

ENTENDER Y EVALUAR LA FISIOLÓGIA TESTICULAR DEL BOVINO

UNDERSTANDING AND EVALUATING BOVINE TESTES

Jhon P Kastelic Theriogenology 2014

RESUMEN

El objetivo es revisar brevemente la fisiología del testículo del bovino y entender los métodos de evaluación. La circunferencia escrotal (CE) es el método más común para evaluar el tamaño testicular, varía entre individuos y razas, además de ser altamente heredable. En general, una CE grande se asocia con pubertad temprana, mayor producción espermática, alto porcentaje de espermatozoides normales, buen rendimiento de la progenie femenina, además de buenos índices de preñez. En consecuencia un reproductor con potencial reproductivo aceptable requiere un mínimo de CE escrotal. Antes de alcanzar la pubertad (10 a 20 semanas de edad) el macho bovino presenta un aumento temprano de LH, este evento hormonal está relacionado de manera crítica con el comienzo de la pubertad y el desarrollo testicular. A partir de la 8 semana a la 30 los machos alimentados con 130% de los requerimientos energéticos y proteicos, incrementaron la secreción de LH durante la etapa de crecimiento temprano, también alcanzaron la pubertad un mes antes y aumentaron conjuntamente el tamaño testicular así como la producción espermática en un 20 a 30% aproximadamente. Sin embargo después del destete (más allá de los 200 días) las dietas con energía alta, reducen tanto la producción espermática como la calidad seminal. Debido a que los aumentos de la temperatura corporal afectan la calidad seminal, los testículos y el escroto del toro, tienen gradientes de temperatura complementarios que permiten mantener la temperatura testicular alrededor de 2° a 6° C por debajo de la temperatura central. Dadas sus características, en las evaluaciones del potencial reproductivo, la termografía infrarroja se revela como un método rápido y no invasivo para evaluar la temperatura de la superficie escrotal. Por otra parte, el uso clínico primario de la ultrasonografía en la evaluación reproductiva del toro, es la caracterización de lesiones a nivel testicular y del escroto. En conclusión, el tamaño y la función testicular son factores críticos en la fertilidad del toro, por otra parte es importante señalar que estos factores se pueden evaluar fácilmente a través de métodos clínicos y pueden estar influenciados por la nutrición que reciba el toro reproductor.

Introducción

Independientemente del uso del semen de los toros (servicio natural o inseminación artificial IA), estos deben producir un gran número de espermatozoides fértiles con morfología normal. En ese sentido, destaca la importancia de comprender la anatomía y fisiología testicular, así como el dominio de los métodos técnicos de evaluación. El propósito de este artículo es revisar los factores que controlan el desarrollo de las gónadas, el inicio de la pubertad, la importancia del tamaño testicular en el potencial reproductivo y los mecanismos de termorregulación testicular. Además también se abordan técnicas de evaluación para la temperatura e integridad del testículo.

Medida de tamaño testicular

En 1979 Coulter y colaboradores publicaron un artículo (Theriogenology 1979; 11: 297–311) de revisión sobre la medición de los testículos en el toro, a la fecha dicho trabajo sigue teniendo validez. En esa revisión, se postula que el peso testicular permite estimar, de forma segura el potencial de producción de espermatozoides. Debido a que en el toro reproductor, no se puede obtener el peso testicular de manera directa y no invasiva, se han desarrollado medidas de carácter indirecto tales como: la longitud y diámetro, el ancho del par de testículos y la CE.

Las medidas lineales se hacen con un calibrador, mientras que para tomar la medida de CE se puede usar una de las diferentes cintas que ofrece el mercado. Aunque se ha sugerido que la medición mediante el calibrador permite determinar de manera más exacta el tamaño testicular, en condiciones de campo el método más usado por su confiabilidad sigue siendo la CE. En ese sentido, la CE está considerada como una variable que puede ser usada para predecir el peso de ambos testículos (las correlaciones van de 0.85-0.95 en toros lecheros mientras que en machos con aptitud cárnica son de 0.95. Por otra parte en cuanto a la capacidad de producción espermática en toros lecheros la correlación esta alrededor de 0.81. Sin embargo hay evidencia que la forma de los testículos también influencia la producción de espermatozoides.

En un estudio (Bailey. Theriogenology 1996; 46:881–7.) realizado en 27 toros Holstein categorizados según la forma testicular, se encontró que los toros con testículos largos y delgados presentaron menor CE pero mayor concentración espermática, mientras que en los toros con testículos de longitud más corta y de forma esferoidal, aunque la CE fue mayor la capacidad de producción de espermatozoides se vio disminuida, lo anterior es una observación interesante en la que se debería profundizar.

Conforme los toros atraviesan diferentes edades se presentaran cambios importantes en la curva sigmoidea de CE, lo anterior se manifiesta de la siguiente forma: bajo crecimiento antes de las 25 semanas de edad, muy rápido crecimiento durante la fase peripubertal, crecimiento lento en los toros maduros y un descenso en el crecimiento si los toros alcanzan aproximadamente los 144 meses (1). Debido a que el promedio de heredabilidad para CE está alrededor del 0,67 (1), se ha concluido que los rebaños pueden obtener un progreso genético rápido mediante la selección de los toros con mejor CE. En un estudio posterior que involucro más de 3000 toros de un año de edad pertenecientes a razas productoras de carne, las estimaciones de heredabilidad para la constante de CE y edad fueron de $(0,41 \pm 0,06)$, $(0,34 \pm 0,06)$ para la longitud testicular, mientras que para el volumen de conjunto de ambos testículos el valor presentado fue de $(0,37 \pm 0,06)$ (5). Además se determino que la CE puede usarse como una medida confiable para predecir la pubertad y que los toros con CE menores tienen mayor probabilidad de producir semen de baja calidad (1). Finalmente, la CE fue asociada positivamente con las tasas de concepción y crecimiento de las hembras, por otra parte un estudio posterior (6) evidencio poca relación entre las características de crecimiento con la CE en los toros de carne jóvenes. Dependiendo de la raza la CE presenta diferencias sustanciales. En un artículo publicado en 1979 se evidencio la necesidad de registrar datos específicos de CE para los diferentes tipos raciales del macho bovino (1). Otro estudio (7) realizado en toros carniceros de 2 años de edad utilizo 7918 individuos de varias razas, los autores establecieron un mínimo requerido para las siguientes razas: Angus y Charoláis 35,0 cm, Herford y Shorton 34 cm y Limousine 33.

Pubertad

Se dice que un toro alcanza la pubertad cuando produce eyaculados con al menos 50×10^6 espermatozoides, de los cuales el 10 % presenta movilidad progresiva (8). De manera alternativa para definir la pubertad se ha usado la CE con un mínimo de 28 cm (9). Antes de la pubertad (entre las semanas 10 a 20) el macho bovino presenta un aumento transitorio en la secreción de gonadotropinas particularmente de LH; hay evidencia que lo anterior es crítico en

consideración a la pubertad y al desarrollo testicular (9). Estudios de tipo comparativo alrededor de las semanas 13, 15, 17 y 48 de edad han demostrado que los toros que alcanzan la pubertad de manera temprana (41.9 ± 0.3 semanas de edad) frente a los toros de pubertad más tardía (48.3 ± 0.7 semanas edad) tienen mayores concentraciones de LH ($P < 0.05$). En otros estudios similares los toros en etapa de (razas de aptitud cárnica) maduración que alcanzaron la pubertad de manera temprana (36.6 ± 44.2 semanas $n = 12$) tuvieron las concentraciones de LH en suero mayores durante las semanas 12, 14 y 16 en comparación con aquellos que alcanzaron la pubertad de forma tardía (46.4 ± 48.9 semanas $n = 8$) (11). Además en ese estudio el promedio de las concentraciones de LH a las semanas 4, 10 y 40 y la frecuencia del pulso para esta hormona se correlacionaron negativamente con la edad a la cual se presentaba la pubertad.

Hay considerable interés en la predicción temprana de los eventos reproductivos importantes en el macho bovino. Un estudio que utilizó 22 toros Angus x Charoláis y 17 Angus investigó el desarrollo sexual y la función reproductiva de los 6 a 16 meses de edad (12). Se encontró que las variables de edad, peso, CE y el volumen de ambos testículos, pueden ser utilizadas para predecir la pubertad y el estatus de madurez, con una sensibilidad y especificidad que va de alta a moderada (71,6 %- 92,4%). En otro estudio realizado a la 4 y 20 semanas de edad, se usó la aplicación de GnRH exógena como un medio de predecir el comienzo de la pubertad en los toros (13), se encontró que el pico de las concentraciones de LH y el área bajo la curva de respuesta a LH fueron menores ($P < 0.05$) en toros de pubertad tardía en comparación con los que alcanzaron la pubertad de manera temprana. Por lo tanto los autores concluyeron que la respuesta de LH a GnRH, podría ser usada en los terneros para seleccionar toros de pubertad temprana. Otra investigación que involucró 264 toros jóvenes de 200 días de edad con $CE \geq 23.0$ cm encontró que estos individuos tenían un 95 % de probabilidad de alcanzar una $CE >$ de 34 alrededor del año de edad mientras que aquellos que a los 200 días de edad tenían una $CE <$ de 23 cm tenían únicamente un 54 % de probabilidad de tener al año de edad una $CE >$ de 34 cm (14).

Investigaciones realizadas en toros Nelore y toros Canchim ($3/8$ *Bos indicus* x $5/8$ cruce de *Bos taurus*) determinaron que los toros que alcanzan la madurez de manera temprana tuvieron una CE menor en comparación con los toros de maduración tardía (15). En ese sentido se pudo concluir que la precocidad sexual no se relaciona con menor peso o CE. Por otra parte la CE al año podría ser usada para predecir el comienzo de la pubertad, mientras que la edad, el peso y la CE se pueden usar como variables para predecir la madurez sexual en *Bos indicus*.

Con el propósito de desencadenar la pubertad, terneros en etapa prepuberal (4 a 8 semanas de edad) fueron tratados una vez cada dos días con 3 mg de LH bovina ($n=6$) o 4 mg de FSH bovina ($n=6$) (16). En ese estudio, los toros tratados con FSH alcanzaron primero una $CE \geq$ de 28 cm (indicativa de pubertad) de manera más temprana ($P < 0,05$) en comparación con los toros pertenecientes al grupo no tratado (39.3 ± 1.3 vs. 44.8 ± 1.3 semanas). Además a la semana 56 los toros tratados con FSH tuvieron más células de Sertoli, espermátides elongadas y espermátocitos. Por lo tanto se observó que la aplicación de FSH exógena a partir de la semana 4 a la 8 de edad aumentó el crecimiento testicular (CE), aceleró la pubertad (indicada como una $CE \geq$ de 28 cm) y promovió la espermatogénesis. En contraste

aunque la aplicación de LH exógena aumentó las concentraciones de LH en sangre y parece estimular la espermatogénesis en algún grado, tales resultados no son significantes.

Efectos de la nutrición sobre el desarrollo testicular

En una serie de experimentos para determinar los efectos de la nutrición pos destete (a partir de los 6 a 7 meses hasta los 12 a 24 meses de edad) sobre el desarrollo y funcionamiento reproductivo, toros de razas con aptitud cárnica recibieron dos tipos de alimentación, una dieta rica en nutrientes (80 % de grano y 20 % de forraje) y una dieta de alimentación promedio (principalmente forraje) revisado en Coulter y Kastelic (17). Los toros que recibieron la dieta provista de alta energía tuvieron una mejor tasa de crecimiento, además de un mayor grosor de la grasa dorsal, sin embargo su producción espermática disminuyó de (10 % a 30 %), de la misma forma las reservas epididimales fueron menores, mientras que el porcentaje de las anomalías espermáticas aumentó hasta el 50 %. No obstante lo anterior, ambos grupos presentaron un peso testicular similar. Quizás el consumo de dietas con mayor energía resultó en una mayor acumulación de grasa a nivel del escroto, lo cual reduce la disipación de calor de los testículos, resultando en aumentos de la temperatura testicular con efectos adversos sobre la espermatogénesis y la calidad de los espermatozoides (17). En otro estudio, las dietas de alta nutrición (concentrado) produjeron toros con un 10 % de CE más grande que aquellos toros alimentados con dietas de nutrición media (forraje), sin embargo el peso testicular no presentó diferencia entre los grupos, además se sospecha que el aumento de la CE se deba al aumento del tejido graso.

Aun actualmente, no hay claridad entorno a la forma en que la nutrición desde el nacimiento hasta la madurez, afecta el desarrollo sexual, la producción espermática y la calidad seminal; (18). En ese estudio, los toros que recibieron nutrición baja (≈ 60 % del total de nutrientes digestibles [TND]) tuvieron testículos más pequeños además de que se demoraron en alcanzar la pubertad, mientras aquellos que recibieron nutrición alta (≈ 160 % del total de nutrientes digestibles TND) tuvieron un mayor tamaño testicular y manifestaron más temprano la pubertad en comparación con el grupo que recibió una dieta control (100 % del total de nutrientes digestibles TND). Evidencia más temprana señala el papel de la nutrición temprana sobre el tamaño de los testículos, en ese sentido se encontró que los machos cuyas madres tenían 2 años de edad tuvieron testículos más pequeños en comparación con machos hijos de madres de mayor edad, lo anterior podría estar relacionado con la capacidad de producción láctea de las madres de más edad (5). Los factores de ajuste para la CE al año no difirieron ($P > 0,20$) entre los grupos raciales y promediaron 0,032 cm/día. Los factores de ajuste para la edad de la madre fueron de +1,3 - +0,8 - +0,4 y 0,0 cm para hijos de madres de 2-,3-,4 y 5 años de edad (5).

En una serie de experimentos, toros de razas productoras de carne, fueron alimentados con diferentes dietas ($\approx 70\%$, 100% y 130% de las cantidades de energía y proteína recomendadas) para determinar el efecto de la nutrición durante la etapa inicial (≈ 10 -30 semanas) y durante el periodo prepuberal, sobre el desarrollo sexual y la función reproductiva (19). La totalidad de los toros alimentados con 130% de energía y proteína durante la etapa inicial tuvieron picos de LH mayores y presentados a etapas más tempranas (< 25 semanas), este patrón se prolongó aproximadamente hasta la semana 70, además de mayor tamaño testicular y de reservas de espermatozoides en el epidídimo. En contraste, los toros

alimentados con el 70% de los requerimientos tuvieron disminución en la secreción de LH antes de la semana 25, pubertad tardía, testículos pequeños y poca reserva de espermatozoides en el epidídimo a la semana 70 de edad. Se encontró que en los toros alimentados a partir de las semanas 10 a 70 con dietas de baja, media y alta calidad su edad respectiva para la pubertad fue de (media \pm error estándar) 326.9 ± 5.5 para la dieta baja, 304.7 ± 7.4 para la dieta media y 292.3 ± 4.6 para la dieta alta, sin ser significativa esta diferencia; en cuanto al peso testicular en gramos los valores registrados fueron de 523.9 ± 25.8 para la dieta baja, 552.4 ± 21.1 para la dieta media y 655.2 ± 21.2 para la dieta alta, siendo significativamente mayores para la dieta alta con respecto a la dieta baja. Además es de resaltar que cuando los toros alimentados con la dieta del 70% de los requerimientos a partir de las semanas 8 a 26 fueron sometidos a una posterior suplemento nutricional basado en el 130% de los requerimientos, el desarrollo testicular no mejoro y la pubertad se demoro en ser alcanzada; por lo tanto se concluyo que el suplemento alimenticio no permitió superar los déficits nutricionales de las etapas tempranas (19).

Aunque la tasa de crecimiento entre los 6 y 16 meses no afecta el desarrollo sexual y la función reproductiva en los toros de razas productoras de carne, fue asociada con pubertad y madurez tempranas así como con mayor tamaño de los testículos a los 16 meses de edad (coeficiente de correlación aproximado a 0,4-0,6; $P < 0,05$) (12). Por lo tanto dietas de nutrición alta aumentaron la función reproductiva únicamente cuando fueron suministradas a una edad inferior a los 6 meses de edad (12). En cuanto a las ganancias de peso de 1,0 a 1,6 kg/día no causaron acumulación excesiva de grasa en el escroto, ni aumentos en la temperatura escrotal o reducciones en la producción o calidad espermática (12).

Tamaño testicular y evaluación de potencial reproductivo

La CE es un componente integral de una evaluación de potencial reproductivo (20, 21). Debido a que la CE incrementa con la edad, el mínimo requerido varía de acuerdo a la edad del toro (21). Además algunas organizaciones usan estándares mínimos de CE según la raza a la que pertenezca el toro evaluado (22). En una investigación que evaluó el potencial reproductivo de 3648 toros (23), 76,2% fueron clasificados como reproductores potencialmente satisfactorios y un 7,1% de la totalidad de los toros fue considerada como reproductores insatisfactorios debido a su CE. En otro estudio de evaluación del potencial reproductivo (22) que evaluó 2898 toros de un año de edad, de 10% a 13% de los toros evaluados fueron catalogados como reproductores insatisfactorios (dependiendo del estándar mínimo usado para CE). En otra investigación realizada en 205 rebaños dedicados a la producción de carne en un total de 2990 evaluaciones de potencial reproductivo se encontró que el porcentaje de espermatozoides morfológicamente normales fue menor ($P < 0.006$) en los toros que tenían una CE ≤ 34 cm frente a aquellos que registraron una CE $>$ de 34 cm (24). Además, las vacas que fueron expuestas a toros con la CE más pequeñas tuvieron menor probabilidad de ser diagnosticadas en estado de gravidez ($P < 0.047$) y tuvieron un intervalo promedio mayor desde la primera exposición al toro hasta parir ($P < 0,016$) en relación a aquellos toros de CE mayor (promediando de manera conjunta 92,2% para la tasa de preñez y 304 días de intervalo de exposición al toro hasta el parto).

Temperatura testicular

Es bien conocido que los testículos del toro deben estar de 2 °C a 6 °C más fríos que la temperatura central, esto para la producción de espermatozoides fértiles ya que los aumentos

en la temperatura testicular reducen la calidad espermática (25). Varias características regulan la temperatura del testículo. En cuanto a la piel del escroto, esta usualmente es delgada, tiene poco vello y numerosos vasos sanguíneos subcutáneos, todo lo cual promueve la pérdida de calor (25). Además el cuello del escroto permite alejar los testículos del cuerpo, esto permite mantenerlos más fríos (25). El así llamado cono vascular testicular está localizado arriba de los testículos; está comprendido por la muy enrollada arteria testicular envuelta por el plexo pampiniforme el cual a su vez constituye una compleja red venosa (26). El cono vascular testicular actúa como un mecanismo de intercambio calórico a contracorriente, transfiriendo calor desde la arteria hacia la vena (26). La sudoración del escroto mas el jadeo complementan el proceso de enfriamiento de los testículos (26).

Se han conducido varios estudios sobre las temperaturas testiculares y del escroto, con el propósito de observar el papel de los vasos sanguíneos en la regulación de estas temperaturas. Las diferencias de temperatura observadas de la parte superior a la base, fueron de 1.6°C para la superficie del escroto, 0.4°C en la parte subcutánea del escroto y -0.2°C a nivel intratesticular (27). La parte superior del escroto es la parte más caliente y la base es la más fría, mientras que los testículos (cuando son removidos del escroto) son más fríos en la parte superior que en la base (28). Estos gradientes de temperatura son considerados consistentes con la anatomía vascular del testículo. El escroto esta irrigado de la parte superior a la base, mientras que el testículo lo está esencialmente de la base a la parte superior (29). Con respecto a lo anterior, la arteria testicular sale de la base del cono vascular, desciende hacia el testículo y en la base del testículo se divide en varias ramas que se extienden lateralmente y dorsalmente a través de la superficie posterior del testículo para posteriormente entrar al parénquima testicular (29). La sangre dentro de la arteria testicular esta aproximadamente a la misma temperatura tanto en la parte superior como en la base del testículo, pero se enfría entre la base y el lugar donde ingresa en el parénquima (29). Por lo tanto el escroto y los testículos están más calientes en el origen de sus suplementos sanguíneos (parte superior del escroto y base de los testículos), pero la temperatura desciende cada vez más a partir de ese punto (base del escroto, parte superior del testículo) (28,29). Notablemente, estos gradientes de temperatura (necesariamente complementarios) resultan en una temperatura testicular uniforme *in vivo* (28,29).

Evaluación de la superficie escrotal mediante termografía infrarroja

Los termogramas realizados a toros con termorregulación normal, revelan una manifiesta simetría, además de indicar un descenso de 4°C a 6°C, en la temperatura de la parte superior del testículo a la base (30). Mientras que los patrones de temperatura más aleatorios se pueden interpretar como un mecanismo de termorregulación anormal (testículos o epidídimo). Casi todos los toros que presentan un termograma anormal, producen espermatozoides de baja calidad (30). Sin embargo no todos los toros con pobre calidad espermática tienen un termograma anormal. Por lo tanto, aunque la termografía de rayos infrarrojos es útil como una herramienta durante la evaluación de potencial reproductivo, esta técnica no se usa con el propósito de remplazar la colección y evaluación del semen (30). En un trabajo que utilizo 30 toros de producción cárnica de un año de edad, cada uno de los cuales fue calificado como aceptable según una evaluación estándar de potencial reproductivo, para posteriormente ser expuestos a aproximadamente 18 novillas por un periodo de tiempo de 45 días (31). Se encontró que cuando las novillas fueron examinadas a los 80 días después del final de la

temporada de monta, las tasas de preñez fueron similares para los toros con un patrón de temperatura de superficie escrotal normal (83%) frente a aquellos que presentaron un patrón de temperatura cuestionable, sin embargo los toros con patrones de temperatura anormales presentaron tasas de preñez inferiores (68%) ($P < 0.01$) en comparación con los reproductores normales o cuestionables (31).

Ultrasonografía de los testículos del toro

Aunque la técnica del ultrasonido se usa (en investigación y aplicaciones clínicas) para observar el tracto reproductivo de la vaca, a la fecha no se ha empleado ampliamente para examinar el tracto reproductivo del toro (30). Un trabajo que realizó una sola observación por 3 minutos de los testículos del toro, usando un escáner de ultrasonido estándar, no evidenció ningún efecto significativo sobre el tamaño testicular, producción o morfología espermática (32). La técnica del ultrasonido ha sido usada para evaluar los testículos (30). En trabajos anteriores que evaluaron el valor de esta técnica, se concluyó que el examen rutinario mediante ultrasonido, no suministra información adicional sobre el potencial reproductivo en comparación con las técnicas de evaluación estándar (examen físico del tracto reproductivo más la colección y análisis de la calidad espermática) (33). Aunque el ultrasonido es un medio útil y no invasivo para medir el tamaño de los testículos en el toro, no es una técnica que supere a la medición de la CE (33).

Para caracterizar la eco textura del testículo (34) 10 toros de razas productoras de carne, fueron examinados mediante ultrasonido cada 2 semanas a partir de la 2 a la semana 46 de edad con una inflexión de 30 semanas ($P < 0.05$). Similarmente, en otra investigación (35) se observó que la ecogenicidad testicular incremento entre las 20 y 40 semanas de edad. En estudios posteriores, toros de razas productoras de carne ($n = 152$) fueron examinados de la semana 20 a la 70 de edad, para observar la intensidad de pixeles del ultrasonograma durante el desarrollo sexual (36). En ese estudio, la ecogenicidad testicular comenzó a incrementar (los testículos aparecieron más blancos) 16 a 12 semanas antes de la pubertad y alcanzó el máximo 4 a 0 semanas antes de la pubertad. Aunque la ecogenicidad incrementa (el parénquima aparece más blanco) cuando el toro se acerca a la pubertad, la ecogenicidad no fue mejor frente a la CE como técnica para predecir la pubertad (36).

La técnica del ultrasonido puede ser usada para detectar y caracterizar las patologías testiculares. Es notable que las áreas de ecogenicidad incrementada (fibrosis testicular) son comunes, especialmente en toros jóvenes, pero no están asociadas con descensos en la calidad de los espermatozoides producidos (porcentaje de espermatozoides morfológicamente anormales) (30). Desafortunadamente ni la evaluación visual ni el análisis de pixel computarizado de la eco textura ultrasónica testicular fueron capaces de predecir de forma consistente la calidad del semen de los toros (30). Por lo tanto se concluyó que el uso clínico primario de la técnica de ultrasonido, en la evaluación de la función reproductiva en el toro es la caracterización de lesiones en los testículos y el escroto (30).

Discusión y conclusiones

El tamaño testicular está fuertemente relacionado con la capacidad potencial de producción espermática, esta variable comúnmente es evaluada mediante la medida de CE. Debido a que la CE varía sustancialmente entre toros y es relativamente heredable es posible incrementar la CE usando selección genética en los rebaños. En los toros jóvenes la CE puede ser usada para predecir el comienzo de la pubertad. Alimentar a los machos de menor edad con dietas altas en energía y proteína aceleró el comienzo de la pubertad además de mejorar la CE y la producción espermática. Hay unos estándares mínimos de CE para que un toro sea declarado como potencial reproductor. En general, los toros con una CE más grande usualmente tienen un mayor porcentaje de espermatozoides morfológicamente normales. Para la producción de espermatozoides fértiles los testículos deben estar más fríos que la temperatura corporal. La termorregulación del escroto y los testículos, puede ser evaluada usando termografía infrarroja, mientras que las lesiones en los testículos y en el escroto pueden ser caracterizadas mediante el uso del ultrasonido.

Referencias

- [1] Coulter GH, Foote RH. Bovine testicular measurements as indicators of reproductive performance and their relationship to productive traits in cattle: a review. *Theriogenology* 1979;11: 297–311.
- [2] Bailey TL, Hudson RS, Powe TA, Riddell MG, Wolfe DF, Carson RL. Caliper and ultrasonographic measurements of bovine testicles and a mathematical formula for determining testicular volume and weight in vivo. *Theriogenology* 1998;49:581–94.
- [3] Hahn J, Foote RH, Seidel Jr GE. Testicular growth and related sperm output in dairy bulls. *J Anim Sci* 1969;29:41–7.
- [4] Bailey TL, Monke D, Hudson RS, Wolfe DF, Carson RL, Riddell MG. Testicular shape and its relationship to sperm production in mature Holstein bulls. *Theriogenology* 1996;46:881–7.
- [5] Lunstra DD, Gregory KE, Cundiff LV. Heritability estimates and adjustment factors for the effects of bull age and age of dam on yearling testicular size in breeds of bulls. *Theriogenology* 1988;30: 127–36.
- [6] Schramm RD, Osborne PI, Thayne WV, Wagner WR, Inskeep EK. Phenotypic relationships of scrotal circumference to frame size and body weight in performance-tested bulls. *Theriogenology* 1989;31: 495–504.
- [7] Coulter GH, Mapletoft RJ, Kozub GC, Cates WF. Scrotal circumference of two-year-old bulls of several beef breeds. *Theriogenology* 1987; 27:485–91.
- [8] Wolf F, Almquist J, Hale E. Prepuberal behavior and puberal characteristics of beef bulls on high nutrient allowance. *J Anim Sci* 1965; 24:761–5.
- [9] Rawlings N, Evans AC, Chandolia RK, Bagu ET. Sexual maturation in the bull. *Reprod Domest Anim* 2008;43(Suppl. 2):295–301.
- [10] Evans AC, Davies FJ, Nasser LF, Bowman P, Rawlings NC. Differences in early patterns of gonadotrophin secretion between early and late maturing bulls, and changes in semen characteristics at puberty. *Theriogenology* 1995;43:569–78.
- [11] Aravindakshan JP, Honaramooz A, Bartlewski PM, Beard AP, Pierson RA, Rawlings NC. Pattern of gonadotropin secretion and ultrasonographic evaluation of developmental changes in the testis of early and late maturing bull calves. *Theriogenology* 2000;54: 339–54.
- [12] Brito LF, Barth AD, Wilde RE, Kastelic JP. Effect of growth rate from 6 to 16 months of age on sexual development and reproductive function in beef bulls. *Theriogenology* 2012;77:1398–405.

- [13] Bagu ET, Cook SJ, Honaramooz A, Aravindakshan JP, Huchkowsky S, Rawlings NC. Changes in serum luteinizing hormone (LH) concentrations in response to luteinizing hormone releasing hormone (LHRH) in bull calves that attained puberty early or late. *Theriogenology* 2006;66:937–44.
- [14] Coe PH, Gibson CD. Adjusted 200-day scrotal size as a predictor of 365-day scrotal circumference. *Theriogenology* 1993;40:1065–72.
- [15] Brito LF, Silva AE, Unanian MM, Dode MA, Barbosa RT, Kastelic JP. Sexual development in early- and late-maturing *Bos indicus* and *Bos indicus* × *Bos Taurus* crossbred bulls in Brazil. *Theriogenology* 2004; 62:1198–217.
- [16] Bagu ET, Madgwick S, Duggavathi R, Bartlewski PM, Barrett DM, Huchkowsky S, et al. Effects of treatment with LH or FSH from 4 to 8 weeks of age on the attainment of puberty in bull calves. *Theriogenology* 2004;62:861–73.
- [17] Coulter GH, Kastelic JP. Management programs for developing bulls. In: Howard JL, Smith R, editors. *Current veterinary therapy-food animal practice 4*. Philadelphia, PA: W.B. Saunders Co; 1999. p. 127–36.
- [18] Bratton RW, Musgrave SD, Dunn HO, Foote RH. Causes and prevention of reproductive failure in dairy cattle: II. Influence of underfeeding and overfeeding from birth to 80 weeks of age on growth, sexual development, and semen production in Holstein bulls. Ithaca: New York State College of Agriculture; 1959. p. 45. Bulletin 940.
- [19] Barth AD, Brito LF, Kastelic JP. The effect of nutrition on sexual development of bulls. *Theriogenology* 2008;70:485–94.
- [20] Kastelic JP, Thundathil J. Breeding soundness evaluation and semen analysis for predicting bull fertility. *Reprod Dom Anim* 2008; 43(Suppl. 2):368–73.
- [21] Kastelic JP, Thundathil JC, Brito LFC. Bull BSE and semen analysis for predicting bull fertility. *Clin Theriogenology* 2012;4:277–87.
- [22] Higdon 3rd HL, Spitzer JC, Hopkins FM, Bridges Jr WC. Outcomes of breeding soundness evaluation of 2898 yearling bulls subjected to different classification systems. *Theriogenology* 2000;53:1321–32.
- [23] Kennedy SP, Spitzer JC, Hopkins FM, Higdon III HL, Bridges Jr WC. Breeding soundness evaluations of 3648 yearling beef bulls using the 1993 Society for Theriogenology guidelines. *Theriogenology* 2002;58:947–61.
- [24] Waldner CL, Kennedy RI, Palmer CW. A description of the findings from bull breeding soundness evaluations and their association with pregnancy outcomes in a study of western Canadian beef herds. *Theriogenology* 2010;74:871–83.
- [25] Kastelic JP. Thermoregulation of the testes. In: Hopper RM, editor. *Bovine reproduction*. Hoboken: Wiley–Blackwell; (in press).
- [26] Cook RB, Coulter GH, Kastelic JP. The testicular vascular cone, scrotal thermoregulation, and their relationship to sperm production and seminal quality in beef bulls. *Theriogenology* 1994;41:653–71.
- [27] Kastelic JP, Coulter GH, Cook RB. Scrotal surface, subcutaneous, intratesticular, and intraepididymal temperatures in bulls. *Theriogenology* 1995;44:147–52.
- [28] Kastelic JP, Cook RB, Coulter GH. Contribution of the scrotum and testes to scrotal and testicular thermoregulation in bulls and rams. *J Reprod Fertil* 1996;108:81–5.

- [29] Kastelic JP, Cook RB, Coulter GH. Contribution of the scrotum, testes, and testicular artery to scrotal/testicular thermoregulation in bulls at two ambient temperatures. *Anim Reprod Sci* 1997;45: 255–61.
- [30] Kastelic JP, Brito LF. Ultrasonography for monitoring reproductive function in the bull. *Reprod Domest Anim* 2012;47(Suppl. 3): 45–51.
- [31] Lunstra DD, Coulter GH. Relationship between scrotal infrared temperature patterns and natural-mating fertility in beef bulls. *J Anim Sci* 1997;75:767–74.
- [32] Coulter GH, Bailey DRC. Effects of ultrasonography on the bovine testis and semen quality. *Theriogenology* 1988;30:743–9.
- [33] Eilts BE, Pechman RD. B-mode ultrasound observations of bull testes during breeding soundness examinations. *Theriogenology* 1988;30: 1169–75.
- [34] Chandolia RK, Honaramooz A, Omeke BC, Pierson R, Beard AP, Rawlings NC. Assessment of development of the testes and accessory glands by ultrasonography in bull calves and associated endocrine changes. *Theriogenology* 1997;48:119–32.
- [35] Evans ACO, Pierson RA, Garcia A, McDougall LM, Hrudka F, Rawlings NC. Changes in circulating hormone concentrations, testes histology and testes ultrasonography during sexual maturation in beef bulls. *Theriogenology* 1996;46:345–57.
- [36] Brito LFC, Barth AD, Wilde RE, Kastelic JP. Testicular ultrasonogram pixel intensity during sexual development and its relationship with semen quality, sperm production, and quantitative testicular histology in beef bulls. *Theriogenology* 2012; 78:69–76.