

El efecto de la edad, el sexo y la maduración *post mortem* sobre la calidad de la carne y el perfil bioquímico de músculos de bovinos Brangus

Julieta Fernández Madero ^{a,b,*}

Laura Pouzo ^{a,c}

Darío Pighín ^{d,e}

Jorge Alejandro Navarro ^f

Fernando Ailán ^g

César Federico Guzmán ^h

Enrique Paván ^{a,c}

^a Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ciencias Agrarias. Balcarce, Buenos Aires, (7620), Argentina.

^b Universidad Católica de Salta. Facultad Ciencias Agrarias y Veterinarias. Salta, Argentina.

^c Instituto Nacional de Tecnología Agropecuarias, EEA Balcarce, Balcarce, Argentina.

^d Instituto Nacional de Tecnología Agropecuarias. Instituto Tecnología de Alimentos - CNIA - Castelar. Buenos Aires, Argentina.

^e Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET. Argentina.

^f Universidad Nacional de Salta. Salta, Argentina.

^g Universidad Nacional de Tucumán. Tucumán, Argentina.

^h Instituto Nacional de Tecnología Agropecuarias, EEA Cuenca del Salado, Argentina.

* Autor de correspondencia: jfernandez@ucasal.edu.ar

Resumen:

Se evaluaron los rasgos de calidad de la canal y los músculos *Longissimus thoracis* (LT) y *semitendinoso* (ST), madurados durante 2 o 14 días, de sesenta machos Brangus castrados (MC) y no castrados (MNC), sacrificados a los 16 (M16) o 20 (M20) meses de edad (391 y

434 kg de peso vivo; 3.81 y 4.25 mm de grosor de la grasa dorsal, respectivamente). Las canales de los animales castrados y más jóvenes pesaron menos que las de los no castrados y de mayor edad ($P<0.001$). La castración produjo más grasa subcutánea y áreas del ojo de la costilla menores ($P<0.05$). La disminución de la temperatura y el pH fue más rápida en los animales más jóvenes, y el pH final fue menor en los castrados ($P<0.05$). Mientras que la Fuerza de Cizalla de Warner-Bratzler (FCWB) de LT fue 9 % menor en los castrados, y 7 % mayor en animales más jóvenes ($P<0.05$); disminuyó con un período de maduración más largo ($P<0.001$). La FCWB de LT se asoció positivamente con el contenido de colágeno total ($r= 0.54$; $P<0.01$) y negativamente con el índice de fragmentación miofibrilar ($r= -0.39$; $P<0.05$). La FCWB de ST no se vio afectada por la castración o la edad de sacrificio del animal ($P>0.05$), pero disminuyó con un período de maduración más largo ($P<0.001$), y se asoció positivamente con el contenido de colágeno total ($r= 0.61$; $P<0.05$). Ambos músculos de castrados sacrificados a edades más tempranas presentaron los valores más altos de L*. Se concluye que la castración y la edad de sacrificio en machos Brangus produjeron diferencias en los valores de FCWB solo en el músculo LT, donde el colágeno no es el principal determinante de la fuerza de cizalla.

Palabras clave: Carne de res, Brangus, Colágeno, Color, Índice de fragmentación miofibrilar, Fuerza de cizalla, Disminución de temperatura.

Recibido: 22/07/2023

Aceptado: 28/09/2023

Introducción

Los machos no castrados son una alternativa interesante para que los productores de carne de res obtengan canales más magras o más pesadas^(1,2). La testosterona es la principal hormona producida en los machos no castrados. Entre sus funciones se incluye el desarrollo de los órganos masculinos, los caracteres sexuales secundarios y promotor del desarrollo muscular. Esta propiedad anabólica influye directamente en la ganancia diaria de peso y en la eficiencia alimenticia, produciendo una canal con mayor rendimiento de producto al por menor, con menos grasa y más carne roja que los castrados⁽³⁾. Las diferencias a favor de los sementales son generalmente más pronunciadas con el aumento del peso de sacrificio⁽¹⁾. No obstante, las canales magras con bajo grosor de grasa podrían dar lugar a una rápida disminución de la temperatura, lo que daría lugar a cortes más duros⁽⁴⁾. La menor ternera de la carne de los machos no castrados que de los castrados se asoció con su mayor contenido de tejido conectivo y menor actividad proteasa endógena responsable de la tenderización *post mortem*^(5,2). Por otro lado, a medida que los animales envejecen, la solubilidad del colágeno

de la carne disminuye⁽⁶⁾ y la concentración de mioglobina aumenta⁽⁷⁾. Por lo tanto, se pueden esperar cortes de carne más duros y oscuros con el aumento de la edad de los animales⁽¹⁾.

Se ha propuesto que el efecto de la castración y de la edad de sacrificio del animal sobre el color y la terneza de la carne varía con el tipo de músculo^(5,8). Además, la respuesta a la maduración *post mortem* también varía con el tipo de músculo^(5,9). Rodríguez *et al*⁽⁵⁾ no encontraron efecto de la castración sobre la Fuerza de Cizalla de Warner-Bratzler (FCWB) en músculos con alta cantidad de tejido conectivo [*Psoas mayor*, *semitendinoso* (ST)]; sin embargo, observaron efecto de la castración en la FCWB en el músculo *Longissimus*. La terneza estaría principalmente determinada por el alto contenido de colágeno y la solubilidad en el músculo *semitendinoso*, y por la mayor actividad de proteólisis *post mortem* en músculos como *Longissimus thoracis* (LT)⁽⁹⁾. Por lo tanto, los efectos de la castración y de la edad de sacrificio sobre el color y la terneza de la carne varían con el tipo de músculo considerado^(5,10), así como con el período de maduración *post mortem*⁽¹¹⁾.

Apenas unos pocos estudios han evaluado los efectos de la castración o edad de sacrificio sobre el rendimiento animal y las características de la canal de bovinos Brangus^(12,13), pero ninguno de ellos evaluó la interacción que estos efectos tienen sobre la calidad de la carne de diferentes músculos. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la castración y la edad de sacrificio de los machos Brangus sobre la calidad de la canal y el perfil bioquímico de dos músculos de diferentes características, el LT y el ST.

Material y métodos

El ensayo se llevó a cabo siguiendo las normas de Buenas Prácticas de Manufactura y bienestar para el manejo de animales recomendadas por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Argentina. El ensayo fue aprobado por el comité ético y técnico institucional de la Universidad Católica de Salta (RR N° 694/12). El estudio se realizó en General Güemes, provincia de Salta, Argentina (24°42'40.8"S, 64°57'48.8"W, 670 m de altitud).

Animales y tratamientos

Sesenta (60) terneros Brangus de edad (7 meses) y peso similar (178 ± 13 kg) se seleccionaron aleatoriamente del mismo rebaño de vacas-terneros y se asignaron a una de las cuatro combinaciones de tratamiento definidas por la categoría de sexo (MC, machos castrados y MNC, machos no castrados) y la edad de sacrificio (M16, machos sacrificados a los 16 meses de edad, y M20, machos sacrificados a los 20 meses de edad). Cada combinación involucró a 15 animales. A los 7 meses de edad, los animales asignados a MC fueron castrados quirúrgicamente. Los animales fueron criados en un potrero de alfalfa y

suplementados con una mezcla de grano de maíz entero (25 % MS), ensilaje de sorgo de planta entera (72.5 % MS) y núcleo vitamínico-mineral con monensina (2.5 % MS) suministrada al 1.5 % de peso vivo hasta que fueron encerrados en un corral. El período de cría fue de 3 meses para M16 y de 7 meses para 20. Para M16 el peso vivo de entrada a los corrales fue de 192 ± 3 kg y para M20 de 293 ± 9 kg. Durante el encierro, la dieta concentrada consistió en grano de maíz partido (57.25 % MS), ensilaje de maíz de planta entera (26 % MS), pellets de girasol o algodón (13.5 % MS), urea granulada (0.75 % MS) y un suplemento vitamínico mineral con monensina (2.5 % MS). El peso vivo se determinó cada 28 d. La ganancia diaria promedio y la eficiencia alimenticia observadas durante el período de encierro fueron de 0.96 ± 0.11 kg/d y de 8.5 ± 0.9 kg/kg para MC y de 1.11 ± 0.12 kg/d y 7.6 ± 1.1 kg/kg para MNC, independientemente de la edad de sacrificio.

Medición de canales y recolección de muestras

El día anterior al sacrificio, los animales se pesaron individualmente para registrar su peso vivo total (PV) y se enviaron al rastro situado a 350 km de la granja experimental (tiempo de conducción de 5 h), donde se mantuvieron en estabulación durante 12 h antes del sacrificio, con libre acceso a agua y extracción de alimento.

Las canales fueron estimuladas eléctricamente (21 V 0.25 A en dos tiempos de estimulación independientes de 20 y 30 seg); luego se registró el peso de la canal caliente (PCC). El rendimiento a la canal se calculó dividiendo el PCC entre el PV total del animal previo al embarque x 100. El pH y la temperatura muscular se registraron entre las costillas 12 y 13 *Longissimus thoracis et lumborum* del lado izquierdo de la canal a las 2, 5, 8, 14 y 26 h *post mortem* utilizando un medidor de pH Testo 205. Para estimar la disminución del pH y la temperatura, y las velocidades de enfriamiento de la canal, se utilizó el concepto de ventana de pH/temperatura implementada en Meat Standards Australia (MSA). Este concepto incluye la medición de la temperatura cuando el valor de pH = 6 (Temp@pH6) y la medición del pH cuando el valor de temperatura = 12 °C (pH@Temp12).

Después de 48 h de enfriamiento, se midió el pH final (pHf) en la costilla 12 del lado izquierdo de las canales. El grosor de la grasa dorsal (GGD) se midió entre las costillas 12 y 13 utilizando un calibrador digital (Starrett 125). El área del ojo de la costilla (AOC) del LT se registró en la costilla 12 y luego se analizó con el software Image APS-Asses Ink (Universidad de Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canadá, 2002). Se tomaron muestras de los músculos LT y ST del lado izquierdo de las canales. La sección de las costillas 8 a 12 se obtuvo del lado izquierdo de cada canal cortando perpendicularmente al eje largo del músculo LT en las articulaciones de las costillas dorsales 7-8 y 12-13. El músculo ST completo del lado izquierdo de cada canal también se obtuvo durante la elaboración de la canal a las 48 h *post mortem*.

Preparación de muestras y tratamientos *post mortem*

Se obtuvieron cuatro filetes de 1.5 cm y dos de 2.5 cm de grosor de cada muestra muscular de caudal a craneal. Los filetes de 1.5 cm de grosor se envasaron inmediatamente al vacío y se almacenaron a -20 °C para la posterior determinación de la longitud del sarcómero (LS), el contenido de lípidos totales, el índice de fragmentación miofibrilar (IFM), el potencial glucolítico y el contenido de colágeno total y soluble. Los filetes de 2.5 cm de grosor se asignaron aleatoriamente a uno de los dos períodos de maduración (2 y 14 días) al vacío a 4 °C. Después del período de maduración, las muestras de carne se almacenaron a -20 °C hasta la evaluación de la FCWB y del color.

Evaluación de la calidad de la carne

Color

Las mediciones instrumentales del color se tomaron después de 30 min de aireación. Las lecturas se realizaron con un Minolta CR-310 (Minolta Corp, Ramsey, N.J.) utilizando un área de medición de 50 mm de diámetro, un observador estándar de 10° y un iluminante D65. El sistema utilizado fue el CIE Lab, que proporciona tres componentes de color: L* (luminosidad, 0= negro, 100= blanco), a* (índice rojo, -a*= verde, +a*= rojo) y b* (índice amarillo, -b= azul, +b= amarillo). Los valores se registraron en tres ubicaciones del área expuesta para obtener una lectura representativa.

Contenido de lípidos totales

El contenido lipídico total (g de lípidos/100 g de tejido fresco) se determinó mediante un sistema de extracción automática (Ankom xt10, Ankon, Macedonia NY, EE. UU.) y éter de petróleo como disolvente⁽¹⁴⁾.

Fuerza de Cizalla de Warner-Bratzler

El análisis de la FCWB fue realizado siguiendo las directrices de la AMSA, 1995⁽¹⁵⁾. Los filetes se descongelaron a 4 °C durante 12 h y se cocinaron en una parrilla eléctrica de hogar abierto (Farberware, Bronx, Nueva York) precalentada a una temperatura interna de 71 °C. Los filetes se enfriaron a 4 °C durante 1 h; a continuación, se extrajeron seis piezas de 1.27 cm de diámetro de cada filete paralelos a la orientación de la fibra muscular. Las piezas se cortaron perpendicularmente al eje largo de la muestra muscular utilizando una máquina de prueba FCWB (G-R Manufacturing, Manhattan, KS, EE. UU.) equipada con un dinamómetro digital.

Contenido de colágeno total y soluble

El contenido de colágeno total se estimó mediante la determinación de hidroxiprolina mediante el procedimiento descrito por Bergman y Loxley⁽¹⁶⁾. El contenido de colágeno

insoluble se determinó mediante un procedimiento adaptado de Hill⁽¹⁷⁾. El contenido soluble se estimó como la diferencia entre el contenido de colágeno total e insoluble.

Longitud del sarcómero

Se homogeneizaron 3 g de tejido muscular en 20 ml de solución 0.25 M de sacarosa a 4 °C durante 15 seg con un dispersor (CAT x 120, Alemania)⁽¹⁸⁾. La longitud del sarcómero se determinó mediante un láser de difracción (CVI Melles Gliot. Serie 7822 FH-1)⁽¹⁸⁾.

Potencial glucolítico

El potencial glucolítico se calculó a partir de la concentración muscular de glucógeno y lactato, donde $PG = 2 (\text{glucosa 6-fosfato} + \text{glucógeno} + \text{glucosa}) + \text{lactato}$ ⁽¹⁹⁾.

Contenido de glucógeno

El contenido de glucógeno muscular fue extraído de los músculos por hidrólisis ácida⁽²⁰⁾. Brevemente, se homogeneizaron (Ultraturrax, Fisher Scientific) alrededor de 500 mg de muestras musculares durante 30 seg en 5 ml de HCl 2 N, y luego se sometieron a hidrólisis a 100 ± 1 °C durante 2 h. La glucosa liberada se midió espectrofotométricamente (505 nm; Espectrofotómetro Thermo Fisher Scientific EE. UU.) en los homogeneizados neutralizados (NaOH 2 N) con la prueba de color GOD/ POD Trinder (GT Wiener Lab, Rosario, Argentina). El contenido de glucógeno disponible se expresó como mmol de glucosa por gramo de tejido húmedo. La glucosa cuantificada incluyó glucosa libre y glucosa proveniente de hidrólisis de glucógeno⁽²⁰⁾.

Contenido de lactato

El lactato muscular se determinó espectrofotométricamente (550 nm; espectrofotómetro-Thermo Fisher Scientific. EE. UU.), siguiendo el procedimiento descrito por Neath *et al*⁽²¹⁾ y utilizando un kit comercial (kit Randox LAC; Randox Laboratories Ltd, Crumlin, Co. Antrim, Reino Unido).

Índice de fragmentación miofibrilar

La concentración de proteína se determinó mediante el cálculo del IFM de acuerdo con el protocolo descrito por Hopkins *et al*⁽²²⁾, utilizando un espectrofotómetro de microplacas equipado con un lector tipo Epoch (Biotek, USA).

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el procedimiento mixto del Sistema de Análisis Estadístico R (Versión 3.6.1). Los datos se analizaron por separado para cada músculo (LT, ST). Los datos de color y de FCWB se analizaron como un diseño de parcelas divididas, donde los efectos del sexo y la edad de sacrificio se consideraron en la parcela principal y el

efecto del período de maduración *post mortem* se consideró como una subparcela. En el modelo se calcularon todas las interacciones posibles entre los factores individuales. Se analizaron los datos de las variables en las que no se incluyó el efecto del período de maduración [disminución de pH y temperatura, peso vivo del animal y características de la canal, longitud del sarcómero, grasa intramuscular (GIM), colágeno total y soluble, glucógeno, IFM] bajo un diseño completamente aleatorizado con un arreglo factorial 2 x 2 (dos categorías y dos edades de sacrificio). Para las variables de las características de la canal (disminución de pH y de temperatura, rendimiento a la canal, área del ojo de la costilla y grosor de la grasa dorsal) se consideró como covariable el PV. Las medias de mínimos cuadrados se calcularon para los efectos principales e interactivos y se separaron estadísticamente mediante pruebas de t protegidas por F ($P < 0.05$). Para evaluar el grado de asociación entre las diferentes variables fisicoquímicas que explican el color y la terneza, se utilizaron correlaciones de Pearson ($P \leq 0.05$).

Resultados

Características generales

En el Cuadro 1 se muestra el efecto de la edad y la categoría sobre el PV y las características de la canal. Se observó una interacción significativa entre la categoría de sexo y la edad de sacrificio (S x ES) para el PV ($P < 0.001$). A una edad mayor (M20), el PV aumentó alrededor de un 4 % en MC y un 9 % en MCN. El peso de la canal caliente fue menor en MC que en MNC, y mayor en M16 que en M20 ($P < 0.001$). Independientemente de la edad de sacrificio, el GGD fue 30 % mayor ($P < 0.01$) en MC que en MNC, y el AOC fue 11 % menor ($P < 0.001$). El pH final fue menor en MC que en MNC ($P < 0.05$; 5.46 y 5.53, respectivamente).

La disminución de pH y temperatura del músculo LT estuvo influenciada por la interacción entre la edad de sacrificio y el tiempo de la medición (S x TM; $P < 0.001$; Cuadro 2). La temperatura de M16 y M20 disminuyó a medida que avanzaba el tiempo de medición *post mortem*, pero a diferentes velocidades. Aunque las temperaturas inicial y final (2 y 26 h *post mortem*) de LT fueron similares para M16 y M20, las temperaturas de LT a 5, 8 y 14 h *post mortem* fueron menores para M16 que para M20. Además, la temperatura muscular fue mayor en MC que en MNC, independientemente del tiempo *post mortem* ($P < 0.001$; 12.06 y 11.13 °C, respectivamente). El pH muscular fue 2.2 % mayor en M16 que en M20 solo a las 2 h *post mortem*, sin observarse diferencias en los tiempos de medición *post mortem* restantes ($P > 0.05$).

Cuadro 1: Efecto de la categoría de sexo y la edad de sacrificio sobre el peso vivo y las características de la canal de bovinos Brangus

	M16		M20		EEM	Significancia		
	MC	MNC	MC	MNC		S	ES	S x ES
Peso vivo del animal y rasgos de la canal								
Peso vivo, kg	393.84 ^c	404.70 ^b	410.76 ^b	443.97 ^a	4.07	***	***	***
Peso de la canal caliente, kg	218.67 ^c	228.33 ^b	235.53 ^b	252.93 ^a	3.19	***	***	ns
Rendimiento a la canal (PCC/PV x 100)	56.32	56.66	57.14	56.45	0.54	ns	ns	ns
Grosor de la grasa dorsal, mm	4.55 ^a	3.07 ^b	4.55 ^a	3.95 ^b	0.50	**	ns	ns
Área del ojo de la costilla, cm ²	57.30 ^a	63.29 ^b	59.16 ^a	67.50 ^b	1.70	**	ns	ns
Temp@pH6	17.51	16.73	19.58	19.59	1.46	ns	ns	ns
pH@Temp12	5.74	5.81	5.75	5.80	0.07	ns	ns	ns
pH _f	5.42 ^a	5.57 ^b	5.45 ^a	5.61 ^b	0.02	*	ns	ns

M16= machos sacrificados a los 16 meses de edad; M20= machos sacrificados a los 20 meses de edad; MNC= machos no castrados; MC= machos castrados; EEM= error estándar de la media; S= categoría de sexo; ES= edad de sacrificio; S x ES= interacción entre la categoría de sexo y la edad de sacrificio; Temp@pH6= temperatura muscular cuando el pH es 6; pH@Temp12= valor de pH cuando la temperatura muscular es de 12 °C; pH_f= pH final a las 24 h *post mortem*;

^{a b c} Las medias de LS con superíndices diferentes dentro de una fila son diferentes ($P < 0.05$). *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; ns: $P > 0.1$.

Cuadro 2: Evolución de la temperatura y el pH medidos en el músculo *Longissimus thoracis* durante las primeras 26 h *post mortem* en bovinos Brangus machos castrados y no castrados sacrificados a los 16 meses o 20 meses de edad

Edad de sacrificio		M16		M20		EEM	Significancia
Categoría de sexo		MC	MNC	MC	MNC		
pH	TM						
	2	6.28 ^a	6.35 ^a	6.18 ^b	6.18 ^b	0.02	ES **: TM ***, ES x TM: **
	5	5.81	5.84	5.97	5.91		
	8	5.69	5.67	5.78	5.72		
	14	5.56	5.54	5.62	5.65		
	26	5.43	5.45	5.55	5.61		
Temperatura	2	23.23 ^A	22.43 ^B	23.65 ^A	23.10 ^B	0.12	S: ***, ES: ***, TM: ***, ES x TM: **
	5	15.38 ^{Aa}	14.15 ^{Ba}	17.49 ^{Ab}	16.39 ^{Bb}		
	8	8.96 ^{Aa}	6.88 ^{Ba}	13.86 ^{Ab}	12.24 ^{Bb}		
	14	3.97 ^{Aa}	2.43 ^{Ba}	8.25 ^{Ab}	7.45 ^{Bb}		
	26	3.74 ^A	3.69 ^B	2.79 ^A	2.59 ^B		

M16= machos sacrificados a los 16 meses; M20= machos sacrificados a los 20 meses; MNC= machos no castrados; MC= machos castrados; TM= tiempo de medición; EEM= error estándar de la media; S= categoría de sexo; ES= edad de sacrificio. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$. ns: $P > 0.05$

No se describen efectos no significativos ($P > 0.1$).

Letras mayúsculas diferentes indican diferencias entre S y ES.

Letras diferentes indican diferencias entre ES y MP.

Fuerza de Cizalla de Warner-Bratzler, variables de glucólisis y color de la carne

La FCWB del músculo LT se vio afectada por los dos efectos principales evaluados ($P < 0.05$), pero por ninguna de sus interacciones ($P > 0.05$; Cuadro 3). La FCWB fue 9 % menor en MC que en MNC, 7 % mayor en M16 que en M20 y 36 % mayor con 2 días que con 14 días de maduración *post mortem*. Por el contrario, la FCWB de ST se vio afectada solo por el período de maduración, disminuyendo un 12 % de 2 a 14 días.

Cuadro 3: Efecto de la categoría de sexo y la edad de sacrificio sobre las características (color y FCWB) de los músculos *Longissimus thoracis* (LT) y *semitendinoso* (ST) de bovinos Brangus

Edad de sacrificio	M16				M20				EEM	Significancia
	MC		MNC		MC		MNC			
Categoría de sexo	MC		MNC		MC		MNC			
MP	2 días	14 días	2 días	14 días	2 días	14 días	2 días	14 días		
LT FCWB (N)	42.43 ^{wx}	30.91 ^{yz}	44.32 ^w	32.67 ^{yz}	37.59 ^{xy}	27.48 ^z	43.40 ^{wx}	31.91 ^{yz}	1.00	S*, ES*, MP***
Color										
L*	43.45 ^{Aa}	42.68 ^{Aab}	42.25 ^{ABa}	41.52 ^{ABab}	40.52 ^{Bb}	41.95 ^{Bab}	41.73 ^{ABb}	42.24 ^{ABab}	0.19	ES*, S x ES*, ES x MP*
a*	22.52	21.85	21.72	22.35	21.58	22.82	21.22	21.91	0.14	
b*	15.71 ^a	14.73 ^{ab}	14.86 ^a	14.73 ^{ab}	14.25 ^b	15.09 ^{ab}	14.36 ^b	14.45 ^{ab}	0.10	ES*, ES x MP*
ST FCWB (N)	42.15 ^{wx}	36.99 ^y	44.75 ^w	38.17 ^{xy}	43.43 ^w	38.42 ^{xy}	43.06 ^w	40.76 ^{wxy}	1.06	MP***
Color										
L*	49.17 ^A	45.29 ^A	47.87 ^A	45.03 ^A	46.48 ^B	42.20 ^B	48.53 ^A	43.56 ^A	0.35	ES**, MP***, S x ES*
a*	14.17 ^c	18.30 ^a	14.06 ^c	18.35 ^a	18.05 ^a	17.67 ^c	15.41 ^a	17.24 ^c	0.28	MP***, ES x MP***
b*	20.29 ^b	19.53 ^b	20.03 ^b	19.49 ^b	22.19 ^a	18.33 ^c	21.16 ^a	18.43 ^c	0.21	MP***, ES x MP***

M16= machos sacrificados a los 16 meses; M20= machos sacrificados a los 20 meses; MNC= machos no castrados; MC= machos castrados; MP= período de maduración *post mortem*; EEM= error estándar de la media; FCWB= Fuerza de Cizalla de Warner-Bratzler; L* (luminosidad), a* (índice rojo) y b* (índice amarillo); S= categoría de sexo; ES= edad de sacrificio. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; ns: $P > 0.05$.

No se describen efectos no significativos ($P > 0.1$).

^{w, x, y} Las medias de LS con superíndices diferentes dentro de una fila son diferentes ($P < 0.05$).

Letras mayúsculas diferentes indican diferencias entre S y ES.

Letras diferentes indican diferencias entre ES y MP.

Ni la grasa intramuscular del músculo LT (GIM) ni la longitud del sarcómero (LS) ni el índice de fragmentación miofibrilar (IFM) se vieron afectados por los tratamientos ($P>0.05$, Cuadro 4). El contenido de colágeno total (CT) de LT fue menor ($P<0.01$) pero la proporción del contenido de colágeno soluble (CS) fue mayor ($P<0.001$) en MC que en MNC. En el músculo LT, la proporción de CS se redujo (39 %) con el aumento de la edad de sacrificio ($P<0.001$). La concentración de glucógeno del músculo LT fue 5 % mayor en M20 que en M16 ($P<0.05$). La FCWB de LT se asoció positivamente con el contenido de colágeno total ($r= 0.54$; $P<0.01$) y negativamente con el índice de fragmentación miofibrilar ($r= -0.39$; $P<0.05$).

Al igual que en el LT, el contenido de CT del músculo ST fue menor ($P<0.05$) en MC que en MNC. El músculo ST de MC tuvo mayor longitud de sarcómero que el de MNC ($P<0.001$). La GIM del músculo ST fue mayor en M16 que en M20 ($P<0.05$), pero no se observaron efectos entre las categorías de sexo ($P>0.05$). La FCWB de ST se asoció positivamente con el contenido de colágeno total ($r= 0.61$; $P<0.05$).

La luminosidad (L^*) del músculo LT se vio afectada ($P<0.05$; Cuadro 2) por la interacción S x ES o por la interacción de edad de sacrificio x periodo de maduración *post mortem* (ES x MP). La L^* más alta en LT se observó en MC-M16, y la más baja en MC-M20, siendo la L^* de MNC intermedia y similar entre M16 y M20. Además, las L^* y b^* del LT fueron mayores para los filetes M16 madurados durante 2 días que para los de M20 madurados también durante 2 días, mientras que los filetes de M16 y M20 madurados durante 14 días presentaron valores intermedios, sin diferencias con los de M20 madurados durante 2 días ($P<0.05$; Cuadro 3).

Por el contrario, la L^* de los músculos ST fue menor en MC-M20 ($P<0.05$). A su vez, las a^* y b^* del músculo ST se vieron afectadas por la interacción entre la edad de sacrificio y el período de maduración. La a^* del músculo ST fue mayor para M16 madurado durante 14 días que para M20 madurado durante 2 días, siendo intermedio para M20 madurado durante 14 días, mientras que el músculo ST de M16 madurado durante 2 días tuvo la menor a^* ($P<0.001$, Cuadro 2). La b^* del músculo ST fue mayor para la carne M20 madurada durante 2 días y menor para la carne M20 madurada durante 14 días ($P<0.001$), siendo intermedia para la carne M16 madurada durante 2 y 14 días.

Cuadro 4: Efecto de la categoría de sexo y la edad de sacrificio sobre las características de calidad de la carne de los músculos *Longissimus thoracis* y *semitendinoso* de bovinos Brangus

Músculo	M16		M20		EEM	Significancia			
	MC	MNC	MC	MNC		S	ES	S X ES	
LT	Longitud del sarcómero, μm	2.00	2.07	1.96	2.01	0.02	ns	ns	ns
	Grasa intramuscular (g de lípidos ⁻¹ de tejido fresco)	2.82	2.22	2.49	1.94	0.17	ns	ns	ns
	Colágeno total (mg ⁻¹ de tejido fresco)	2.13 ^b	2.82 ^a	2.36 ^{ab}	2.92 ^a	0.12	**	ns	ns
	Colágeno soluble (proporción de colágeno total encontrado como colágeno soluble, %)	20.68 ^a	14.18 ^b	14.57 ^b	7.40 ^c	1.19	***	***	ns
	Glucógeno (g ⁻¹ de tejido fresco, μmol de glucosa)	103.35 ^{ab}	89.26 ^b	111.04 ^{ab}	115.82 ^a	4.34	ns	*	ns
	Índice de fragmentación miofibrilar	82.08	78.83	87.74	82.66	2.48	ns	ns	ns
ST	Longitud del sarcómero, μm	2.26 ^a	2.13 ^b	2.19 ^{ab}	2.07 ^b	0.05	***	ns	ns
	Grasa intramuscular (g de lípidos ⁻¹ de tejido fresco)	3.80 ^{ab}	4.04 ^a	3.03 ^{ab}	2.43 ^b	0.50	ns	*	ns
	Colágeno total (mg ⁻¹ de tejido fresco)	4.09 ^b	4.90 ^a	4.75 ^a	5.01 ^a	0.22	*	ns	ns
	Colágeno soluble (proporción de colágeno total encontrado como colágeno soluble, %)	6.59	5.24	5.35	5.45	0.33	ns	ns	ns
	Glucógeno (g ⁻¹ de tejido fresco, μmol de glucosa)	97.97	112.14	92.04	94.98	3.14	ns	ns	ns
	Índice de fragmentación miofibrilar	81.21	71.34	89.03	84.53	2.57	ns	ns	ns

M16= machos sacrificados a los 16 meses; M20= machos sacrificados a los 20 meses; MC= machos castrados; MNC= machos no castrados; EEM= error estándar de la media; S= categoría de sexo; ES= edad de sacrificio; S x ES= interacción entre la categoría de sexo y la edad de sacrificio; LT: *Longissimus thoracis*; ST: *semitendinoso*.

^{a b c} Las medias de LS con superíndices diferentes dentro de una fila son estadísticamente diferentes ($P < 0.05$). *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; ns= $P > 0.1$

Discusión

El ensayo reveló un resultado esperado, ya que los animales no castrados exhibieron mayores incrementos tanto en el peso vivo como en el peso de la canal caliente que los castrados a edades mayores⁽²³⁾. Esto se puede atribuir a los niveles más altos de testosterona observados en los animales no castrados, que también se reflejaron en sus áreas del ojo de costilla más grandes. La ausencia de variaciones en el rendimiento a la canal, ajustado por el peso vivo, entre los tratamientos puede atribuirse a la falta de disparidades en el grosor de la grasa dorsal a través de las diferentes edades. Además, las diferencias observadas entre animales castrados y no castrados en GGD no fueron lo suficientemente significativas como para explicar una variación significativa en el rendimiento a la canal. Estos hallazgos son consistentes con las conclusiones extraídas por otros investigadores que han realizado estudios similares^(23,24).

El estudio reveló que las variaciones en el área del ojo de la costilla y en el grosor de la grasa dorsal entre las diferentes categorías de sexo tuvieron un impacto en la disminución de la temperatura del músculo LT⁽²⁵⁾. No obstante, a pesar de las menores temperaturas observadas en los animales no castrados, no se encontraron diferencias en la longitud del sarcómero entre las categorías de sexo en el músculo LT. Además, a pesar de que hubo diferencias en la longitud del sarcómero en el músculo ST entre las categorías de sexo, el temp@pH6 se mantuvo por encima de 12 °C para ambas categorías de sexo, el cual fue sugerido como el umbral mínimo para evitar el acortamiento y endurecimiento de la carne^(4,26), de acuerdo con registros anteriores⁽²⁾.

La castración de los machos Brangus llevó a una reducción de la FCWB para los filetes de LT, como reportan otros autores^(2,5,27). Este resultado estuvo en consonancia con el menor contenido de CT, así como con el mayor contenido de CS observado en el músculo LT de MC que en el de MNC. Este contenido diferente de CT y CS podría ser atribuido a un menor nivel de testosterona en los bovinos castrados que en los no castrados⁽⁸⁾.

Madurar los músculos durante 14 días en lugar de 2 días resultó en una mayor mejoría en la FCWB para el músculo LT⁽⁵⁾. Se sabe que el músculo LT está altamente influenciado por la degradación de las miofibrillas⁽²⁸⁾. La asociación entre IFM y CT con FCWB sugiere que, a los 2 días, las diferencias en FCWB en el músculo LT se asociaron con diferencias en la actividad proteolítica; sin embargo, a los 14 días, la correlación existente con el CT indicaría que las diferencias en la actividad proteolítica ya no tendrían efecto, es decir, la proteólisis podría haber sido completada, por lo que las diferencias en la FCWB se deberían a diferencias en el contenido conectivo^(5,29).

En el presente estudio, los tratamientos de castración y sacrificio no afectaron los valores de FCWB para filetes de ST⁽⁵⁾. Esto podría deberse al alto contenido de CT de este músculo en

comparación con otros músculos y a la correlación positiva encontrada entre el contenido de CT y la FCWB del músculo ST. Se ha propuesto^(5,9) que el contenido de colágeno sería el principal factor que afecta la terneza de la carne y que podría enmascarar cualquier mejora potencial debido a otros efectos.

En el presente estudio, en concordancia con los hallazgos reportados por otros autores^(1,7), la mayor L* en ambos músculos observada en los animales castrados más jóvenes se relacionó con la menor disminución de pH y temperatura de los primeros⁽²⁸⁾ y, probablemente, con el incremento del contenido de mioglobina con la edad y la testosterona⁽²⁹⁾. Por otro lado, la ausencia de variación en las variables de color del músculo LT madurado en animales de mayor edad podría ser atribuida al aumento de los valores de los parámetros de color debido al maduración *post mortem*, lo que podría reducir las diferencias entre los tratamientos de los animales⁽³⁰⁾. En el caso de muestras no maduras del músculo ST, los mayores niveles de amarillez y rojez observados en animales de mayor edad⁽²⁹⁾ pueden ser atribuidos a la acumulación de pigmentos de mioglobina a medida que avanza la edad^(31,32). Además, este fenómeno también puede estar influenciado por los mayores valores de pH observados en M20⁽³¹⁾. No obstante, a los 14 días, como consecuencia de la maduración *post mortem* y de la disminución de la estabilidad del color⁽³³⁾, estas diferencias no se observaron, excepto para b* en M16, que fue apenas 5 % mayor que en M20. Esto último podría estar asociado a un mayor contenido de metmioglobina en la carne madurada M16⁽³⁰⁾.

Dado que los sementales son más susceptibles al estrés previo al sacrificio que los novillos, sus probabilidades de producir carne con mayor pHf y carne oscura también son mayores⁽³⁴⁾. En el presente estudio, el pHf de los sementales fue ligeramente superior al de los novillos, pero no se observó carne oscura; el pHf estuvo dentro del rango óptimo⁽³¹⁾ (5.4 a 5.7).

Conclusiones e implicaciones

Independientemente de la edad en el momento del sacrificio, el sacrificio de machos no castrados resultó en un aumento del peso de la canal caliente y de las áreas del ojo de la costilla. Sin embargo, el grosor de la grasa dorsal disminuyó en comparación con los machos castrados. Independientemente del manejo de la castración o de la edad al sacrificio, el rendimiento a la canal no se vio afectado. Los efectos de la castración y la edad de sacrificio de los machos Brangus sobre las características de calidad de la carne difieren en los diferentes músculos evaluados. Los músculos con alta cantidad de tejido conectivo como ST no generaron diferencias en FCWB, independientemente de los tratamientos. Por el contrario, los músculos con baja cantidad de tejido conectivo como LT se vieron afectados por la castración y la edad de sacrificio asociados con el pHf, el índice de fragmentación miofibrilar, el contenido de colágeno total y de colágeno soluble. La castración produjo colores más claros en ambos músculos asociados al contenido de pHf y mioglobina.

Agradecimientos y conflicto de intereses

Este trabajo forma parte de la Tesis Doctoral del autor principal en el Programa de Posgrado en Ciencias Agrarias de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina. Esta investigación fue financiada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina y el Consejo de Investigación de la Universidad Católica de Salta, Argentina (UCASAL) (RR N° 694/2012, 1294/2015). Este proyecto de investigación también contó con el apoyo de Bermejo SA y San Pablo Alberdi SA, provincia de Salta, Argentina. Certificamos que no existe conflicto de intereses.

Literatura citada:

- 1-Marti S, Realini CE, Bach A, Perez–Juan M, Devant M. Effect of castration and slaughter age on performance, carcass, and meat quality traits of Holstein calves fed a high-concentrate diet. *J Anim Sci* 2013;(91):1129–114.
- 2-Silva LHP, Rodrigues RTS, Assis DEF, Benedetti PDB, Duarte MS, Chizzotti ML. Explaining meat quality of bulls and steers by differential proteome and phosphoproteome analysis of skeletal muscle. *J Proteom* 2019;(199):51–66.
- 3- Steen RWJ. The effect of plane nutrition and slaughter weight on growth and food efficiency in bulls, steers and heifers of three breed crosses. *Livest Prod Sci* 1995;(42): 1-11
- 4-Page JK, Wulf DM, Schwotzer TR. A survey of beef muscle color and Ph. *J Anim Sci* 2001;79(3):678-87.
- 5-Rodríguez J, Unruh J, Villarreal M, Murillo O, Rojas S, Camacho J. Carcass and meat quality characteristics of Brahman cross Bulls and steers finished on tropical pastures in Costa Rica. *Meat Sci* 2014;(96):1340–1344.
- 6-Weston AR, Rogers PRW, Althen TG. Review: the role of collagen in meat tenderness. *Prof Anim Sci* 2002;18(2):107-111.
- 7-Nian Y, Kerry JP, Prendiville R, Allen P. The eating quality of beef from young dairy bulls derived from two breed types at three ages from two different production systems. *Irish J Agric Food Res* 2018;56(1):31-44.
- 8-Sadowska A, Swiderski F, Rakowska R, Nogalski Z. The quality of steer and bull meat obtained by crossing Holstein – Friesian cows with Charolais bulls. *Pak J Agr Sci* 2017;(54):899-905.
- 9-Rhee MS, Wheeler TL, Shackelford SD, Koohmaraie M. Variation in palatability and biochemical traits within and among eleven beef muscles. *J Anim Sci* 2004;82(2):534–550.

- 10-Starkey CP, Geesink GH, Oddy VH, Hopkins DL. Explaining the variation in lamb *longissimus* shear force across and within ageing periods using protein degradation, sarcomere length and collagen characteristics. *Meat Sci* 2015;(105):32–37.
- 11-Mazzucco JP, Melucci LM, Villarreal EL, Mezzadra CA, Corva P, Motter MM, *et al.* Effect of ageing and μ -calpain markers on meat quality from Brangus steers finished on pasture. *Meat Sci* 2010;(86):878–882.
- 12-dos Santos MD, de Almeida Rego FC, da Silva JM, Costa DS, de Souza CN, Santana JL. Rendimento e acabamento da carcaça de novilhos inteiros e castrados da raça Brangus terminados em confinamento. *Rev Bras Hig San Anim* 2014;8(3):62–71.
- 13-Elzo MA, Johnson DD, Wasdin JD. Driver Carcass and meat palatability breed differences and heterosis effects in an Angus–Brahman multibreed population. *Meat Sci* 2012;(90):87–92.
- 14-Seenger J, Nuernberg G, Hartung M, Szucs E, Ender K, Nuernberg K. ANKOM – a new instrument for the determination of fat in muscle and meat cuts – a comparison. *Arch Tierz Dummerstorf* 2008;51(5):449-457.
- 15-Warner–Bratzler shear-force American Meat Science Association (AMSA). 1995.
- 16-Bergman I, Loxley R. Two improved and simplified methods for the spectrophotometric determination of hydroxyproline. *Ann Chem* 1963;(35):1961–1965.
- 17-Hill HF. The solubility of intramuscular collagen content in meat animals of various ages. *Food Sci* 1966;(31):161–166.
- 18-Cross HR, West RL, Dutson TR. Comparison of methods for measuring sarcomere length in beef muscle. *Meat Sci* 1981;(5):261-266.
- 19-Monin G, Sellier P. Pork of low technological quality with a normal rate of muscle pH fall in the immediate *postmortem* period: The case of the Hampshire breed. *Meat Sci* 1985;(13):49-63.
- 20-Pighin DG, Davies P, Grigioni G, Pazos AA, Ceconi I, Mendez D, Buffarini M, Sancho A, Gonzalez CB. Effect of slaughter handling conditions and animal temperament on bovine meat quality markers. *Arch Zootec* 2013;(62):399–404.
- 21-Neath KE, Del Barrio AN, Lapitan RM, Herrera JRV, Cruz LC, Fujihara T, Muroya S, Chikuni K, Hirabayashi M, Kanai Y. Difference in tenderness and pH decline between water buffalo meat and beef during *post-mortem* ageing. *Meat Sci* 2007;(75):499–505.
- 22-Hopkins DL, Martin L, Gilmour AR. The impact of homogenizer type and speed on the determination of myofibrillar fragmentation. *Meat Sci* 2004;(67):705-710.

- 23- Kuss F, López J, Jardim-Barcellos JO, Restle J, Moletta LJ, Perotto D. Características da carcaça de novilhos não-castrados ou castrados terminados em confinamento e abatidos aos 16 ou 26 meses de idade. R Bras Zootec 2009;38(3):515-522.
- 24- Restle J, Vaz FN. Eficiência e qualidade na produção de carne bovina. In: Reuniao Annual da Sociedade Bras de Zootec. Santa Maria. 2003:40.
- 25- Aalhus JL, Janz JAM, Tong AKW, Jones SDM, Robertson WM. The influence of chilling rate and fat cover on beef quality. Can J Anim Sci 2001;8(3):321-330.
- 26- Battaglia C, Vilella GF, Bernardo APS, Gomes CL, Biase AG, Albertini TZ, Pflanzler SB. Comparison of methods for measuring shear force and sarcomere length and their relationship with sensorial tenderness of *longissimus* muscle in beef. J Texture Stud 2019;(51):252–262.
- 27- Fitzpatrick LA. Growth and meat quality of grain finished entire male *Bos indicus* cattle. Project code: B.NBP.0486. M & Liv Austr Lim, North Sydney, Australia; 2014.
- 28- Koohmaraie M, Matthew PK, Shackelford SD, Veiseth E, Wheeler TL. Meat tenderness and muscle growth: is there any relationship? Meat Sci 2002;(62):345–352.
- 29- Wright SA, Ramos P, Johnson DD, Scheffler JM, Elzo MA, Mateescu RG, Bass AL, Carr CC, Scheffler TL. Brahman genetics influence muscle fiber properties, protein degradation, and tenderness in an Angus-Brahman multibreed herd. Meat Sci 2017;(135):84-93.
- 30- Gil M, Serra X, Gispert M, Angels OM, Sañudo C, Panea B, *et al.* The effect of breed-production systems on the myosin heavy chain 1, the biochemical characteristics and the color variables of *longissimus thoracis* from seven Spanish beef cattle breeds. Meat Sci 2001;(58):181–188.
- 31- Ijaz M, Jaspal MH, Hayat Z, Yar MK, Badar IH, Ullah S, *et al.* Effect of animal age, *postmortem* chilling rate, and aging time on meat quality attributes of water buffalo and humped cattle bulls. Anim Sci J 2020;(91):e13354.
- 32- Hughes JM, Clarke FM, Purslow PP, Warner RD. Meat color is determined not only by chromatic heme pigments but also by the physical structure and achromatic light scattering properties of the muscle. Compr Rev Food Sci Food Saf 2019;(19):44–63.
- 33- Oliete B, Moreno T, Carballo JA, Varela A, Monserrat L, Sánchez L. Influence of ageing time on the quality of yearling calf meat under vacuum. Eur Food Res Technol 2005;(20):489–493.

- 34-Duarte MS, Paulino PVR, Fonseca MA, Diniz LL, Cavali J, Serão NVL, *et al.* Influence of dental carcass maturity on carcass traits and meat quality of Nellore bulls. *Meat Sci* 2011;(88):441–446.