (PAC) das matrizes em rebanhos Nelore do norte e nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Zootecnia* 34: 54-59.
- Bellows, R. A., and R. E. Short. 1978. Effects of feed level on birth weight, calving difficulty and subsequent fertility. *Journal of Animal Science* 46: 1522-1528.
- Bertazzo, P., R., R. T. Fonseca F., T. Gonçalves M., I. Pereira G, J. Eler P., J. B. Ferraz S., A. I. Oliveira G., e I. Andrade F. 2004. Parâmetros de longevidade e produtividade de fêmeas de raça Nelore. *Revista Brasileira de Zootecnia* 33: 1118-1127.
- BIF. 2010. Guidelines for uniform beef improvement programs. 9th edition. Beef Improvement Federation, North Carolina State University, Raleigh. 182 p.
- Boligon, A., A., L. Albuquerque G., e P. R Rorato N. 2008. Associações genéticas entre pesos e características reprodutivas em rebanhos da raça Nelore. *Revista Brasileira de Zootecnia* 37: 56-601.
- Bourdon, R. M., and J. S. Brinks. 1982. Genetic, environmental and phenotypic relationships among gestation length, birth weight, growth traits and age at first calving in beef cattle. *Journal of Animal Science* 55: 543-553.
- Brinks, J. S., J. E. Olson, and E. J. Carroll. 1973. Calving difficulty and its association with subsequent productivity in Herefords. *Journal of Animal Science* 36: 11-17.

- Brinks, J. S., M. J. McNerney, and P. J. Chenowith. 1978. Relationship of age at puberty in heifers to reproductive traits in young bulls. *Proc. Western Section American Society of Animal Science* 29: 28-30.
- Cammack, K. M., M. G. Thomas, and R. M. Enns. 2009. Review: reproductive traits and their heritabilities in beef cattle. *Professional Animal Scientist* 25: 517-528.
- Campello, C., C., R. Filho M., e R. N. Lôbo B. 1999. Intervalo de partos e fertilidade real em vacas Nelore no estado do Maranhão. *Revista Brasileira de Zootecnia* 28: 474-479.
- Chin, C., R. C., J. G. Magaña M., J. C. Segura C., y R. Núñez D. 2012. Factores ambientales y proporción racial que influyen en el peso al nacimiento, al destete y edad al primer parto en bovinos Suizo Pardo en México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 15: 55-60.
- Davis, G. P., N. J. Corbet, M. J. MacKinnon, D. J. S. Hetzel, K. W. Entwistle, and R. Dixon. 1993. Response in female fertility and calf growth to selection for pregnancy rate in tropical beef cattle. *Australian Journal of Agricultural Research* 44: 1509-1521.
- Dickerson, G. E. 1970. Efficiency of animal production-molding the biological components. *Journal of Animal Science* 30: 849-859.
- Dickerson, G. E., N. Künzi, L. V. Cundiff, R. M. Koch, V. H. Arthaud, and K. E. Gregory. 1974. Selection criteria for efficient beef production. *Journal of Animal Science* 39: 659-673.
- Doyle, S. P., B. L. Golden, R. D. Green, and J. S. Brinks. 2000. Additive genetic parameter estimates for heifer pregnancy and subsequent reproduction in Angus female. *Journal of Animal Science* 78: 2091-2098.
- Dziuk, P. J., and R. A. Bellows. 1983. Management of reproduction of beef cattle, sheep and pigs. *Journal of Animal Science* 57: 355-379.
- Eler, J. P., J. A. Il V. Silva, J. B. S. Ferraz, F. Dias, H. N. Oliveira, J. L. Evans, and B. L. Golden. 2002. Genetic evaluation of the probability of pregnancy at 14 months for Nelore heifers. *Journal of Animal Science* 80: 951-954.
- Ferrel, C. L. 1982. Effects of postweaning rate of gain on onset of puberty and productive performance of heifers of different breeds. *Journal of Animal Science* 55: 1272-1283.
- Fleck, A. T., R. R. Schalles, and G. H. Kiracofe. 1980. Effect of growth rate through 30 months on reproductive performance of beef heifers. *Journal of Animal Science* 51: 816-821.
- Forni, S., and L. G. Albuquerque. 2005. Estimates of genetic correlations between days to calving and reproductive and weight traits in Nelore cattle. *Journal of Animal Science* 83: 1511-1515.

- Frazier, E. L., L. R. Sprott, J. O. Sanders, P. F. Dahm, J. R. Crouch, and J. W. Turner. 1999. Sire marbling score expected progeny difference and weaning weight maternal expected progeny difference associations with age at first calving and calving interval in Angus beef cattle. *Journal of Animal Science* 77: 1322-1328.
- Funk, D. A. 2006. Major advances in globalization and consolidation of the artificial insemination industry. *Journal of Dairy Science* 89: 1362-1368.
- Garrick, D. J. 2006. Development of genetic evaluations and decisions support to improve feed efficiency. In: 38th Annual Research Symposium and Annual Meeting, Choctaw, Mississippi. pp: 32-40.
- Gregory, K. E., L. V. Cundiff, and R. M. Koch. 1992. Breed effects and heterosis in advanced generations of composite populations for reproduction and maternal traits of beef cattle. *Journal of Animal Science* 70: 656-672.
- Gressler, M., M. G., J. C. Pereira C., J. A. Bergmann G., V. Andrade J., M. Paulino F., e S. Gressler L. 2005. Aspectos genéticos do peso à desmama e de algumas características reprodutivas de fêmeas Nelore. *Arquivos Brasileiros de Medicina Veterinária e Zootecnia* 57: 533-538.
- Grossi, D. A., O. G. Frizzas, C. C. P. Paz, L. A. F. Bezerra, R. B. Lôbo, J. A. Oliveira, and D. P. Munari. 2008. Genetic associations between accumulated productivity, and reproductive and growth in Nelore cattle. *Livestock Science* 117: 139-146.
- Gutiérrez, J. P., I. Alvarez, I. Fernández, L. J. Royo, J. Díez, and F. Goyache. 2002. Genetic relationships between calving date, calving interval, age at first calving and type traits in beef cattle. *Livestock Production Science* 78: 215-222.
- Herd, R. M., J. A. Archer, and P. F. Arthur. 2003. Reducing the costs of beef production through genetic improvement in residual feed intake: opportunity and challenges to application. *Journal of Animal Science*. 81: 9-17.
- Koots, K. P., J. P. Gibson, C. Smith, and J. W. Wilton. 1994. Analysis of published genetic parameter estimates for beef production traits. 1. Heritability. *Animal Breeding Abstracts* 62: 309-333.
- Kress, D. D., D. E. Doornbos, and D. C. Anderson. 1990. Performance of crosses among Hereford, Angus and Simmental cattle with different levels of Simmental breeding: V. Calf production, milk production and reproduction of three to eight year old dams. *Journal of Animal Science* 68: 1910-1921.
- Laster, D. B., G. M. Smith, L. V. Cundiff, and K. E. Gregory. 1979. Characterization of biological types of cattle (cycle II) II. Postweaning growth and puberty of heifers. *Journal of Animal Science* 48: 500-508.

- Laster, D. B., H. A. Glimp, L. V. Cundiff, and K. E. Gregory. 1973. Factors affecting dystocia and the effects of dystocia on subsequent reproduction in beef cattle. *Journal of Animal Science* 36: 695-705.
- Lôbo, B., R. 1996. Programa de melhoramento genético da raça Nelore. 3a. ed. Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo. Brasil. 88 p.
- Lucy, M. C. 2001. Reproductive loss in high producing dairy cattle: where will it end? *Journal of Dairy Science* 84: 1277-1293.
- MacGregor, R. G., and N. H. Casey. 2000. The effects of maternal calving date and calving interval on growth performance of beef calves. *South African Journal of Animal Science* 30: 70-76.
- MacNeil, M. D., L. V. Cundiff, C. A. Dinke, and R. M. Koch. 1985. Genetic correlations of reproductive and maternal traits with growth and carcass trait in beef cattle. Roman L. Hruska U. S. Meat Animal Research Center. Paper 49.
- Mäki-Tanila, A. 2007. Animal breeding further ameliorated. Editorial. *Journal of Animal Breeding and Genetics* 124: 1-2.
- Martin, L. C., J. S. Brinks, R. M. Bourdon, and L. V. Cundiff. 1992. Genetic effects on beef heifer puberty and subsequent reproduction. *Journal of Animal Science* 70: 4006-4017.
- McManus, C., M. G. Saueressig, R. Falcão A., G. Serrano, K. R. Marcelino A., e G. R. Paludo. 2002. Componentes reprodutivos e produtivos no rebanho de corte da Embrapa cerrados. *Revista Brasileira de Zootecnia* 31: 648-657.
- Meacham, N. S., and D. R. Notter. 1987. Heritability estimates for calving date in Simmental cattle. *Journal of Animal Science* 64: 701-705.
- Mercadante, Z., M. E., R. Lôbo B., e H. Oliveira N. 2000. Estimativas de (co)variâncias entre características de reprodução e de crescimento em fêmeas de um rebanho Nelore. *Revista Brasileira de Zootecnia* 29: 997-1004.
- Mercadante, Z., M. E., R. Lôbo B., L. R. Borjas A. D., A. F. Bezerra L., e H. Oliveira N. 1999. Estudo genético – quantitativo de características de reprodução e produção em fêmeas da raça Nelore. *In: XXXV Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia*. Brasil. pp: 237.
- Meyer, K., K. Hammond, M. J. Mackinnon, and P. F. Parnell. 1991. Estimation of covariances between reproductive and growth traits in Australian beef cattle. *Journal of Animal Science* 69: 3533-3543.
- Montaño-Bermudez, M., M. K. Nielsen, and G. H. Deutscher. 1990. Energy requirements for maintenance of crossbred beef cattle with different genetic potential for milk. *Journal of Animal Science*. 68: 2279-2288.

- Morris, C. A., and J. W. Wilton. 1976. Influence of body size on the biological efficiency of cows: a review. *Canadian Journal of Animal Science* 56: 613-647.
- Mwansa, P. B., R. A. Kemp, D. H. Crews Jr., J. P. Kastelic, D. R. C. Bailey, and G. H. Coulter. 2000. Selection for cow lifetime pregnancy rate using bull and heifer growth and reproductive traits in composite cattle. *Canadian Journal of Animal Science* 80: 507-510.
- Nicholas, F. W. 1996. Genetic improvement through reproductive technology. *Animal Reproduction Science*. 42: 205-214.
- Notter, D. R., J. O. Sanders, G. E. Dickerson, G. M. Smith, and T. C. Cartwright. 1979. Simulated efficiency of beef production for a Midwestern cow-calf-feedlot management system. I. Milk production. *Journal of Animal Science* 49: 70-82.
- Núñez-Domínguez, R., L. V. Cundiff, G. E. Dickerson, K E. Gregory, and R. M. Koch. 1991. Lifetime production of beef heifers calving first at two versus three years of age. *Journal of Animal Science* 69: 3467-3479.
- Oijen, M. V., M. M. Bermudez, and M. K. Nielsen. 1993. Economical and biological efficiencies of beef cattle differing in level of milk production. *Journal of Animal Science* 71: 44-50.
- Oliveira, D., L. 2007. Estudo da influência de fatores genéticos e ambientais sobre as características produtivas e reprodutivas em um rebanho de bovinos Nelore no estado de Goiás. Dissertação de mestrado em ciências agrárias. Universidade de Brasília. Brasil. 56 p.
- Oyama, K., T. Katsuta, K. Anada, and F. Mukai. 2004. Genetic parameters for reproductive performance of breeding cows and carcass traits of fattening animals in Japanese Black (Wagyu) cattle. *Animal Science* 78: 195-201.
- Pitchfor, W. S. 2004. Genetic improvement of feed efficiency of beef cattle: what lesson can be learnt from other species? *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 44: 371-382.
- Rahnefeld, G. W., G. M. Weiss, and D. Ward. 1993. A comparison of methods to evaluated beef cow production. *Canadian Journal of Animal Science* 73: 971-975.
- Rasali, D. P., G. H. Crow, J. N. B. Shrestha, A. D. Kennedy, and A. Brûlé-Babel. 2005a. Genetic association between cows' stayability to three years of age and juvenile growth traits in Canadian Angus herds. *Canadian Journal of Animal Science* 85: 139-143.
- Rasali, D. P., G. H. Crow, J. N. B. Shrestha, A. D. Kennedy, and A. Brûlé-Babel. 2005b. Multiple trait estimates of genetic parameters for juvenile growth and calving traits in Canadian Angus cattle. *Canadian Journal of Animal Science* 85: 309-316.

- Rauw, W. M., E. Kanis, E. N. Noordhuizen-Stassen, and F. J. Grommers. 1998. Undesirable side effects of selection for high production efficiency in farm animals: a review. *Livestock Production Science* 56: 15-33.
- Rege, J. E. O., and T. R. Fabula. 1993. Factors affecting calving date and its relationship with productive traits of Hereford dams. *Animal Production* 57: 385–395.
- Ríos, U., A. 2008. Estimadores de parámetros genéticos para características de crecimiento predestete de bovinos. Revisión. *Técnica Pecuaria en México* 46: 37-67.
- Rosa, N., A. 1999. Variabilidade fenotípica e genética do peso adulto e da produtividade acumulada de matrizes em rebanhos de seleção da raça Nelore no Brasil. Tese doutoral. Universidade de São Paulo. Brasil. 143 p.
- Royal, M. D., A. P. F. Flint, and J. A. Wooliams. 2002. Genetic and phenotypic relationships among endocrine and traditional fertility traits and production traits in Holstein-Friesian dairy cows. *Journal of Dairy Science* 85: 958-967.
- Santana, M. L., J. P. Eler, A. B. Bignardi, and J. B. S. Ferraz. 2013. Genetic associations among average annual productivity, growth traits and stayability: A parallel between Nelore and composite beef cattle. *Journal of Animal Science*. 91: 2566-2574.
- Schwengber, B., E., L. A. Bezerra F., e R. Lôbo B. 2001. Produtividade acumulada como critério de seleção em fêmeas da raça Nelore. *Ciência Rural, Santa Maria* 31: 483-486.
- Shook, G E. 2006. Major advances in determining appropriate selection goals. *Journal of Dairy Science* 89: 1349-1361.
- Short, R. E., and R. A. Bellows. 1971. Relationships among weight gains, age at puberty and reproductive performance in heifers. *Journal of Animal Science* 32: 127-131.
- Silveira, C., J., C. McManus, A. Mascioli dos S., L. O. da Silva C., A. da Silveira C., J. A. Garcia S., e H. Louvandini. 2004. Fatores ambientais e parâmetros genéticos para características produtivas e reprodutivas em um rebanho Nelore no estado do Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Zootecnia* 33: 1432-1444.
- Smith, B. A., J. S. Brinks, and G. V. Richardson. 1989. Estimation of genetic parameters among reproductive and growth traits in yearling heifers. *Journal of Animal Science* 67: 2881-2885.
- Snelling, W. M., B. L. Golden, and R. M. Bourdon. 1995. Within-herd genetic analyses of stayability of beef females. *Journal of Animal Science* 73: 993–1001.

- Stokes, K. W., C. R. Shumway, P. E. Doren, W. O. Ajayi, T. C. Nelsen, and T. C. Cartwright. 1986. Economic effects of alternative beef cow size and milking potential in cow-calf operations. *Journal of Animal Science* 62: 1154-1163.
- Tanida, H., W. D. Hohenboken, and S. K. DeNise. 1988. Genetic aspects of longevity in Angus and Hereford cows. *Journal of Animal Science* 66: 640-647.
- Varner, L. W., R. A. Bellows, and D. S. Christensen. 1977. A management system for wintering replacement heifers. *Journal of Animal Science* 44: 165-171.
- Viu, O., M. A., I. Brasil G., D. Lopes T., M. Gambarini L., H. Ferraz T., B. Oliveira Filho D., C. Magnabosco U., e A. Viu F. M. 2008. Fertilidade real e intervalo de partos de vacas Nelore pó sob manejo extensivo e sem estação de monta na região centro oeste do Brasil. *Biociência Jornal* 24: 104-111.

3 ASOCIACIÓN GENÉTICA DE LA FERTILIDAD REAL EN BOVINOS CARNE CON CARACTERÍSTICAS REPRODUCTIVAS Y DE CRECIMIENTO

3.1 RESUMEN

El desempeño reproductivo de la vaca y su habilidad materna inciden en la rentabilidad de los sistemas de producción vaca-becerro. El objetivo fue estimar componentes de (co)varianza y heredabilidades (h^2) para el índice de fertilidad real (FR), edad al primer parto (EPP), intervalo entre partos (IEP) y peso al destete (PD), así como correlaciones genéticas (r_g) de FR con EPP, IEP y PD. El índice FR se calculó como el producto de PD de la cría por 365, dividido entre el IEP. Se utilizaron registros de comportamiento de bovinos Brangus Negro (BN), Salers (SA) y Suizo Europeo (SE), provenientes de ranchos localizados en diferentes estados de México, y el archivo de pedigrí incluyó 55,142 (BN), 14,065 (SA) y 33,160 (SE) animales. Análisis univariados y bivariados (FR-EPP, FR-IEP, y FR-PD), considerando el modelo animal, se llevaron a cabo para estimar componentes de (co)varianza y parámetros genéticos mediante el método de máxima verosimilitud restringida usando el programa MTDFREML. Se calculó la respuesta en FR directa y correlacionada a través de la selección para EPP, IEP o PD. Los estimadores de h^2 directa para FR fueron 0.05, 0.09 y 0.06, para EPP 0.05, 0.01 y 0.10, para IEP 0.04, 0.12 y 0.04, y para PD 0.18, 0.23 y 0.21 en BN, SA y SE, respectivamente. Los estimadores de r_g en BN, SA y SE fueron respectivamente -1.00, -0.76 y -1.00 para FR-EPP, -0.84, -0.93 y -0.90 para FR-IEP, y 0.17, 0.17 y 0.15 para FR-PD. Para las tres razas, la selección para PD resultó en cambios correlacionados en FR mayores que cuando se utiliza la selección directa para FR (0.23 vs 0.12, 0.26 vs 0.13, y 0.23 vs 0.13 kg vaca⁻¹ año⁻¹, para BN, SA, y SE, respectivamente). La estimación de h^2 mejoró en magnitud y precisión con los análisis bivariados. Todas las r_g de FR con las otras tres características fueron favorables. La selección para PD y posteriormente para EPP, puede mejorar genéticamente la productividad de las vacas.

Palabras clave: análisis bivariados, modelo animal, heredabilidad, correlación genética.

Tesis de Maestría en Ciencias en Innovación Ganadera. Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Jorge Ángel Hidalgo Moreno

Director: Rafael Núñez Domínguez

GENETIC ASSOCIATION OF TRUE FERTILITY IN BEEF CATTLE WITH REPRODUCTIVE AND GROWTH TRAITS

3.2 ABSTRACT

The reproductive performance and maternal ability of the cow affect profitability of cow-calf production systems. The objective was to estimate (co)variance components and heritabilities (h^2) for the true fertility index (TF), age at first calving (AFC), calving interval (CI) and weaning weight (WW), as well as genetic correlations (r_g) of TF with AFC, CI and WW. The TF index was computed as WW of the calf times 365, and divided by CI. Performance records of Brangus (BA), Salers (SA) and Braunvieh (BR) cattle from different farms of Mexico were used. The number of animals in the pedigrees was 55,142, 14,065 and 33,160 for BA, SA and BR, respectively. Univariate and bivariate analyses considering the animal model were carried out to estimate (co)variance components and genetic parameters through restricted maximum likelihood procedures using the MTDFREML program. Direct and correlated response on TF when selection was performed on AFC, CI or WW was calculated. Direct h^2 estimates were 0.05, 0.09 and 0.06 for TF, 0.05, 0.01 and 0.10 for AFC, 0.04, 0.12 and 0.04 for CI, and 0.18, 0.23 and 0.21 for WW in BA, SA and BR, respectively. Estimates of r_g in BA, SA and BR were, respectively, -1.00, -0.76 and -1.00 for TF-AFC, -0.84, -0.93 and -0.90 for TF-CI, and 0.17, 0.17 and 0.15 for TF-WW. For the three breeds, selection for WW resulted in correlated changes in TF larger than direct selection for TF (0.23 vs. 0.12, 0.26 vs. 0.13, and 0.23 vs. 0.13 kg cow⁻¹ yr⁻¹, for BA, SA, y BR, respectively). The h^2 estimates improved in magnitude and precision with bivariate analyses. All r_g of TF with the other three traits were in the desired direction. Selection for WW and later for AFC may genetically improve cow productivity.

Keywords: bivariate analyses, animal model, heritability, and genetic correlation.

Master in Science Thesis. Universidad Autónoma Chapingo

Author: Jorge Ángel Hidalgo Moreno

Advisor: Rafael Núñez Domínguez

3.3 INTRODUCCIÓN

En los sistemas de producción vaca-becerro la rentabilidad es determinada principalmente por la productividad de las vacas. Por tanto, el inicio y longitud de la vida productiva de las vacas, el número de becerros producidos y los kilogramos de becerro destetado por vaca por unidad de tiempo son factores de importancia económica (Santana *et al.*, 2013). Según Meacham y Notter (1987), los hatos en que las vacas presentan alta precocidad sexual y fertilidad poseen mayor disponibilidad de animales para venta y selección, permitiendo mayor progreso genético y rentabilidad. Además, hatos en los que las vacas paren con regularidad y perduran produciendo por largo tiempo requieren menos vaquillas de reemplazo que aquellos hatos en los cuales las vacas tienen altas probabilidades de no quedar gestantes y por ende ser desechadas a edades tempranas (Garrick, 2006).

Considerando también que cuando las vacas destetan becerros con bajo peso al destete (PD) pueden ser desechadas, la productividad de las mismas depende entonces no sólo de su precocidad sexual y desempeño reproductivo, sino también de su habilidad materna que se refleja en la supervivencia y PD de sus crías. Lo ideal es que una vaca destete becerros pesados y al mismo tiempo consiga mantener una condición corporal para parir un becerro cada año (Azevêdo *et al.*, 2005).

En este contexto y considerando que los kilogramos de becerro destetado por año influyen directamente en la rentabilidad de los sistemas vaca-becerro, la evaluación de la productividad de las vacas demanda el uso de índices que engloben además de su fertilidad, su habilidad materna. Para evaluar la productividad de bovinos Nelore en Brasil, Lôbo (1996) propuso el índice fertilidad real (FR), que expresa los kilogramos de becerro destetado durante un año por una vaca e incluye su fertilidad y habilidad materna; este índice evalúa conjuntamente el intervalo entre partos (IEP) de las vacas y el PD de sus crías. Algunos autores han estudiado la heredabilidad del índice FR con resultados

variables (heredabilidades de 0.06 a 0.49) y algunos de ellos han estimado suficiente variabilidad para lograr progreso genético (Campello *et al.*, 1999; Mercadante *et al.*, 2000; Silveira *et al.*, 2004; Oliveira, 2007). Además, con el objetivo de examinar posibilidades de implementar la selección para FR y otras características, varios autores (McManus *et al.*, 2002; Silveira *et al.*, 2004; Oliveira, 2007) han estimado correlaciones genéticas y aunque los resultados publicados son escasos, sugieren que es posible el mejoramiento genético simultáneo en crecimiento, reproducción y productividad.

El IEP es una característica fácil de medir, y ha sido utilizado como indicador de la fertilidad y salud reproductiva de la vaca (Campello *et al.*, 1999). Las heredabilidades reportadas para esta característica en su mayoría son bajas (0.01 a 0.12; Gutiérrez *et al.*, 2002; Bertazzo *et al.*, 2004; Oliveira, 2007); sin embargo, algunos autores han publicado estimaciones de magnitud alta (0.32 a 0.42; Campello *et al.*, 1999; Silveira *et al.*, 2004). Las correlaciones genéticas con FR han sido poco estudiadas y con resultados variables. McManus *et al.* (2002) y Silveira *et al.* (2004) publicaron correlaciones genéticas favorables de magnitud alta (-0.82 y -0.90, respectivamente), mientras que Oliveira (2007) estimó una correlación genética desfavorable de magnitud media (0.33).

El PD se ha utilizado para evaluar diferencias en potencial de crecimiento de los becerros y en habilidad materna de las vacas (BIF, 2010). En una revisión involucrando 89 grupos raciales en 38 países, Ríos (2008) calculó una heredabilidad directa promedio de 0.27; además, McManus *et al.* (2002) y Oliveira (2007) estimaron correlaciones genéticas favorables entre FR y PD (0.16 y 0.69, respectivamente), sugiriendo que las vaquillas con mayor potencial de crecimiento al destete serán más productivas.

El inicio de la vida productiva de una vaca está dado por la edad al primer parto (EPP), la cual es un factor importante de la eficiencia reproductiva de las vacas, ya que su presentación tardía reduce el valor económico del animal al disminuir la vida productiva de las vacas (Núñez-Domínguez *et al.*, 1991; Frazier *et al.*, 1999).

Las estimaciones de heredabilidad para EPP son variables (0.01 a 0.37; Smith *et al.*, 1989; Bertazzo *et al.*, 2004; Forni y Albuquerque, 2005). Silveira *et al.*, (2004) estimaron una correlación genética favorable (-0.89) con FR, lo que indica que las vaquillas más precoces serán más productivas.

A pesar de lo anterior, los programas de mejoramiento genético en bovinos carne de México han usado primordialmente características de crecimiento como criterio de selección. Por tanto, el objetivo del presente estudio fue estimar componentes de (co)varianza y heredabilidades para FR, EPP, IEP y PD, así como correlaciones genéticas de FR con EPP, IEP y PD.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Animales y datos

Registros de comportamiento y pedigrí de las bases de datos de la Asociación Mexicana de Criadores de Ganado Brangus (raza Brangus Negro; BN), Asociación Salers Mexicana (raza Salers; SA) y Asociación Mexicana de Criadores de Ganado Suizo de Registro (raza Suizo Europeo; SE) fueron utilizados en este estudio.

Los animales BN nacieron entre 1964 y 2012, en 81 ranchos ubicados en diferentes estados del norte de México, fueron criados en condiciones de pastoreo extensivo (zonas áridas y semiáridas), con empadre (93% monta natural y 7% inseminación artificial) y partos a través de todo el año. Las crías permanecieron con su madre hasta el destete, el cual fue alrededor de siete meses de edad.

Los animales SA nacieron entre 1976 y 2011, en 13 ranchos ubicados en diferentes estados del norte de México, fueron criados en condiciones de pastoreo extensivo (zonas áridas y semiáridas), con empadre (80.3% monta natural y 19.7% inseminación artificial) y partos a través de todo el año. Las crías permanecieron con su madre hasta el destete, el cual fue alrededor de siete meses de edad.

Los animales SE nacieron entre 1983 y 2012, en 123 ranchos ubicados en diferentes estados del centro y sur de México, fueron criados en condiciones de pastoreo extensivo (zonas templadas y tropicales), con empadre (55.6% inseminación artificial, 42.6% monta natural y 1.8% transferencia de embriones) y partos a través de todo el año. Las crías permanecieron con su madre hasta el destete, el cual fue alrededor de ocho meses de edad.

3.4.2 Características

Las características evaluadas fueron: FR, EPP, IEP y PD. Los datos fueron de animales con padre, madre y fecha de nacimiento conocidos. Para la edición de PD, sólo se consideraron animales que contaban con registros de fecha de destete, fecha de nacimiento y peso al nacimiento. El PD se ajustó a 205 (BN y SA) o 240 d (SE) de edad y se eliminaron las observaciones fuera del intervalo de la $\bar{X} \pm 2.5 \sigma$. La EPP se midió como el tiempo transcurrido en años de la fecha de nacimiento a la fecha del primer parto de la vaquilla. Con base en revisión de literatura, las observaciones menores que dos años, así como las mayores que cuatro años se eliminaron (más de 85% de los registros estuvieron dentro del rango de 2 a 4 años de edad).

Para la edición de IEP se consideraron vacas de 2 a 13 partos que contaban con el registro de peso al nacimiento de la cría, para asegurar que la vaca había parido y estaba en producción en el rancho. El IEP se calculó como la diferencia en meses entre dos partos consecutivos. Con base en revisión de literatura y considerando promedios de 280 y 25 d para el largo de la gestación y la involución uterina, respectivamente, las observaciones menores que 9.87 meses (300 d) se excluyeron de los análisis (considerándose no posibles biológicamente). Los límites superiores rebasaban 100 meses, debido posiblemente a partos no registrados o errores en captura de información. Tomando en cuenta que la mayoría de los estudios reportan un coeficiente de variación entre 15.5 y 32.7%, se hizo una segunda edición por cada rancho, fijando un coeficiente de variación $[(\sigma/\bar{X}) 100]$ de 20%, con el fin de calcular una

nueva desviación estándar y así reducir la variación; las observaciones mayores que la $\bar{X} + 2.5 \sigma$ se eliminaron, con base en la nueva desviación estándar.

El índice FR, medido en kilogramos de becerro destetado por vaca por año, se estimó con los registros de PD e IEP editados, utilizando la fórmula propuesta por Lôbo (1996):

$$FR = \frac{PD * 365}{IEP}$$

La constante 365 permite expresar FR en base anual. Todos los registros de FR fueron utilizados en los análisis. Las características fueron sometidas a una prueba de normalidad a través del procedimiento PROC UNIVARIATE (SAS, 2009) y todas presentaron distribución normal.

3.4.3 Grupos contemporáneos

Los grupos contemporáneos (GC) para cada característica fueron definidos considerando los siguientes factores:

- PD: rancho, año y época de nacimiento, y sexo
- EPP: rancho, año y época de nacimiento, y tipo de servicio
- IEP: rancho, año y época de parto anterior, y tipo de servicio
- FR: rancho, año y época de parto, año y época de destete de la cría, y sexo de la cría

Las épocas de nacimiento, destete o parto se definieron como: invierno (época 1; del 21 de diciembre al 20 de marzo), primavera (época 2; del 21 de marzo al 20 de junio), verano (época 3; del 21 de junio al 20 de septiembre) y otoño (época 4; del 21 de septiembre al 20 de diciembre).

Después de la formación de GC se llevó a cabo una prueba de conectividad genética entre ellos, con ayuda del programa AMC (Roso and Schenkel, 2006), eliminando los no conectados. El número final de observaciones y GC utilizados

en la estimación de componentes de (co)varianza y parámetros genéticos para cada característica se muestra en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Estadísticos descriptivos, número de observaciones (n) y número de grupos contemporáneos (nGC) utilizados en la estimación de componentes de (co)varianza y parámetros genéticos para fertilidad real (FR), edad al primer parto (EPP), intervalo entre partos (IEP) y peso al destete (PD).

	Mínimo	Máximo	$\bar{X} \pm \sigma$	CV ^z , %	n	nGC
<i>FR, kilogramos vaca⁻¹ año⁻¹</i>						
BN ^y	37.54	392.80	190.65±56.43	29.60	6 786	1 039
SA ^x	31.30	337.71	184.63±50.18	27.18	3 063	206
SE ^w	48.95	381.22	172.01±63.25	36.77	2 870	658
<i>EPP, años</i>						
BN	2.00	4.00	2.76±0.55	20.14	3 817	432
SA	2.00	4.00	3.08±0.65	21.23	1 077	114
SE	2.00	4.00	2.97±0.56	18.86	2 259	459
<i>IEP, meses</i>						
BN	9.87	63.70	15.72±5.18	32.93	13 481	1 318
SA	9.87	56.51	15.57±7.27	46.68	3 537	219
SE	9.87	55.63	17.62±5.92	33.58	6 959	996
<i>IEP^v, meses</i>						
BN	9.87	149.83	18.83±10.58	56.22	20 935	
SA	9.87	103.35	18.42±11.68	63.43	4 151	
SE	9.87	110.30	21.15±11.95	56.52	10 477	
<i>PD, kilogramos</i>						
BN	122.90	308.70	215.99±34.32	15.89	20 919	2 553
SA	107.80	302.16	203.91±31.60	15.50	5 297	629
SE	112.12	350.49	229.43±44.30	19.31	16 254	2 610

^zCoefficiente de variación ^yBrangus Negro, ^xSalers, ^wSuizo Europeo, ^vvalores para IEP antes de la segunda edición por cada rancho.

3.4.4 Análisis estadístico

La estimación de componentes de (co)varianza y parámetros genéticos se llevó a cabo usando el método de máxima verosimilitud restringida (REML), con ayuda del programa MTDFREML (Boldman *et al.*, 1995). Se realizaron análisis univariados para todas las características y bivariados de FR con las otras tres

características; para los análisis univariados los valores iniciales fueron tomados de la literatura y para los bivariados se tomaron de los resultados de los análisis univariados. Para los análisis univariados el criterio de convergencia fue 10^{-9} y para los bivariados fue 10^{-6} .

Modelo animal univariado para PD

$$PD = Xb + Za + Mm + Wpe + e$$

donde, PD es el vector de observaciones, b es el vector de efectos fijos (GC para PD y la edad de la madre al parto como covariable lineal y cuadrática), a es el vector de efectos genéticos aditivos (EGA) directos, m es el vector de EGA maternos, pe es el vector de efectos de ambiente permanente (EAP) materno y e es el vector de efectos residuales (ER); X , Z , M , y W son matrices de incidencia que relacionan las observaciones con los vectores correspondientes.

Modelo animal univariado para EPP

$$EPP = Xb + Za + e$$

donde, EPP es el vector de observaciones, b es el vector de efectos fijos (GC para EPP), a es el vector de EGA directos y e es el vector de ER; X y Z son matrices de incidencia que relacionan las observaciones con los vectores correspondientes.

Modelo animal univariado para IEP

$$IEP = Xb + Za + Wpe + e$$

donde, IEP es el vector de observaciones, b es el vector de efectos fijos (GC para IEP y la edad de la vaca al parto como covariable lineal y cuadrática), a es el vector de EGA directos, pe es el vector de EAP de la misma vaca y e es el vector de ER; X , Z , y W son matrices de incidencia que relacionan las observaciones con los vectores correspondientes.

Modelo animal univariado para FR

$$FR = Xb + Za + Ss + Wpe + e$$

donde, FR es el vector de observaciones, b es el vector de efectos fijos (GC para FR y la edad de la vaca al parto como covariable lineal y cuadrática), a es el vector de EGA directos, s es el vector de EGA del semental de apareamiento, pe es el vector de EAP de la misma vaca y e es el vector de ER; X , Z , S , y W son matrices de incidencia que relacionan las observaciones con los vectores correspondientes. La covarianza entre el EGA directo y el EGA del semental, fue definida como cero.

Modelo animal bivariado FR-(EPP, IEP o PD)

$$\begin{bmatrix} FR \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{FR} & 0 \\ 0 & X_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{FR} \\ b_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{FR} & 0 \\ 0 & Z_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{FR} \\ a_i \end{bmatrix} +$$
$$\begin{bmatrix} S_{FR} & 0 \\ 0 & M_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{FR} \\ m_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{FR} & 0 \\ 0 & W_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} pe_{FR} \\ pe_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{FR} \\ e_i \end{bmatrix}$$

donde, FR corresponde al vector de observaciones para FR; y_i corresponde al vector de observaciones para EPP, IEP o PD; $b_{FR}(b_i)$ es el vector de efectos fijos para FR (EPP, IEP o PD); $a_{FR}(a_i)$ es el vector de EGA de la vaca para FR (EPP, IEP o PD); s_{FR} es el vector de EGA del semental de apareamiento para FR; m_i es el vector de EGA maternos para PD; $pe_{FR}(pe_i)$ es el vector de EAP para FR (PD); $e_{FR}(e_i)$ es el vector de ER para FR (EPP, IEP o PD). $X_{FR}(X_i)$ es la matriz de incidencia que relaciona los elementos de $b_{FR}(b_i)$ con $FR(y_i)$; $Z_{FR}(Z_i)$ es la matriz de incidencia que relaciona los elementos de $a_{FR}(a_i)$ con $FR(y_i)$; $S_{FR}(M_i)$ es la matriz de incidencia que relaciona los elementos de $s_{FR}(m_i)$ con $FR(y_i)$ y $W_{FR}(W_i)$ es la matriz de incidencia que relaciona los elementos de $pe_{FR}(pe_i)$ con $FR(y_i)$.

Se supone que:

$$E(FR) = X_{FR}b_{FR} ; E(y_i) = X_i b_i \text{ y}$$

$$Var \begin{bmatrix} a_{FR} \\ a_i \\ s_{FR} \\ m_i \\ pe_{FR} \\ pe_i \\ e_{FR} \\ e_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \sigma_{aFR}^2 & A \sigma_{aFRai} & 0 & A \sigma_{aFRmi} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A \sigma_{aFRai} & A \sigma_{ai}^2 & 0 & A \sigma_{aimi} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A \sigma_{sFR}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A \sigma_{aFRmi} & A \sigma_{aimi} & 0 & A \sigma_{mi}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I \sigma_{peFR}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \sigma_{pei}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \sigma_{eFR}^2 & I \sigma_{eFREi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \sigma_{eFREi} & I \sigma_{ei}^2 \end{bmatrix}$$

Donde A es el numerador de la matriz de relaciones genéticas aditivas; I es la matriz de identidad; y los vectores a , s , pe y e no están correlacionados.

Para los análisis bivariados, las covarianzas entre el EGA del semental para FR y el EGA directo para EPP, IEP y PD, así como con el EGA materno para PD, se definieron como cero.

3.4.5 Predicción de la respuesta a la selección

Con el propósito de analizar las implicaciones que los estimadores de componentes de (co)varianza y parámetros genéticos pueden tener en la implementación de programas de mejoramiento genético para las razas estudiadas, se calculó la respuesta esperada en FR a través de selección directa, o indirecta a través de las otras tres características (PD, IEP o EPP), utilizando resultados de los análisis bivariados. Para la respuesta directa a la selección se utilizó la fórmula siguiente (Falconer y Mackay, 1996):

$$R_{FR} = \frac{h_{FR}^2 * i_{FR} * \sigma_{FR}}{L_{FR}}$$

donde, R_{FR} = respuesta directa a la selección en FR; h_{FR}^2 = heredabilidad para FR; i_{FR} = intensidad de selección en FR; σ_{FR} = desviación estándar fenotípica para FR y L_{FR} = intervalo generacional al seleccionar para FR.

Para el cálculo de las respuestas correlacionadas, la fórmula utilizada fue (Falconer y Mackay, 1996):

$$R_{FR|Ci} = \frac{r_{aFR,Ci} * h_{FR} * h_{Ci} * i_{Ci} * \sigma_{FR}}{L_{Ci}}$$

donde, $R_{FR|Ci}$ = respuesta indirecta a la selección en FR cuando se selecciona para la característica PD, IEP o EPP (Ci); h_{FR} = raíz cuadrada de la heredabilidad de FR; h_{Ci} = raíz cuadrada de la heredabilidad de Ci ; i_{Ci} = intensidad de selección en Ci ; σ_{FR} = desviación estándar fenotípica para FR y L_{Ci} = intervalo generacional al seleccionar para Ci .

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1 Análisis univariados

Peso al destete

En el Cuadro 15 se muestran los componentes de (co)varianza y parámetros genéticos estimados para PD. Las heredabilidades directas para PD obtenidas en este estudio fueron 0.15, 0.20 y 0.19 para las razas BN, SA y SE, respectivamente. Estos valores son menores que los promedios (0.25 y 0.27) reportados en revisiones de literatura sobre la estimación de heredabilidades para características de crecimiento en bovinos carne por Meyer *et al.* (1992) y Ríos (2008), respectivamente. Las diferencias en las estimaciones de heredabilidad directa pueden deberse a diferencias en la estructura genética, prácticas de manejo y efectos de selección entre las poblaciones (Domínguez-Viveros *et al.*, 2003).

Las heredabilidades maternas que oscilaron de 0.02 a 0.12 a través de las tres razas estudiadas, fueron también menores que los promedios (0.20 y 0.17) publicados por Meyer *et al.* (1992) y Ríos (2008). Las correlaciones genéticas entre los efectos directos y maternos fueron negativas para todas las razas en un rango de -0.34 a -0.79, y similares a la mayoría de las reportadas en la literatura (Meyer *et al.*, 1992; Domínguez-Viveros *et al.*, 2003; Ríos, 2008).

Gallegos-Ramírez *et al.*, (2011) estudiaron las poblaciones SA y SE del presente estudio y estimaron correlaciones genéticas entre los efectos directos y maternos similares [-0.71 (SA) y -0.44 (SE)] a las encontradas en la presente investigación; sin embargo, algunos autores (Wright *et al.*, 1987; Meyer *et al.*, 1992; Silveira *et al.*, 2004) han reportado estimaciones con signo positivo.

Cuadro 15. Componentes de (co)varianza^z (kg²) y parámetros genéticos^y (± error estándar) para peso al destete estimados utilizando un modelo animal univariado.

	Raza		
	Brangus Negro	Salers	Suizo Europeo
σ_a^2	82.201	74.914	102.537
$\sigma_{a,m}$	-35.761	-45.837	-12.151
σ_m^2	28.640	45.402	12.553
σ_{pe}^2	52.660	29.733	17.032
σ_e^2	413.609	275.732	414.242
σ_p^2	541.349	379.945	534.213
h_a^2	0.15±0.023	0.20±0.055	0.19±0.029
h_m^2	0.05±0.014	0.12±0.039	0.02±0.024
$r_{a,m}$	-0.70±0.078	-0.79±0.106	-0.34±0.229
c^2	0.10±0.010	0.08±0.020	0.03±0.020

^z σ_a^2 , σ_m^2 , σ_{pe}^2 , σ_e^2 y σ_p^2 = varianza del efecto genético aditivo directo, del efecto genético aditivo materno, del efecto de ambiente permanente materno, del efecto residual y fenotípica, respectivamente; $\sigma_{a,m}$ = covarianza entre los efectos genético aditivo directo y genético aditivo materno.

^y h_a^2 y h_m^2 = heredabilidad del efecto genético aditivo directo y del efecto genético aditivo materno; $r_{a,m}$ = correlación genética entre los efectos genético aditivo directo y genético aditivo materno, c^2 = proporción de la varianza fenotípica atribuida a la varianza de efecto de ambiente permanente materno.

Las estimaciones para la proporción de la varianza fenotípica atribuible al efecto de ambiente permanente materno variaron de 3 a 10%, y están dentro del rango de las estimaciones encontradas (2 a 67%) en la revisión de literatura hecha por Ríos (2008). Las estimaciones del presente estudio ponen en evidencia una vez más la contribución significativa que tiene el efecto de ambiente permanente materno en la variación fenotípica del PD de las crías, como lo señalaron Meyer *et al.* (1992) y Domínguez-Viveros *et al.* (2003). De hecho, los últimos autores

señalaron que el progreso genético en PD se puede restringir si no se considera este efecto en el modelo.

Intervalo entre partos

En el Cuadro 16 se muestran los componentes de (co)varianza y parámetros genéticos estimados para IEP y EPP. Las heredabilidades estimadas para IEP fueron 0.04 (BN y SE) y 0.15 (SA). En un estudio con bovinos Simmental, Meacham y Notter (1987) reportaron un valor que coincide con el encontrado en el presente estudio para BN y SE. Varios autores (Frazier *et al.*, 1999; Bertazzo *et al.*, 2004; Gressler *et al.*, 2005) estimaron heredabilidades más bajas (entre 0.01 y 0.03) para IEP que las obtenidas en el presente estudio. Estimaciones de mayor magnitud (0.32 y 0.42) fueron publicadas por Campello *et al.* (1999) y Silveira *et al.* (2004).

Cuadro 16. Componentes de (co)varianza^z y parámetros genéticos^y ($\pm$ error estándar) para intervalo entre partos^x y edad al primer parto^w estimados utilizando un modelo animal univariado para cada característica.

	Raza		
	Brangus Negro	Salers	Suizo Europeo
Intervalo entre partos			
σ_a^2	0.638	2.270	0.766
σ_{pe}^2	0.000	0.000	0.306
σ_e^2	16.481	12.805	18.992
σ_p^2	17.119	15.075	20.064
h_a^2	0.04 $\pm$ 0.009	0.15 $\pm$ 0.038	0.04 $\pm$ 0.027
c^2	0.00 $\pm$ 0.006	0.00 $\pm$ 0.034	0.01 $\pm$ 0.031
Edad al primer parto			
σ_a^2	0.007	0.002	0.011
σ_e^2	0.155	0.226	0.151
σ_p^2	0.162	0.228	0.163
h_a^2	0.04 $\pm$ 0.024	0.01 $\pm$ 0.043	0.07 $\pm$ 0.091

^z σ_a^2 , σ_{pe}^2 , σ_e^2 y σ_p^2 = varianza del efecto genético aditivo directo, del efecto de ambiente permanente de la vaca, del efecto residual y fenotípica, respectivamente.

^y h_a^2 = heredabilidad del efecto genético aditivo directo, c^2 = proporción de la varianza fenotípica atribuida a la varianza del efecto de ambiente permanente.

^xVarianza en meses², ^wvarianza en años².

La proporción de la varianza fenotípica atribuible al efecto de ambiente permanente para IEP fue mayor que cero (1%) sólo para la raza SE. Silveira *et al.* (2004) y Oliveira (2007) reportaron valores más grandes (2 y 3.5%, respectivamente) para este parámetro en bovinos Nelore.

Fertilidad real

En el Cuadro 17 se muestran los componentes de (co)varianza y parámetros genéticos estimados para FR. Las estimaciones de heredabilidad directa para FR fueron bajas y oscilaron de 0.01 a 0.03. Nájera (1990) reportó una heredabilidad de 0.01 para bovinos Nelore, que coincide con la obtenido en el presente estudio para las razas BN y SE. Algunos autores han estimado heredabilidades de mayor magnitud. Barbosa (1991) al estudiar bovinos Canchim, publicó una heredabilidad de 0.10; de modo similar, Mercadante *et al.* (1999), Campello *et al.* (1999), Silveira *et al.* (2004) y Oliveira (2007) al estudiar bovinos Nelore reportaron heredabilidades de 0.13, 0.49, 0.06 y 0.16, respectivamente.

Cuadro 17. Componentes de (co)varianza^z [(kg vaca⁻¹ año⁻¹)²] y parámetros genéticos^y (± error estándar) para fertilidad real estimados utilizando un modelo animal univariado.

	Raza		
	Brangus Negro	Salers	Suizo Europeo
σ_a^2	17.136	39.077	11.951
σ_s^2	22.105	80.511	126.789
σ_{pe}^2	57.785	70.293	0.027
σ_e^2	1554.324	1317.277	1585.809
σ_p^2	1651.350	1507.159	1724.576
h_a^2	0.01±0.011	0.03±0.022	0.01±0.047
c^2	0.03±0.020	0.05±0.026	0.00±0.025

^z σ_a^2 , σ_s^2 , σ_{pe}^2 , σ_e^2 y σ_p^2 = varianza del efecto genético aditivo directo, del efecto genético aditivo del semental, del efecto de ambiente permanente de la vaca, del efecto residual y fenotípica, respectivamente.

^y h_a^2 = heredabilidad del efecto genético aditivo directo, c^2 = proporción de la varianza fenotípica atribuida a la varianza de efecto de ambiente permanente de la vaca.

Las estimaciones para la proporción de la varianza fenotípica atribuible al efecto de ambiente permanente de la vaca fueron 3 y 5% para los animales BN y SA, mientras que para los animales SE fue cero. Este último estimador coincide con el reportado por Oliveira (2007). Silveira *et al.* (2004) publicaron un valor mayor (35%) para este parámetro.

El efecto del semental de apareamiento en el modelo para FR fue incluido como un segundo efecto aleatorio con el propósito de remover la influencia que tiene el padre de la cría en la FR de la vaca; la proporción de la varianza fenotípica atribuible a este efecto fue 1.3, 5.4 y 7.35% para las razas BN, SA y SE, respectivamente. Lo anterior sugiere que cuando este efecto no es incluido en el modelo para FR puede haber una sobreestimación de la heredabilidad directa. En la literatura no se encontraron investigaciones que incluyeran este efecto para el modelo de FR.

Edad al primer parto

Las heredabilidades estimadas para EPP (Cuadro 16) fueron 0.04 (BN), 0.01 (SA) y 0.07 (SE). Smith *et al.* (1989) estimaron una heredabilidad para EPP en bovinos Hereford de 0.01, la cual coincide con la estimada en el presente estudio para animales SA. El valor de la heredabilidad en animales SE coincide con el publicado por Bourdon y Brinks (1982) y Grossi *et al.* (2008) en bovinos Hereford y Nelore. Algunos autores han estimado valores de mayor magnitud (entre 0.14 y 0.37) que los obtenidos el presente estudio (Gutiérrez *et al.*, 2002; Bertazzo *et al.*, 2004; Boligon *et al.*, 2008).

3.5.2 Análisis bivariados

Fertilidad real y peso al destete

Los modelos multivariados proporcionan soluciones simultáneas para dos o más características, y son utilizados para ajustar por el efecto de las prácticas de selección y del reporte incompleto de datos, por lo que pueden incrementar la precisión en la estimación de valores genéticos (BIF, 2010). En algunas

investigaciones evaluando distintas características de crecimiento y reproducción, existen evidencias de que el uso de análisis bivariados mejoran la predicción de los parámetros genéticos en comparación con los análisis univariados (Eler *et al.*, 1995; Ramirez-Valverde *et al.*, 2001).

En el Cuadro 18 se muestran los componentes de (co)varianza y parámetros genéticos estimados con el modelo bivariado FR-PD. Las estimaciones de las heredabilidades directas para FR y PD se incrementaron en comparación a las obtenidas en los análisis univariados, pasando de 0.01 a 0.12, 0.03 a 0.12, y 0.01 a 0.12 para FR, en las razas BN, SA y SE, respectivamente, y de 0.15 a 0.18, 0.20 a 0.23, y 0.19 a 0.21 para PD en las razas BN, SA y SE, respectivamente. El incremento en magnitud de los estimadores de heredabilidades cuando se realizan análisis bivariados puede atribuirse a mejoras en la estructura de datos, al considerar las asociaciones genéticas y residuales entre las variables (Thompson y Meyer, 1986).

Las correlaciones entre los efectos genéticos aditivos directos y maternos para PD fueron menores que las estimaciones con los análisis univariados para las razas BN (-0.70 vs -0.54) y SA (-0.79 vs -0.56), lo que concuerda con lo reportado por Eler *et al.* (1995). Sin embargo, difiere de lo encontrado en el presente estudio para la raza SE, en la cual la correlación entre los efectos genéticos aditivos directos y maternos fue mayor para los análisis bivariados (-0.34 vs -0.55).

Las correlaciones genéticas estimadas entre FR y PD fueron favorables y con estimadores de 0.15 (SE) y 0.17 (BN y SA), y menores que las reportadas por McManus *et al.* (2002) y Oliveira (2007) para bovinos Nelore (0.19 y 0.64, respectivamente). Las correlaciones del presente estudio y las estimadas por los autores citados sugieren que es posible el mejoramiento genético simultáneo en PD y FR.

Cuadro 18. Componentes de (co)varianza^z y parámetros genéticos^y ($\pm$ error estándar) para fertilidad real (FR) y peso al destete (PD) estimados utilizando un modelo animal bivariado (FR-PD).

	Raza		
	Brangus Negro	Salers	Suizo Europeo
σ_{aFR}^2	187.864	183.126	197.441
$\sigma_{aFR,aPD}$	22.470	21.159	21.666
$\sigma_{aFR,mPD}$	85.502	84.202	84.403
σ_{aPD}^2	97.306	88.571	112.598
$\sigma_{aPD,mPD}$	-44.406	-45.726	-46.478
σ_{sFR}^2	24.309	68.190	0.002
σ_{mPD}^2	70.459	74.421	64.269
σ_{peFR}^2	0.000	0.000	0.000
σ_{pePD}^2	22.497	3.000	0.003
σ_{eFR}^2	1462.114	1272.690	1516.747
$\sigma_{eFR,ePD}$	-770.672	-441.106	18.610
σ_{ePD}^2	406.664	270.022	405.344
σ_{pFR}^2	1647.287	1524.007	1714.190
$\sigma_{pFR,pPD}$	-705.452	-377.849	82.477
σ_{pPD}^2	552.520	390.288	535.736
h_{aFR}^2	0.11 $\pm$ 0.010	0.12 $\pm$ 0.020	0.12 $\pm$ 0.017
h_{aPD}^2	0.18 $\pm$ 0.017	0.23 $\pm$ 0.021	0.21 $\pm$ 0.021
h_{mPD}^2	0.13 $\pm$ 0.011	0.19 $\pm$ 0.016	0.12 $\pm$ 0.024
$r_{aFR,aPD}$	0.17 $\pm$ 0.012	0.17 $\pm$ 0.022	0.15 $\pm$ 0.012
$r_{aPD,mPD}$	-0.54 $\pm$ 0.015	-0.56 $\pm$ 0.014	-0.55 $\pm$ 0.013
c_{FR}^2	0.00 $\pm$ 0.014	0.00 $\pm$ 0.013	0.00 $\pm$ 0.024
c_{PD}^2	0.04 $\pm$ 0.023	0.01 $\pm$ 0.033	0.00 $\pm$ 0.028

^z σ_a^2 , σ_s^2 , σ_m^2 , σ_{pe}^2 , σ_e^2 , y σ_p^2 = varianza del efecto genético aditivo directo, del efecto genético aditivo del semental, del efecto genético aditivo materno, del efecto de ambiente permanente, del efecto residual y fenotípica, respectivamente; $\sigma_{a,a}$ = covarianza entre efectos genéticos aditivos directos; $\sigma_{a,m}$ = covarianza entre los efectos genético aditivo directo y genético aditivo materno, $\sigma_{p,p}$ = covarianza fenotípica.

^y h_a^2 y h_m^2 = heredabilidad del efecto genético aditivo directo y del efecto genético aditivo materno; $r_{a,a}$ y $r_{a,m}$ = correlación entre efectos genéticos aditivos directos y entre los efectos genético aditivo directo y genético aditivo materno, c^2 = proporción de la varianza fenotípica atribuida a la varianza de efecto de ambiente permanente.

Fertilidad real e intervalo entre partos

En el Cuadro 19 se muestran los componentes de (co)varianza y parámetros genéticos estimados con el modelo bivariado FR-IEP. En comparación con las estimaciones obtenidas con los análisis univariados, las estimaciones de las heredabilidades directas para FR se incrementaron de 0.01 a 0.04 (BN), 0.03 a 0.12 (SA), y 0.01 a 0.04 (SE), mientras que para IEP sólo la estimación para animales SA mostró diferencias, se observó una reducción de 0.15 a 0.12.

Cuadro 19. Componentes de (co)varianza^z y parámetros genéticos^y ($\pm$ error estándar) para fertilidad real (FR) e intervalo entre partos (IEP) estimados utilizando un modelo animal bivariado (FR-IEP).

	Raza		
	Brangus Negro	Salers	Suizo Europeo
σ_{aFR}^2	89.354	251.642	72.697
$\sigma_{aFR,aIEP}$	-6.763	-20.730	-7.379
σ_{aIEP}^2	0.719	1.957	0.933
σ_{sFR}^2	8.187	12.751	64.285
σ_{peFR}^2	116.921	18.537	0.000
$\sigma_{peFR,peIEP}$	-2.859	0.601	0.000
σ_{peIEP}^2	0.158	0.019	0.116
σ_{eFR}^2	1935.118	1867.826	1817.668
$\sigma_{eFR,eIEP}$	-156.871	-146.584	-158.929
σ_{eIEP}^2	16.669	14.412	19.779
σ_{pFR}^2	2149.580	2150.757	1954.650
$\sigma_{pFR,pIEP}$	-166.493	-166.714	-166.309
σ_{pIEP}^2	17.546	16.389	20.828
h_{aFR}^2	0.04 $\pm$ 0.013	0.12 $\pm$ 0.034	0.04 $\pm$ 0.033
h_{aIEP}^2	0.04 $\pm$ 0.010	0.12 $\pm$ 0.033	0.04 $\pm$ 0.027
$r_{aFR,aIEP}$	-0.84 $\pm$ 0.073	-0.93 $\pm$ 0.036	-0.90 $\pm$ 0.244
c_{FR}^2	0.05 $\pm$ 0.015	0.01 $\pm$ 0.031	0.00 $\pm$ 0.038
c_{IEP}^2	0.01 $\pm$ 0.012	0.00 $\pm$ 0.031	0.01 $\pm$ 0.030

^z σ_a^2 , σ_s^2 , σ_{pe}^2 , σ_e^2 , y σ_p^2 = varianza del efecto genético aditivo directo, del efecto genético aditivo del semental, del efecto de ambiente permanente, del efecto residual y fenotípica, respectivamente; $\sigma_{a,a}$ = covarianza entre efectos genéticos aditivos directos; $\sigma_{pe,pe}$ = covarianza entre efectos de ambiente permanente, $\sigma_{p,p}$ = covarianza fenotípica.

^y h_a^2 = heredabilidad del efecto genético aditivo directo; $r_{a,a}$ = correlación entre efectos genéticos aditivos directos, c^2 = proporción de la varianza fenotípica atribuida a la varianza de efecto de ambiente permanente.

Las correlaciones genéticas estimadas entre IEP y FR fueron favorables (-0.84, -0.93 y -0.90 en las razas BN, SA y SE, respectivamente). Las correlaciones genéticas obtenidas en el presente estudio fueron similares (-0.82 y -0.90) a las reportadas para bovinos Nelore por McManus *et al.* (2002) y Silveira *et al.* (2004), y fueron diferentes (0.33) en signo y magnitud a la publicada por Oliveira (2007).

Fertilidad real y edad al primer parto

En el Cuadro 20 se muestran los componentes de (co)varianza y parámetros genéticos estimados con el modelo bivariado FR-EPP. Contrario a lo obtenido en los análisis anteriores, al comparar el análisis bivariado con respecto a los univariados, la estimación de heredabilidad directa para FR no mostró incremento en las razas estudiadas, e incluso disminuyó de 0.03 a 0.02 para SA. Para EPP, las estimaciones de heredabilidad se incrementaron en BN (de 0.04 a 0.05) y SE (de 0.07 a 0.10) al utilizar el análisis bivariado, y no cambiaron para SA. Probablemente estos resultados se deban a la poca información obtenida para la característica EPP en las tres razas del presente estudio.

Las correlaciones genéticas estimadas entre FR y EPP fueron -1.00 (BN) -0.76 (SA) y -1.00 (SE), y fueron similares a la reportada (-0.89) por Silveira *et al.* (2004), lo que indica una asociación favorable entre estas características. Cabe mencionar que las correlaciones entre FR y EPP estimadas en el presente estudio para las razas BN y SE deben ser interpretadas con cautela, debido a que presentaron un error estándar grande y alcanzaron el valor máximo, por lo que antes de ser utilizadas en programas de mejoramiento genético, es deseable que para mejorar la precisión estas correlaciones sean estimadas en investigaciones futuras considerando un mayor número de observaciones.

Cuadro 20. Componentes de (co)varianza^z y parámetros genéticos^y ($\pm$ error estándar) para fertilidad real (FR) y edad al primer parto (EPP) estimados utilizando un modelo animal bivariado (FR-EPP).

	Raza		
	Brangus Negro	Salers	Suizo Europeo
σ_{aFR}^2	23.670	36.876	22.506
$\sigma_{aFR,aEPP}$	-0.432	-0.224	-0.591
σ_{aEPP}^2	0.008	0.002	0.015
σ_{sFR}^2	21.908	80.738	128.588
σ_{peFR}^2	53.772	71.113	0.009
σ_{eFR}^2	1551.478	1317.288	1575.937
$\sigma_{eFR,eEPP}$	-0.001	-0.002	-2.291
σ_{eEPP}^2	0.154	0.226	0.147
σ_{pFR}^2	1650.828	1506.015	1727.040
$\sigma_{pFR,pEPP}$	-0.434	-0.227	-2.881
σ_{pEPP}^2	0.162	0.228	0.163
h_{aFR}^2	0.01 $\pm$ 0.012	0.02 $\pm$ 0.021	0.01 $\pm$ 0.048
h_{aEPP}^2	0.05 $\pm$ 0.025	0.01 $\pm$ 0.007	0.10 $\pm$ 0.092
$r_{aFR,aEPP}$	-1.00 $\pm$ 0.561	-0.76 $\pm$ 0.463	-1.00 $\pm$ 1.967
c_{FR}^2	0.03 $\pm$ 0.020	0.05 $\pm$ 0.026	0.000 $\pm$ 0.056

^z σ_a^2 , σ_s^2 , σ_{pe}^2 , σ_e^2 , y σ_p^2 = varianza del efecto genético aditivo directo, del efecto genético aditivo del semental, del efecto de ambiente permanente, del efecto residual y fenotípica, respectivamente; $\sigma_{a,a}$ = covarianza entre efectos genéticos aditivos directos, $\sigma_{p,p}$ = covarianza fenotípica.

^y h_a^2 = heredabilidad del efecto genético aditivo directo; $r_{a,a}$ = correlación entre efectos genéticos aditivos directos, c^2 = proporción de la varianza fenotípica atribuida a la varianza de efecto de ambiente permanente.

3.5.3 Predicción de la respuesta a la selección

En el Cuadro 21 se muestran los resultados esperados en FR al aplicar selección directa o indirecta a través de las otras características (PD, IEP o EPP). Para obtener las respuestas esperadas a la selección, se consideraron los supuestos siguientes: 10% de los machos y 50% de las hembras fueron seleccionados como reproductores para mejorar PD; la selección para FR, IEP

y EPP sólo consideró a las hembras (proporción seleccionada de 80%); el intervalo generacional fue 5 años para machos y variable para hembras (8 para FR, 6 para PD, 7.5 para IEP y 6.5 años para EPP). Los componentes de varianza y parámetros genéticos fueron tomados de los análisis bivariados correspondientes.

Para todas las razas, la selección para PD resultó en un progreso genético en FR de mayor magnitud que cuando se utiliza la selección directa para FR (0.23 vs 0.12, 0.26 vs 0.13, y 0.23 vs 0.13 kg vaca⁻¹ año⁻¹, para BN, SA, y SE, respectivamente). Las respuestas correlacionadas en FR cuando se selecciona para IEP o EPP, a excepción de la raza SA cuando se selecciona para IEP, fueron de magnitud baja. Los resultados para respuesta indirecta en FR al seleccionar para PD, posiblemente se deban a que PD tiene una heredabilidad mayor que IEP y EPP, se mide en ambos sexos, y el intervalo generacional es más pequeño en comparación con el de las otras características, y la correlación entre FR y PD, aunque de baja magnitud, es favorable.

Con base en lo anterior, y con el objetivo de tener vacas con mayor precocidad y más productivas en términos de FR, es recomendable implementar un programa de mejora genética en el que se practique selección para PD, y en una segunda etapa aplicar selección para EPP. Algunos autores señalan que las correlaciones genéticas entre PD y EPP son favorables. Bourdon y Brinks (1982), Gressler *et al.* (2005) y Boligon *et al.* (2008) estimaron correlaciones de -0.22, -0.16 y -0.20, respectivamente. Potencialmente, un beneficio adicional es que se han estimado correlaciones favorables entre PD e IEP. McManus *et al.* (2002) y Rasali *et al.* (2005) publicaron correlaciones entre estas características de -0.05 y -0.38, respectivamente, lo que sugiere que las vaquillas más pesadas al destete tendrán su primer parto a edades tempranas y posiblemente la habilidad de parir con regularidad. Sin embargo, las estimaciones de correlaciones genéticas entre EPP e IEP fueron variables, de -0.69 a -0.93 (Frazier *et al.*, 1999; Gressler *et al.*, 2005) y de 0.23 a 0.54 (Gutiérrez *et al.*, 2002; Oliveira, 2007).

Cuadro 21. Respuesta esperada en fertilidad real (FR) al practicar selección directa o indirecta a través de las características peso al destete (PD), intervalo entre partos (IEP) o edad al primer parto (EPP) con base en los resultados de análisis bivariados (FR y PD; FR e IEP; FR y EPP).

	Característica seleccionada					
	FR	PD	FR	IEP	FR	EPP
<i>Brangus Negro</i>						
Intensidad en machos	0.00	1.76	0.00	0.00	0.00	0.00
Intensidad en hembras	0.35	0.80	0.35	0.35	0.35	0.35
Intensidad promedio	0.17	1.28	0.17	0.17	0.17	0.17
Heredabilidad	0.11	0.18	0.04	0.04	0.01	0.05
Correlación genética		0.17		-0.84		-1.00
Covarianza	1647.28	552.52	2149.58	17.54	1650.83	0.16
IG ² hembras	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
IG machos	8.00	6.00	8.00	7.50	8.00	6.50
IG promedio	6.50	5.50	6.50	6.25	6.50	5.75
Respuesta, kg vaca ⁻¹ año ⁻¹	0.12	0.23	0.05	0.04	0.01	0.03
<i>Salers</i>						
Intensidad en machos	0.00	1.76	0.00	0.00	0.00	0.00
Intensidad en hembras	0.35	0.80	0.35	0.35	0.35	0.35
Intensidad promedio	0.17	1.28	0.17	0.17	0.17	0.17
Heredabilidad	0.12	0.23	0.12	0.12	0.02	0.01
Correlación genética		0.17		-0.93		-0.76
Covarianza	1524.01	390.29	2150.76	16.39	1506.01	0.28
IG hembras	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
IG machos	8.00	6.00	8.00	7.50	8.00	6.50
IG promedio	6.50	5.50	6.50	6.25	6.50	5.75
Respuesta, kg vaca ⁻¹ año ⁻¹	0.13	0.26	0.15	0.14	0.02	0.01
<i>Suizo Europeo</i>						
Intensidad en machos	0.00	1.76	0.00	0.00	0.00	0.00
Intensidad en hembras	0.35	0.80	0.35	0.35	0.35	0.35
Intensidad promedio	0.17	1.28	0.17	0.17	0.17	0.17
Heredabilidad	0.12	0.21	0.04	0.04	0.01	0.10
Correlación genética		0.15		-0.90		-1.00
Covarianza	1714.19	535.74	1954.65	20.83	1727.04	0.16
IG hembras	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
IG machos	8.00	6.00	8.00	7.50	8.00	6.50
IG promedio	6.50	5.50	6.50	6.25	6.50	5.75
Respuesta, kg vaca ⁻¹ año ⁻¹	0.13	0.23	0.05	0.04	0.01	0.04

²Intervalo generacional

3.6 CONCLUSIONES

En general, el uso de análisis bivariados mejoró la magnitud y precisión de las heredabilidades para las características estudiadas en las razas del presente estudio. Las correlaciones genéticas de fertilidad real con peso al destete, intervalo entre partos o edad al primer parto fueron favorables. El mejoramiento genético de la productividad de las vacas, expresada como fertilidad real, se puede lograr con mayor eficiencia mediante la selección directa para peso al destete. Una segunda oportunidad de selección para edad al primer parto resultará en incrementos en fertilidad real de las vacas.

3.7 LITERATURA CITADA

- Azevêdo, M. R., D. M., R. Filho M., R. N. Lôbo B., R. Lôbo B., A. A. A. Moura N., E. C. Filho P., e C. H. Malhado M. 2005. Produtividade acumulada (PAC) das matrizes em rebanhos Nelore do norte e nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Zootecnia* 34: 54-59.
- Barbosa, P., F. 1991. Análise genético-quantitativa de características de crescimento e reprodutivas em fêmeas da raça Canchim. Tese de doutorado em genética. Universidade de São Paulo. 96 p.
- Bertazzo P., R., R. T. Fonseca F., T. Gonçalves M., I. Pereira G, J. Eler P., J. B. Ferraz S., A. I. Oliveira G., e I. Andrade F. 2004. Parâmetros de longevidade e produtividade de fêmeas de raça Nelore. *Revista Brasileira de Zootecnia* 33: 1118-1127.
- BIF. 2010. Guidelines for uniform beef improvement programs. 9th edition. Beef Improvement Federation, North Carolina State University, Raleigh. 182 p.
- Boldman, K. G., L. A. Kriese, L. D. Van Vleck, C. P. Van Tassell, and S. D. Kachman. 1995. A manual for use of MTDFREML. A set of programs to obtain estimates of variances and covariances [DRAFT]. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Clay Center. Lincoln, NE. 131 p.
- Boligon, A., A., L. Albuquerque G., e P. R. Rorato N. 2008. Associações genéticas entre pesos e características reprodutivas em rebanhos da raça Nelore. *Revista Brasileira de Zootecnia* 37: 56-601.
- Bourdon, R. M., and J. S. Brinks. 1982. Genetic, environmental and phenotypic relationships among gestation length, birth weight, growth traits and age at first calving in beef cattle. *Journal of Animal Science* 55: 543-553.

- Campello C., C., R. Filho M., e R. N. Lôbo B. 1999. Intervalo de partos e fertilidade real em vacas Nelore no estado do Maranhão. *Revista Brasileira de Zootecnia* 28: 474-479.
- Domínguez-Viveros, J., R. Núñez D., R. Ramírez V., y A. Ruíz F. 2003. Evaluación genética de variables de crecimiento en bovinos Tropicarne: I. Selección de modelos. *Agrociencia* 37: 323-335.
- Eler, J. D., L. D. Van Vleck, J. B. S. Ferraz, and R. B. Lôbo. 1995. Estimation of variance components due to direct and maternal effects for growth traits of Nelore cattle. *Journal of Animal Science* 73: 3253-3258.
- Falconer, D. S., and T. F. Mackay. 1996. Introducción a la genética cuantitativa. 4ª edición. Ed. ACRIBIA. Zaragoza, España. 469 p.
- Forni, S., and L. G. Albuquerque. 2005. Estimates of genetic correlations between days to calving and reproductive and weight traits in Nelore cattle. *Journal of Animal Science* 83: 1511-1515.
- Frazier, E. L., L. R. Sprott, J. O. Sanders, P. F. Dahm, J. R. Crouch, and J. W. Turner. 1999. Sire marbling score expected progeny difference and weaning weight maternal expected progeny difference associations with age at first calving and calving interval in Angus beef cattle. *Journal of Animal Science* 77: 1322-1328.
- Gallegos-Ramírez, R., R. Ramírez-Valverde, R. Núñez-Domínguez. A. Ruíz-Flores, y A. Rodríguez-Almeida. 2011. Interacción semental x ambiente en la estimación de la correlación genética entre efectos directos y maternos en bovinos para carne. *Agrociencia* 45: 687-697.
- Garrick, D. J. 2006. Development of genetic evaluations and decisions support to improve feed efficiency. In: 38th Annual Research Symposium and Annual Meeting, Choctaw, Mississippi. pp: 32-40.
- Gressler, M., M. G., J. C. Pereira C., J. A. Bergmann G., V. Andrade J., M. Paulino F., e S. Gressler L. 2005. Aspectos genéticos do peso à desmama e de algumas características reprodutivas de fêmeas Nelore. *Arquivos Brasileiros de Medicina Veterinária e Zootecnia* 57: 533-538.
- Grossi, D. A., O. G. Frizzas, C. C. P. Paz, L. A. F. Bezerra, R. B. Lôbo, J. A. Oliveira, and D. P. Munari. 2008. Genetic associations between accumulated productivity, and reproductive and growth in Nelore cattle. *Livestock Science* 117: 139-146.
- Gutiérrez, J. P., I. Alvarez, I. Fernández, L. J. Royo, J. Díez, and F. Goyache. 2002. Genetic relationships between calving date, calving interval, age at first calving and type traits in beef cattle. *Livestock Production Science* 78: 215-222.
- Lôbo B., R. 1996. Programa de melhoramento genético da raça Nelore. 3a. ed. Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo. Brasil. 88 p.

- McManus, C., M. G. Saueressig, R. Falcão A., G. Serrano, K. R. Marcelino A., e G. R. Paludo. 2002. Componentes reprodutivos e produtivos no rebanho de corte da Embrapa cerrados. *Revista Brasileira de Zootecnia* 31: 648-657.
- Meacham, N. S., and D. R. Notter. 1987. Heritability estimates for calving date in Simmental cattle. *Journal of Animal Science* 64: 701–705.
- Mercadante, Z., M. E., R. Lôbo B., e H. Oliveira N. 2000. Estimativas de (co)variâncias entre características de reprodução e de crescimento em fêmeas de um rebanho Nelore. *Revista Brasileira de Zootecnia* 29: 997-1004.
- Mercadante, Z., M. E., R. Lôbo B., L. R. Borjas A. D., A. F. Bezerra L., e H. Oliveira N. 1999. Estudo genético – quantitativo de características de reprodução e produção em fêmeas da raça Nelore. *In: XXXV Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia*. Brasil. p 237.
- Meyer, K. 1992. Variance components due to direct and maternal effects for growth traits of Australian beef cattle. *Livestock Production Science* 61: 495-522.
- Nájera, A., J. M. Efeitos genéticos e não genéticos sobre características reprodutivas e ponderais de duas populações de bovino da raça Nelore. Dissertação de mestrado em melhoramento animal. Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil. 150 p.
- Núñez-Domínguez, R., L. V. Cundiff, G. E. Dickerson, K E. Gregory, and R. M. Koch. 1991. Lifetime production of beef heifers calving first at two versus three years of age. *Journal of Animal Science* 69: 3467-3479.
- Oliveira, D., L. 2007. Estudo da influência de fatores genéticos e ambientais sobre as características produtivas e reprodutivas em um rebanho de bovinos Nelore no estado de Goiás. Dissertação de mestrado em ciências agrárias. Universidade de Brasília. Brasil. 56 p.
- Oliveira, D., L. 2007. Estudo da influência de fatores genéticos e ambientais sobre as características produtivas e reprodutivas em um rebanho de bovinos Nelore no estado de Goiás. Dissertação de mestrado em ciências agrárias. Universidade de Brasília. Brasil. 56 p.
- Ramirez-Valverde, R., I. Misztal, and J. K. Bertrand. 2001. Comparison of threshold vs linear and animal vs sire models for predicting direct and maternal genetic effects on calving difficulty in beef cattle. *Journal of Animal Science* 79: 333- 338.
- Rasali, D. P., G. H. Crow, J. N. B. Shrestha, A. D. Kennedy, and A. Brûlé-Babel. 2005. Multiple trait estimates of genetic parameters for juvenile growth and calving traits in Canadian Angus cattle. *Canadian Journal of Animal Science* 85: 309-316.

- Ríos U., A. 2008. Estimadores de parámetros genéticos para características de crecimiento predestete de bovinos. Revisión. Técnica Pecuaria en México 46: 37-67.
- Roso, V. M., and F. S. Schenkel. 2006. AMC-A computer program to assess the degree of connectedness among contemporary group. *In*: Proceedings of the 8th World Congress on Genetic Applied to Livestock Production. Belo Horizonte, Brazil, August 13-18 Poster 27-26.s
- Santana, M. L., J. P. Eler, A. B. Bignardi, and J. B. S. Ferraz. 2013. Genetic associations among average annual productivity, growth traits and stayability: A parallel between Nelore and composite beef cattle. Journal of Animal Science 91: 2566-2574.
- SAS. 2009. SAS/STAT Software Release 9.2. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA.
- Silveira C., J., C. McManus, A. Mascioli dos S., L. O. da Silva C., A. da Silveira C., J. A. Garcia S., e H. Louvandini. 2004. Fatores ambientais e parâmetros genéticos para características produtivas e reprodutivas em um rebanho Nelore no estado do Mato Grosso do Sul. Revista Brasileira de Zootecnia 33: 1432-1444.
- Smith, B. A., J. S. Brinks, and G. V. Richardson. 1989. Estimation of genetic parameters among reproductive and growth traits in yearling heifers. Journal of Animal Science 67: 2881-2885.
- Thompson, R., and K. Meyer. 1986. A review of theoretical aspects in the estimation of breeding values for multi-trait selection. Livestock Production Science 15: 299-313.
- Wright, H. B., E. J. Pollak, and R. L. Quaas. 1987. Estimation of variance and covariance components to determine heritabilities and repeatability of weaning weight in American Simmental cattle. Journal of Animal Science 65: 975-981.