

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**SISTEMA ANTIOXIDANTE EN LA CARNE BOVINA DE DIFERENTES
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN:
UN ABORDAJE A LA GENERACIÓN DE NUEVOS BIOMARCADORES DE
CALIDAD**

por

**Magdalena CLAVIJO LARRAÑAGA
Antonella Natalí ADDESSO TELIZ**

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2026**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Directora:

(Dra.) María Cristina Cabrera

Tribunal:

(Dra.) María Cristina Cabrera

(Dra.) Cecilia Carballo

(Dra.) Laura Raggio

Fecha:

20 de mayo de 2026

Estudiantes:

Magdalena Clavijo Larrañaga

Antonella Natalí Adesso Teliz

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente a nuestras familias y amigos por el acompañamiento a lo largo de todo este proceso.

A nuestra tutora Dra. María Cristina Cabrera y a todo su equipo, por su compromiso, dedicación y ayuda en este trabajo.

Al personal de biblioteca de Facultad de Agronomía, por su disposición y por toda la información proporcionada.

Al Frigorífico Matadero Pando por el material brindado, el cual permitió realizar el presente trabajo.

A todos ellos, muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	7
RESUMEN.....	8
SUMMARY	10
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Importancia económica de la carne bovina.....	12
1.2. La carne como alimento.....	14
1.2.1. Transformación del músculo en carne.....	15
1.3. Calidad de la carne	16
1.3.1. Atributos fisicoquímicos de la carne en el <i>post mortem</i>	17
1.3.2. Composición química del músculo y de la carne en el <i>post mortem</i>	18
1.3.3. Composición nutricional y su importancia en el <i>post mortem</i>	19
1.4. Sistema antioxidante.....	23
1.4.1. Procesos de oxidación de la carne.....	23
1.4.2. Sistema antioxidante	23
1.4.3. Influencia del sistema de producción, tipo de músculo y maduración sobre el sistema antioxidante de la carne	24
1.5. Objetivos	25
1.5.1. Objetivo general.....	25
1.5.2. Objetivos específicos.....	25
1.6. Hipótesis.....	26
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
2.1. Animales y dietas	27
2.2. Preparación de muestras de carne.....	27
2.3. Medición de pH.....	28
2.4. Medición de color.....	28
2.5. Determinación del contenido de materia seca y cenizas.....	28
2.6. Determinación del contenido de elementos traza, Fe total, Zn, Cu y Mn	29
2.7. Determinación de hierro heme	29
2.8. Determinación de glucógeno.....	30

2.9. Análisis estadístico	30
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
3.1. pH	31
3.2. Color	31
3.3. Materia Seca.....	33
3.4. Contenido de Zinc, Cobre y Manganeso.....	35
3.4.1. Análisis del contenido de Zinc.....	37
3.4.2. Análisis del contenido de Cobre	37
3.4.3. Análisis del contenido de Manganeso	38
3.5. Contenido de Hierro y Hierro hemínico	38
3.5.1. Análisis del hierro total	39
3.5.2. Análisis del Hierro hemínico (Fe heme)	40
3.6. Contenido de glucógeno residual	40
3.7. Interacciones entre el contenido de hierro hemínico, glucógeno y el color con el sistema de producción, tipo de músculo y tiempo de maduración.....	41
4. CONCLUSIONES	44
4.1. Discusiones finales	45
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla n.

Tabla 1 <i>Efecto del sistema productivo y músculo en el pH de carne en el día 0</i>	31
Tabla 2 <i>Efecto del sistema productivo, músculo y maduración en el color de la carne.</i>	32
Tabla 3 <i>Efecto del sistema productivo, músculo y maduración del contenido de materia seca de la carne</i>	34
Tabla 4 <i>Efecto del sistema productivo, músculo y maduración en minerales traza de la carne</i>	36
Tabla 5 <i>Efecto del sistema productivo, músculo y maduración en hierro y hierro heme de la carne</i>	39
Tabla 6 <i>Efecto del sistema productivo, músculo y maduración en el contenido de glucógeno de la carne</i>	41

Figura n.

Figura 1 <i>Fotografía y ubicación anatómica del bife angosto</i>	27
Figura 2 <i>Fotografía y ubicación anatómica de nalga de adentro sin tapa</i>	28
Figura 3 <i>Contenido de hierro hemo (mg/kg de carne) y glucógeno (μM/g de carne) en los músculos</i>	42
Figura 4 <i>Parámetros de color (L^*, a^*, b^*) en los músculos LD y SM</i>	43

RESUMEN

En Uruguay, la producción de carne bovina tiene gran importancia económica. Los sistemas productivos van desde uso exclusivo de pasturas, sistema pastoril con suplementación, encierro y uso de concentrados, generando carnes con diferentes atributos de interés nutricional. La carne es un alimento completo en la dieta humana y de alta calidad nutricional, por sus proteínas de alto valor biológico, vitaminas, ácidos grasos y minerales esenciales de alta biodisponibilidad, destacándose el hierro hemínico. Estos pueden variar con el sistema productivo y el proceso de maduración post mortem incidiendo en la calidad de la carne. El glucógeno muscular, en relación con la estabilidad del hierro y cambios de la mioglobina impactarían en el color a través de la maduración. El objetivo del trabajo fue estudiar los componentes fisicoquímicos y nutricionales y sus cambios en el proceso de maduración larga de la carne bovina, provenientes de sistema pastoril y sistema feedlot, en dos tipos de músculos y su relación entre ellos como biomarcadores del potencial de defensa de la carne durante el procesamiento. Se analizaron las muestras de carne de 30 novillos Aberdeen Angus. 15 animales fueron criados y terminados en sistema pastoril y 15 fueron terminados en sistema feedlot. Luego de la faena, a las 36 horas post mortem, se extrajeron los cortes de los músculos Longissimus dorsi (LD) y Semimembranosus (SM). Una porción se congeló sin madurar y la otra se puso a madurar durante 60 días al vacío. Se midieron y determinaron los siguientes parámetros pH, color, materia seca, Hierro, Hierro hemínico, Zinc, Cobre, Manganeso y glucógeno. Los datos se evaluaron mediante una ANOVA GLM y de haber diferencias significativas se realizó un Test de Tukey-Kramer ($p < 0,05$ %) y mediante ANOVA de una vía comparando tiempo de maduración para cada músculo en cada sistema. En función de los resultados, se puede afirmar que la composición nutricional y los parámetros fisicoquímicos están influenciados por el sistema de producción, tipo de músculo y proceso de maduración. Los músculos presentaron diferencias en hierro hemo, luminosidad y glucógeno. El músculo SM presenta mayor contenido de hierro heme y enrojecimiento, menores reservas de glucógeno y mayor pH final, no presentándose diferencias al día 0, pero sí al día 60. En relación a los sistemas de producción, los resultados reflejan diferencias significativas, el sistema feedlot presentó mayores valores de luminosidad (L^*), a^* y b^* . El sistema pastoril mostró mayores valores de Fe, Fe heme y Zn, mientras que Mn fue mayor en feedlot. En la maduración a 60 días, disminuye el Fe, Fe heme, Mn, Zn, color y glucógeno en SM, en algunos casos asociados al sistema

pastoril. El músculo LD fue más estable en color y Fe heme en la maduración, probablemente en relación a su menor variación en contenido de glucógeno, demostrando un mejor potencial de defensa ante el proceso oxidativo. La estabilidad del color en procesos largos de maduración depende del contenido de Fe inicial y glucógeno, asociado al músculo, y al sistema productivo, lo cual sería un potencial biomarcador de calidad.

Palabras clave: carne, calidad, hierro, glucógeno, maduración

SUMMARY

In Uruguay, beef production is of great economic importance. Production systems range from exclusive use of pastures, pastoral systems with supplementation, confinement and use of concentrates, generating meats with different attributes of nutritional interest. Meat is a complete food in the human diet and of high nutritional quality, due to its high biological value proteins, vitamins, fatty acids and essential minerals of high bioavailability, highlighting heme iron. These can vary with the production system and the post mortem maturation, affecting the quality of the meat. Muscle glycogen, in relation to the stability of iron and changes in myoglobin, would impact the color through maturation. The objective of the work was to study the physicochemical and nutritional components and their changes in long maturation process of beef, from pastoral and feedlot systems, in two types of muscles and their relationship between them as biomarkers of the defense potential of the meat during processing. Meat samples from 30 Aberdeen Angus steers were analyzed, 15 animals were raised and finished in a pastoral system and 15 were finished in a feedlot system. After slaughter, 36 hours post mortem, the cuts of the Longissimus dorsi (LD) and Semimembranosus (SM) muscles were extracted. One portion was frozen without maturing and the other was matured for 60 days in vacuum. The following parameters were measured and determined: pH, color, dry matter, iron, Heme iron, Zinc, Copper, Manganese and glycogen. The data were evaluated using an ANOVA GLM and if there were significant differences, a Tukey-Kramer Test ($p < 0.05$ %) was performed and by ANOVA of one way comparing maturation time for each muscle in each system. Based on the results, it can be stated that the nutritional composition and physicochemical parameters are influenced by the production system, muscle type and maturation process. The muscles presented differences in heme iron, luminosity and glycogen. The SM muscle has a higher content of heme iron and redness, lower glycogen reserves and higher final pH, with no differences at day 0, but yes at day 60. In relation to the production systems, the results reflect significant differences, the feedlot system presented higher values of heme iron, iron, zinc, while Mn was higher in feedlot. In the 60-day maturation, Fe, heme iron, Mn, Zn, color and glycogen decrease in SM, in some cases associated with the pastoral system. The LD muscle was more stable in color and Fe, heme iron content, probably in relation to its lower variation in glycogen content, demonstrating a better defense potential against the oxidative process. The stability of color in long maturation processes depends on the initial Fe and glycogen

content, associated with the muscle and the production system, which would be a potential quality biomarker.

Keywords: meat, quality, iron, glycogen, maturation

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Importancia económica de la carne bovina

En el consumo y producción de carne bovina a nivel mundial, se espera un aumento, impulsado por el crecimiento de la población, mejor nivel económico y mejoras en los sistemas de producción. En este contexto, también se espera un crecimiento de la población ganadera, con una estimación de cerca de 2 000 millones de cabezas de ganado bovino. Se espera que el consumo de carne de vacuno alcance los 81 millones de toneladas en peso canal, proyectándose un incremento del 11 % hacia el año 2033 (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE] & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2024).

Uruguay presenta una situación particular en el contexto global. Se trata de un país pequeño, con una marcada especialización en la producción ganadera, basada en una favorable disponibilidad de recursos naturales y con un claro enfoque hacia la exportación, como consecuencia del reducido tamaño de su mercado interno (Caputi & Méndez, 2010). Según Uruguay XXI (2023), la ganadería constituye uno de los ejes centrales del sector agropecuario uruguayo, con una participación en el Producto Bruto Interno que se sitúa entre el 14 % y el 16 %. Más allá de su aporte directo, impulsa efectos positivos en otros sectores, a través de encadenamientos productivos hacia atrás (incrementando la demanda de servicios como transporte, almacenamiento, provisión de insumos y telecomunicaciones) y hacia adelante, dado que una proporción significativa de la producción agroindustrial nacional se utiliza como insumo en otras industrias (Uruguay XXI, 2024). El país se posiciona como el sexto exportador mundial de carne bovina congelada y el decimoséptimo en carne bovina refrigerada (Uruguay XXI, 2023), siendo este producto el principal rubro de exportación del país, representando un 23 % de las exportaciones (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2024).

Según DIEA (2024), la ganadería ocupa el 40 % de la superficie total del país. Las existencias ganaderas alcanzan los 11,9 millones de vacunos y la producción anual se estima en 1.188.000 toneladas de carne vacuna. En cuanto al consumo per cápita, registra un promedio de 45,3 kg por habitante al año (DIEA, 2024), con un 48,3 %, el consumo es superior al de las demás especies cárnicas (Instituto Nacional de Carnes [INAC], 2024). La actividad de faena alcanza los 2.399.000 vacunos anualmente (DIEA, 2024).

Uruguay tiene uno de los mejores estatus mundiales en sanidad animal, es libre de encefalopatía espongiforme bovina (EEB) y también de fiebre aftosa. Además, es reconocido por producción de carne natural, por no suministrar hormonas. Otro punto a destacar, es la trazabilidad sanitaria (Fratti, 2016). Esta herramienta garantiza la transparencia y calidad del producto, es obligatoria y abarca todo el rodeo bovino, permite rastrear la información del animal desde su nacimiento hasta su llegada al consumidor final. Esto permite garantizar y certificar la calidad e inocuidad de los alimentos, lo cual ha sido ampliamente valorado por los mercados internacionales de mayor exigencia y ha contribuido a consolidar a Uruguay como un referente a nivel global en los sistemas de trazabilidad aplicados a los productos cárnicos (Uruguay XXI, 2024).

En cuanto a los sistemas de producción en Uruguay, existen sistemas extensivos e intensivos.

Los sistemas ganaderos extensivos son aquellos que tienen como base de producción las praderas naturales (Uruguay XXI, 2024). Además, las pasturas cultivadas son de gran importancia al representar un elemento muy importante en la alimentación (Fernández et al., 2020). Este tipo de sistema es el más común entre los pequeños y medianos productores del medio rural. En los sistemas extensivos, los animales se alimentan desplazándose libremente por las extensiones mencionadas, permaneciendo la mayor parte del tiempo en estos espacios. Se consideran sistemas ganaderos sostenibles, ya que han perdurado en el tiempo y requieren de una mínima incorporación de recursos externos (Pereira Morales et al., 2011).

Aunque tradicionalmente la industria de la carne uruguaya está basada en el pastoreo directo del campo natural y de las pasturas sembradas (sistemas extensivos), se observa un creciente uso del confinamiento en la fase final del engorde, (feedlot) como parte del sistema de alimentación (Blasina y Asociados, 2025).

Según Simeone et al. (1996) los sistemas de producción intensivos se basan en “alimentar animales que permanecen encerrados en una área restringida y reducida (corral) por un cierto tiempo, con el objetivo de obtener ganancias de peso predeterminadas, lo que implica una restricción casi total de la actividad del pastoreo” (p. 28). Son totalmente artificiales, se crean condiciones en la infraestructura como temperatura, luz y humedad, además se requiere de tecnología, alimentación, mano de obra, implementos y equipos sofisticados (Pereira Morales et al., 2011). Los objetivos del confinamiento son obtener

una alta producción de carne por animal, y alta eficiencia de conversión (kilos de alimento / kilo de carne) (Gil, 2005), incrementando el aporte de energía al animal y mejorar la productividad, reflejándose en un aumento del resultado económico de la actividad ganadera (Simeone et al., 2010). Deben ser eficientes productivamente con el fin de incrementar la producción en el menor tiempo posible; se requieren muchos recursos externos e inversiones económicas para brindar las condiciones necesarias (Pereira Morales et al., 2011).

En Uruguay más del 90 % del ganado para faena pertenece a razas británicas carniceras, Hereford y Aberdeen Angus siendo estas reconocidas en el mundo por sus buenos atributos agronómicos y por la calidad de las carnes que producen (Fratti, 2016). A lo largo del periodo 1980-2019, la raza Hereford se mantiene como la predominante, con una participación variable, evidenciando una leve reducción hacia los años más recientes. La raza Aberdeen Angus presenta un crecimiento sostenido a partir de la década de 1990, consolidándose como la segunda raza más importante (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], s.f.).

1.2. La carne como alimento

Según el *Código de prácticas* (s.f.): “Se define como carne todas las partes de un animal que han sido dictaminadas como inocuas y aptas para el consumo humano o se destinan para este fin” (p. 5).

Para Warriss (2003), la carne es una fuente altamente concentrada de proteína, además ésta tiene un alto valor biológico, debido a que su composición se asemeja a nuestras propias proteínas. Según este autor, contiene todos los aminoácidos esenciales para la salud humana y es también una fuente importante de vitaminas del grupo B, en especial de vitamina B1 (tiamina), niacina (ácido nicotínico), vitamina B2 (riboflavina), vitamina B6 y B12 (cianocobalamina) y vitamina A (retinol). Constituye una fuente de hierro, cobre, zinc y selenio, y se destaca que el hierro de la carne presenta una alta biodisponibilidad, encontrándose como reservorio en el componente proteico de la mioglobina (Warriss, 2003). A continuación, haremos referencia a los cambios que sufre el músculo en la etapa *post mortem*.

1.2.1. Transformación del músculo en carne

Después del sacrificio del animal, comienza el proceso mediante el cual el músculo se convierte en carne. Este cambio es consecuencia de dos transformaciones bioquímicas, la aparición del rigor mortis y el proceso de maduración (Ouali et al., 2006).

Para Huff Lonergan et al. (2010), a medida que el músculo se convierte en carne, se producen cambios. En primer lugar una disminución gradual de la energía disponible, seguido por un cambio de metabolismo aeróbico a anaeróbico que favorece la producción de ácido láctico, lo que provoca una disminución del pH del tejido desde casi la neutralidad hasta 5,4-5,8 (Huff Lonergan et al., 2010). Posteriormente, se da un aumento de la fuerza iónica, en parte debido a la incapacidad de las bombas de calcio, sodio y potasio dependientes de ATP para funcionar y finalmente una creciente incapacidad de la célula para mantener condiciones reductoras (Huff Lonergan et al., 2010).

1.2.1.1. Tipo de músculo

Los músculos están constituidos por tejido muscular esquelético y presentan proporciones variables de los distintos tipos de fibras musculares, las cuales se diferencian en sus características moleculares, metabólicas y estructurales (Choi & Kim, 2009). Además, también difieren en características bioquímicas y biofísicas, como la vía oxidativa y la glucolítica (Schiaffino & Reggiani, 1994). Siguiendo a Karlsson et al. (1999) y Schiaffino y Reggiani (1994), las fibras musculares tipo I presentan un metabolismo predominantemente oxidativo, contracción lenta y bajo contenido de glucógeno. Las fibras tipo IIA son de contracción rápida, con perfil metabólico oxidativo-glucolítico (Karlsson et al., 1999; Schiaffino & Reggiani, 1994). En contraste, las fibras tipo IIB poseen metabolismo principalmente glucolítico, contracción rápida y elevado contenido de glucógeno (Karlsson et al., 1999; Schiaffino & Reggiani, 1994).

Estas variaciones se traducen en diferencias en los atributos de calidad de la carne entre músculos (Klont et al., 1998). En este sentido, estudios previos han evidenciado diferencias en parámetros como la estabilidad del color y la terneza (Franco et al., 2008; Rhee et al., 2004), asociadas al tipo de fibras que los componen, a su función fisiológica y al contenido inicial de hierro (Cabrera et al., 2010).

Por ejemplo, si comparamos dos músculos contrastantes, el *Longissimus dorsi* y el *Semimembranosus*, vemos que el músculo *Longissimus dorsi* (LD), posee predominantemente fibras IIB (Fernandez et al., 1995), es un músculo blanco, que se

caracteriza por poseer baja concentración de mioglobina y su metabolismo es mayoritariamente glucolítico (Cobos & Díaz, 2015; Lefaucheur, 2010). En cambio, el *Semimembranosus* (SM) es un músculo rojo con mayor contenido de mioglobina, mayor proporción de fibras del tipo I, con metabolismo oxidativo (López-Bote, 2017). La inclusión de diferentes músculos en este trabajo de investigación permitirá incorporar esta variable para analizar la homogeneidad de las respuestas estudiadas.

1.2.1.2. Proceso de maduración

El proceso de maduración se da en el periodo comprendido desde el sacrificio del animal hasta que la carne es consumida, se caracteriza por un ablandamiento, lo cual le confiere un aumento de la terneza (atributo sensorial valioso) de la misma. Esto está también relacionado con el proceso de conservación *post mortem*. A temperatura ambiente será rápido, si la carne es refrigerada el proceso es intermedio y si es congelada, se interrumpe el proceso de maduración (Consigli & Aleu, 2022). En este proceso, el aspecto de la carne no cambia, la ruptura de las fibras musculares sucede a nivel microscópico. Las enzimas encargadas de estas rupturas de fibras y enlaces son las catepsinas y el complejo de proteasas, los proteosomas (Feiner, 2018). La maduración clásica de 14 días ha evolucionado a más tiempo, hasta 60 o 120 días como consecuencia de la diversificación de mercados importadores, así como de las condiciones logísticas en el país para ello. Es por tanto una necesidad de generar información durante esta etapa que impacte la calidad de la carne (Luzardo et al., 2023).

1.3. Calidad de la carne

Es el conjunto de características cuya importancia relativa le confiere al producto un mayor grado de aceptación y precio frente a los consumidores (Formento, 2015). Está determinada por la composición química y las propiedades físicas de la carne (pH, color, capacidad de retención de agua, dureza, pérdidas por tratamiento térmico, valor nutricional de las proteínas de la carne, digestibilidad, etc.) (Geletu et al., 2021). Estas características se ven influenciadas por la especie animal, la raza, las características individuales, el sexo, la edad, así como por otros factores como el sistema de producción y el procesamiento de la carne (Geletu et al., 2021). Las características organolépticas o sensoriales de la carne incluyen el color, la terneza, el flavor (sabor y aroma) y la jugosidad. Las características nutricionales comprenden el perfil de ácidos grasos y aminoácidos, y el contenido de proteínas, lípidos, vitaminas y minerales. Por último, las

características tecnológicas se refieren al pH y a la capacidad de retención de agua (CRA) (Geletu et al., 2021).

1.3.1. Atributos fisicoquímicos de la carne en el *post mortem*

1.3.1.1. pH

El pH es un indicador que determina la calidad de la carne. Uno de los cambios más importantes que ocurren después del sacrificio es la acidificación del músculo, proceso fundamental en la conversión del tejido muscular en carne (Warriss, 2003). También afecta la terneza, así como la vida útil del producto luego de la faena. Los rangos normales de pH para la carne bovina son entre 5,4 - 5,8 (Franco et al., 2002).

1.3.1.2. Color

La coloración de la carne está determinada por la concentración de pigmentos mioglobina y hemoglobina, cuyos estados de oxidación determinan tonalidades específicas, fundamentalmente debido a los cambios de forma del hierro (Brewer, 2004). La mioglobina está compuesta por globina y un grupo prostético (hemo) que contiene hierro (Brewer, 2004). La propia estructura de cada músculo, su predominancia en el tipo de fibras y el sistema de producción le confiere un color más o menos atenuado, a la carne (Bekhit et al., 2019).

Además, las propiedades de dispersión de la luz en la carne contribuyen significativamente a la percepción del color por parte del consumidor (Bekhit et al., 2019).

Para Bekhit et al. (2019), el color de la carne está directamente relacionado con el estado químico del hierro presente en la mioglobina. En condiciones de baja presión de oxígeno, como en el interior de la pieza cárnica o en envases al vacío, el átomo de hierro de la mioglobina se encuentra en estado ferroso (Fe^{2+}), formando desoximioglobina. Según los autores, esta forma tiene una molécula de agua unida iónicamente, presenta un color rojo oscuro o púrpura, y muestra una absorción máxima de luz a una longitud de onda de 555 nm. Cuando la carne se expone a un ambiente rico en oxígeno, la desoximioglobina se transforma gradualmente en oximioglobina (MbO_2), una forma más oxigenada que confiere a la carne un color rojo cereza o rosa brillante. Siguiendo a los autores, esta molécula absorbe luz en rangos cercanos a los 542 y 580 nm. El pH también influye en el estado de oxidación del hierro del grupo hemo. A pH elevados, el hierro tiende a

mantenerse en su forma reducida (Fe^{2+}); sin embargo, en medios más ácidos (pH bajos), se favorece su oxidación a hierro férrico (Fe^{3+}), dando lugar a la formación de metamioglobina. Esta última presenta un color marrón o pardo, y tiene picos de absorción característicos a 505 nm y 630 nm (Bekhit et al., 2019). Dado que el color es uno de los principales indicadores de frescura y calidad para el consumidor, desempeña un papel crucial en la decisión de compra (Bekhit et al., 2019). La carne que presenta tonalidades marrones o apagadas suele percibirse como menos fresca, lo que puede llevar al rechazo del producto en el punto de venta (Albertí & Ripoll, 2010).

1.3.1.3. Materia seca y humedad

La materia seca está directamente relacionada con el valor nutricional y la calidad tecnológica de la carne, ya que un mayor contenido de proteína y grasa se asocia con mejores características sensoriales, como jugosidad, terneza y textura, existiendo además una relación inversa entre el contenido de agua y la materia seca (Huff-Lonergan & Lonergan, 2005; Lawrie & Ledward, 2006).

El agua constituye el principal componente de la carne bovina, representando aproximadamente entre el 70 % y el 76 %. Se presenta en forma ligada y en forma libre, las diferencias en la concentración de agua en el tejido muscular se deben al distinto contenido de grasa intramuscular y la edad de los animales, observándose una disminución progresiva a medida que aumenta la edad (Andújar et al., 2009).

1.3.2. Composición química del músculo y de la carne en el *post mortem*

1.3.2.1. Glucógeno

El glucógeno, es el principal polisacárido de reserva energética en animales, almacenando glucosa de forma ramificada en el hígado y músculos. Está formado por un polímero de glucosa con una estructura de cadenas ramificadas relativamente simples y un núcleo proteico denominado glucogenina (Gunja-Smith et al., 1970). Si bien el glucógeno se distribuye de manera extensa en el cuerpo de los mamíferos, las mayores reservas se localizan en el hígado y el músculo (Gardner et al., 2014).

La reserva de glucógeno en el músculo es fundamental para la industria cárnica, ya que actúa como fuente de energía anaeróbica clave en la acidificación *post mortem* del tejido muscular. Si el glucógeno muscular es limitante en el momento del sacrificio, esto puede conducir a una acidificación reducida y un pH final elevado en el músculo, lo que resulta

en el problema de calidad de la carne conocido como corte oscuro (Tarrant, 1981). Suficiente glucógeno en el tejido cárnico es necesario para reducir el pH, si bien la glucólisis *post mortem* también depende fuertemente del tipo de músculo (Immonen et al., 2000).

Un nuevo abordaje en relación al glucógeno es su relación con características de flavor y aceptabilidad de la carne en el proceso de maduración (Frylinck et al., 2013) debido a la liberación de monosacáridos provenientes de la molécula de glucógeno. En este sentido se ha reportado recientemente que existe una correlación positiva entre la concentración inicial de glucógeno del músculo *Longissimus Dorsi* y el incremento de los azúcares residuales provenientes de la glucogenólisis en el *post mortem* (Komatsu et al., 2020) que definirían la calidad de la carne en un nuevo concepto. Por lo cual la cantidad de glucógeno en etapas tempranas del *post mortem* sería un nuevo marcador de la calidad de la carne y reflejaría el efecto de procesos oxidativos previos a la faena (Frylinck et al., 2013), lo cual será parte de la temática de esta tesis.

1.3.3. Composición nutricional y su importancia en el *post mortem*

La carne es rica en minerales, particularmente micro o elementos traza (Cabrera et al., 2010). Para Church (1989), los minerales dietéticamente esenciales son clasificados como macrominerales y microminerales, los macrominerales están normalmente en la carcasa de los animales a niveles superiores a 100 ppm. La función de estos, en el cuerpo es proveer soporte estructural en la forma del esqueleto y también están involucrados en reacciones bioquímicas complejas (Church, 1989), como regulación enzimática, regulación de la presión osmótica y contracción muscular (McAfee et al., 2010). Además, desempeñan un papel fundamental en la calidad de la carne, ya que influyen en diversos procesos biológicos del animal y en características propias de la carne bovina, como el color y la textura (Patel et al., 2019). Las concentraciones se ven afectados por varios factores, como la raza, el sexo, la edad, la dieta, el sistema de manejo de producción, las condiciones ambientales, la ingesta de agua del animal, el tipo de músculo y el procedimiento de cocción (Ramos et al., 2012). Los elementos traza son funcionales y activadores de enzimas antioxidantes y son esenciales a la nutrición humana (Cabrera et al., 2010), en particular hierro, zinc, cobre, manganeso y selenio. Los minerales traza cumplen así un rol doble, contribuye a la estabilidad oxidativa de la carne por su

interacción con el sistema antioxidante, y a la nutrición humana por su esencialidad (Cabrera et al., 2010).

1.3.3.1. Hierro

El hierro se encuentra presente en los alimentos tanto en su forma orgánica o hemínica, siendo la proteína cárnica bovina la mayor fuente disponible (Ramos et al., 2012), y en forma inorgánica, principalmente hierro ferroso y férrico en los vegetales con menor biodisponibilidad. El organismo no excreta el excedente de Fe por su cuenta, sino que lo elimina por medio de células descamadas y hemorragias (Abdo, 2011). La carne bovina roja y en menor proporción la carne aviar y suina, son importantes fuentes de hierro en sus dos formas (Cabrera & Saadoun, 2014).

El hierro es un micromineral esencial para el ser humano, particularmente niños y mayores, este debe ser incorporado diariamente mediante la alimentación, y debido a que el organismo posee la capacidad de almacenarlo en órganos y tejidos específicos puede contribuir a solventar las necesidades durante una carencia alimentaria corta (Hurrell & Egli, 2010). Este elemento participa en la estructura de numerosas hemoproteínas, como la hemoglobina y los citocromos, las cuales desempeñan funciones críticas en el transporte de gases respiratorios y en los procesos de fosforilación oxidativa (Abdo, 2011). Forma parte de la enzima lisosomal mieloperoxidasa, siendo indispensable para la adecuada actividad fagocítica y para la eficacia bactericida de los neutrófilos (Abdo, 2011).

Para Abdo (2011), Cabrera et al. (2010) y Pereiro (2014), la deficiencia de hierro en el organismo humano es un problema global, afecta a individuos en diversas etapas de su ciclo vital, especialmente a los niños y mujeres en edad reproductiva, especialmente embarazadas, ya que tiene gran importancia en el desarrollo del cerebro y otros tejidos. Según los autores, la anemia es el principal síntoma de la deficiencia del hierro, enfermedad que es reconocida por generar un déficit cognitivo en niños en fase escolar, reduciendo la capacidad física de trabajo debido a la falta de hemoproteínas, que implica un incremento en la producción de ácido láctico en los músculos y resulta en la fatiga muscular. Además, la falta del hierro en el organismo está asociada a una disminución de la inmunocompetencia, problemas de crecimiento, raquitismo y mal funcionamiento del sistema enzimático antioxidante (Abdo, 2011; Cabrera et al., 2010; Pereiro, 2014).

a) Hierro hemínico

Los alimentos de origen animal proporcionan hierro principalmente como hierro hemo (Kalman et al., 2025), el cual proviene de la hemoglobina y la mioglobina presentes en estos productos. Se estima que el hierro hemo contribuye entre el 10 % y el 15 % del hierro total (Hurrell & Egli, 2010). El hierro está ligado al hemo, que es un tetrapirrol, compuesto por cuatro anillos de pirrol unidos por puentes metino que coordinan un átomo de hierro central (Fe^{+2}), esencial para diversas funciones biológicas, como el transporte y la detección de gases, el metabolismo oxidativo y la desintoxicación de xenobióticos (Dutt et al., 2022). Estos aspectos de interés nutricional relacionados al hierro, su contenido y sus cambios en la carne bovina contribuyen con ese doble rol de aportar a la calidad de la carne y al valor nutricional para el ser humano.

b) Formas del hierro y su relación con el color de la carne

El otro rol del hierro a nivel de la calidad de la carne y en particular es en el color de la carne, propiedad que se asocia a la aceptación por parte del consumidor (Luzardo et al., 2023). Los procesos oxidativos provocan cambios en la forma del hierro e influyen en el cambio de color de la carne sometida a un proceso de maduración o de conservación (Ramos et al., 2012). Particularmente el hierro heme de la mioglobina/hemoglobina disminuye a medida que se oxida y cambia de forma, aumentando el hierro libre no heme, el cual a su vez es pro oxidante, promoviendo la formación de metamioglobina y reduciendo la capacidad de retención de agua (Liu et al., 2022).

1.3.3.2. Zinc

Los alimentos de origen animal constituyen las fuentes más concentradas de Zn, y de mayor biodisponibilidad (National Institutes of Health [NIH], 2026; Ramos et al., 2012).

El Zn cumple funciones estructurales, como por ejemplo en la replicación del ADN, pero además forma parte de la síntesis y degradación de las macromoléculas. Su deficiencia puede causar retraso del crecimiento, alopecia, retraso en el desarrollo del sistema reproductor y muscular, entre otros (National Research Council [NRC], 2005; NIH, 2026; Suttle, 2022; World Health Organization [WHO], 1996). El Zn cumple un rol como promotor antioxidante y además es cofactor de las enzimas antioxidantes como la SOD a la cual activa (Cabrera et al., 2010; Ramos et al., 2012).

1.3.3.3. Cobre

En los alimentos, las proteínas animales como la carne bovina contienen cobre biodisponible y de interés para la nutrición humana (NIH, 2022).

El cobre se considera un micronutriente esencial para el organismo, dado que interviene en diversas funciones fisiológicas. Cumple un papel clave como cofactor de enzimas tales como la citocromo C-oxidasa, la monoamino-oxidasa y la superóxido-dismutasa que contiene Cu/Zn (Gonçalves et al., 2007; Olivares Grohnert et al., 2004; Ramos et al., 2009), siendo su presencia en la carne necesario al funcionamiento de estas enzimas en el *post mortem*.

En el individuo, la deficiencia severa de cobre puede causar neutropenia, leucopenia, anemia, hiperuricemia y, además, un retraso en el crecimiento (Gonçalves et al., 2007). También ocasiona desmineralización de los huesos, fragilidad de las grandes arterias, desmielinización del tejido nervioso e importantes desórdenes neurológicos (Abdo, 2011).

1.3.3.4. Manganeso

El manganeso desempeña un papel fundamental en diferentes procesos metabólicos al actuar como cofactor de hidrolasas, aminopeptidasas, descarboxilasas y transferasas y participa en la síntesis de glicoproteínas y proteoglicanos. Además, es un cofactor de enzimas antioxidantes, como la superóxido dismutasa en su forma SOD2, mitocondrial (Barra et al., 1984; Fairweather-Tait & Hurrell, 1996; Ramos et al., 2009; Terevinto et al., 2010; Wang et al., 2003; Zelko et al., 2002). Participa como catalizador en el primer paso de la síntesis de carbohidratos a partir del piruvato mediante la arginasa que contiene manganeso (Allingham et al., 2001; Keen et al., 1999).

La deficiencia en humanos es poco frecuente y, cuando se presenta, ocurre generalmente durante etapas tempranas del desarrollo resultando en anomalías esqueléticas y ataxia irreversible (Allingham et al., 2001; Keen et al., 1999).

El estudio de los contenidos en la carne para evaluar su potencial antioxidante es clave así como sus cambios en los procesos de maduración larga, el tipo de músculo y sistemas de producción. Estudios previos han demostrado su importancia en la diferenciación de sistemas productivos cárnicos y tipo de músculo (Cabrera & Saadoun, 2014; Ramos et

al., 2012), pero aún falta asociarlos a los procesos de maduración larga como está propuesto en esta tesis.

1.4. Sistema antioxidante

1.4.1. Procesos de oxidación de la carne

La oxidación es una de las principales causas no microbianas de pérdida de calidad de carne. Debido a que tiene alta concentración de proteínas, lípidos poliinsaturados, pigmentos heme, catalizadores metálicos y otros agentes oxidantes, la carne se vuelve susceptible al deterioro oxidativo (Falowo et al., 2014; Guyon et al., 2016). Es un proceso complejo e irreversible. A través de la formación de compuestos tóxicos, pérdidas en antioxidantes, ácidos grasos poliinsaturados y aminoácidos esenciales, se afectan las propiedades sensoriales, la seguridad química y el valor nutritivo de la carne (Estévez, 2017).

Las especies reactivas del oxígeno, nitrógeno u otros elementos (ROS y RNS) son el conjunto de radicales libres y derivados no-radicales, que son agentes oxidantes y/o se pueden convertir fácilmente en radicales (Halliwell, 1990). Debido a esta condición, los ROS, son inestables y altamente reactivos, generando oxidaciones en macromoléculas y daños celulares (Lobo et al., 2010).

1.4.2. Sistema antioxidante

Para proteger a los componentes celulares del daño asociado a las ROS, las células han desarrollado varios sistemas de defensa antioxidante (Davies, 2000).

Un antioxidante se define como una molécula que, presente en bajas concentraciones respecto a un sustrato oxidable, previene o retrasa significativamente su oxidación (Halliwell, 1990).

Los compuestos antioxidantes se clasifican en enzimáticos y no enzimáticos. Dentro de los antioxidantes enzimáticos se encuentran la catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD), glutatión peroxidasa (GPx), glutatión reductasa (GR) y glucosa-6-fosfato deshidrogenasa (G6PDH). Los antioxidantes no enzimáticos incluyen cofactores, minerales, Se, Fe, Zn, Cu y Mn, vitaminas, compuestos organosulfurados, carotenoides, compuestos fenólicos y compuestos nitrogenados no proteicos, entre otros (Carocho & Ferreira, 2013).

Las enzimas CAT, SOD, GPx y GR, junto con metales antioxidantes como Se, Mn, Cu y Zn, constituyen la primera línea de defensa del sistema antioxidante, ya que participan en la transformación de especies reactivas en peróxido de hidrógeno y posteriormente en agua (Irshad & Chaudhuri, 2002; Lobo et al., 2010).

Los antioxidantes no enzimáticos actúan como segunda línea de defensa, reaccionando frente a los radicales libres (Lobo et al., 2010). Según su solubilidad, pueden localizarse en el citosol (hidrosolubles) o en las membranas celulares (liposolubles) (Briviba & Sies, 1994).

1.4.3. Influencia del sistema de producción, tipo de músculo y maduración sobre el sistema antioxidante de la carne

La capacidad de resistir frente a la oxidación depende de los antioxidantes que posee la carne, y estos varían según la especie del animal, el músculo, el sistema de producción y el tiempo de maduración de la carne (Descalzo et al., 2005, 2007, 2008; Mercier et al., 2004).

La alimentación es el factor más utilizado como herramienta para mejorar y/o controlar la calidad de la carne (Andersen et al., 2005). La carne proveniente de sistemas de producción pastoril posee un mayor contenido de ácidos grasos de cadena larga, los cuales son más susceptibles a la oxidación en comparación con la carne proveniente de terminación con concentrado (Cabrera & Saadoun, 2014). Sin embargo, también se ha puesto en evidencia que el sistema de producción en base a pasturas genera una carne con mayor resistencia a la oxidación, mayores defensas antioxidantes (Terevinto et al., 2015), mayor contenido de péptidos bioactivos antioxidantes (Cabrera et al., 2015) y por ende mejor estatus antioxidante. Sin embargo, no hay información de cómo esto evoluciona en procesos de maduración más largos, a 60 o 120 días.

El metabolismo de las especies reactivas de oxígeno (ROS) varía según el tipo de músculo. Los músculos con predominio de fibras glucolíticas presentan una mayor liberación de H₂O₂ que aquellos con mayor proporción de fibras oxidativas. Además, la actividad de las enzimas antioxidantes SOD, CAT y GPx es inferior en los músculos glucolíticos en comparación con los oxidativos (Picard et al., 2012). También en estudios previos en el laboratorio por Pirotti Corrales (2020) se observó diferencia entre músculos para el estatus antioxidante, tocoferol, glutatión, DPPH, ABTS y FRAP y entre sistemas de producción en maduración de 30 días.

En estudios de maduración a 14 días (Ramos et al., 2012), se ha visto disminuir algunos de estos elementos traza lo cual justifica ampliamente el estudio de su evolución en maduraciones largas.

En base a estos antecedentes, en este trabajo final de grado se busca estudiar nuevos marcadores de calidad que tengan impacto durante las maduraciones largas. En este sentido surge el glucógeno, por los recientes hallazgos de su relación con la estabilidad del hierro en las estructuras y cambios de la mioglobina lo cual impacta en el color a través del proceso de maduración (Onopiuk et al., 2016) como un elemento novedoso y práctico de estudiar y las modificaciones que se dan en un componente nutricional y funcional al mismo tiempo como lo es el hierro y su componente mayor, el hierro hemínico en un contexto de diferentes sistemas predominantes en el país, en una maduración larga y considerando dos tipos diferentes de músculo.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

El objetivo del trabajo fue el estudio de los componentes fisicoquímicos y nutricionales y sus cambios en el proceso de maduración larga de la carne bovina de novillos Aberdeen Angus provenientes de sistema pastoril y sistema intensivo de dos músculos y su relación entre ellos como biomarcadores del potencial de defensa de la carne durante el procesamiento.

1.5.2. Objetivos específicos

Estudiar las diferencias entre los sistemas de producción (sistema pastoril y sistema feedlot), tipo de músculo (LD y SM), y proceso de maduración de la carne (carne fresca y madurada), *in vacuum*, a 60 días a 2°C.

Determinar los parámetros fisicoquímicos, pH y color, en dos músculos *Longissimus dorsi* (LD), principal del corte bife ancho y *Semimembranosus* (SM), principal del corte nalga, de novillos Aberdeen Angus, frescos y madurados, *in vacuum*, 60 días a 2°C.

Determinar los minerales traza y el estado de oxidación del hierro en los dos músculos LD y SM de novillos Aberdeen Angus frescos y madurados, *in vacuum*, 60 días a 2°C.

Determinar el contenido de glucógeno residual en los músculos LD y SM de novillos Aberdeen Angus frescos y madurados, *in vacuum*, 60 días a 2°C.

Establecer relaciones entre compuestos nutricionales, parámetros tecnológicos, y el glucógeno residual como nuevos biomarcadores de calidad.

1.6. Hipótesis

La composición nutricional y los parámetros fisicoquímicos de la carne estarían influenciados por el sistema de producción, el tipo de músculo y la maduración.

La carne producida en base pastoril mantendría una mayor capacidad antioxidante expresado en glucógeno residual, estabilidad del hierro hemo y el color, durante la maduración larga en comparación con la carne de sistema feedlot.

El sistema de producción y el músculo incidirán en los procesos oxidativos con énfasis en el hierro hemo, color y contenido de glucógeno durante una maduración larga.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Animales y dietas

El estudio se realizó utilizando 30 novillos Aberdeen Angus, de 2 dientes, INAC/UR A y 2. De los cuales, 15 novillos fueron criados y terminados sobre pastoreo extensivo (sistema pastoril) en pastura natural y mejoradas (avena), los animales tenían un peso vivo promedio de 553 kg, y un rendimiento de 54,3 %. Por otro lado, los otros 15 novillos fueron terminados bajo régimen de Feedlot, siguiendo el reglamento de la comunidad europea (481/2012). En este sistema los animales, 100 días antes de la faena son encerrados en corrales y alimentados con concentrado, el cual consistió de cebada, maíz, trigo, silo de trigo y sorgo y se suplementó con vitaminas y minerales. El peso vivo promedio de este grupo fue de 565 kg, con un rendimiento de carcasa del 54,5 %.

2.2. Preparación de muestras de carne

A las 36 horas *post mortem* a 1-2°C, luego de la faena en establecimiento comercial habilitado (Frigorífico Matadero Pando), se extrajeron de la parte derecha de las canales, 15 cm (corte transversal) de los cortes bife ancho (2230 INAC): siendo el *Longissimus dorsi* (LD) (Figura 1), el músculo principal, ubicado entre la 4ª hasta la 10ª o 11ª hemivértebras dorsales y 15 cm de la nalga de adentro sin tapa (2010-2011 INAC), siendo el músculo principal el *Semimembranosus* (SM) (Figura 2). El pH de las canales fue menor o igual a 5,80. Los cortes extraídos fueron envasados al vacío y llevados al laboratorio. Una vez en el laboratorio, los cortes fueron divididos en dos trozos y se envasaron al vacío (*in vacuum*). Una porción se congeló inmediatamente a -20°C sin madurar y la otra restante se puso a madurar a 1-2 °C durante 60 días.

Figura 1

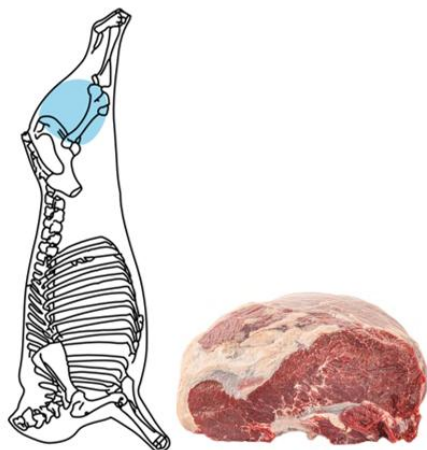
Fotografía y ubicación anatómica del bife angosto



Nota. Tomado del manual de cortes de INAC (2023).

Figura 2

Fotografía y ubicación anatómica de nalga de adentro sin tapa



Nota. Tomado del manual de cortes de INAC (2023).

Las mediciones y determinaciones de los parámetros a estudiar se realizaron en los cortes de los músculos LD y SM, frescos y madurados a 60 días provenientes de los dos sistemas, pastoril y feedlot.

2.3. Medición de pH

Para medir el pH primero se realizó un corte en el músculo y se introdujo el electrodo de vidrio del pHmetro (Oakton® Acorn™ Series pH 6) en forma perpendicular, evitando el contacto de la punta del electrodo con la grasa. Se esperó que la medida se estabilice para registrar la lectura. Finalmente se limpió la sonda con agua destilada previo a la siguiente medida.

2.4. Medición de color

Las muestras se expusieron al aire libre y temperatura ambiente durante dos horas para obtener el blooming, luego se tomaron las medidas sobre la superficie de la muestra utilizando un colorímetro MINOLTA CR-10, registrándose los parámetros de luminosidad (L^*), enrojecimiento (a^*) y amarillamiento (b^*).

2.5. Determinación del contenido de materia seca y cenizas

La determinación de la materia seca se realizó pesando 5 g de la muestra en una balanza analítica. Inicialmente se determinó el peso del crisol y luego de la muestra + crisol. Se colocó el crisol + la muestra en estufa a 105°C por 48 hs o hasta peso constante. Pasado este tiempo, se dejó enfriar en desecador y se pesó para luego calcular el % de materia seca de las muestras aplicando la fórmula siguiente:

$MS = (\text{peso muestra seca} * 100) / \text{peso muestra fresca}$

Los resultados se expresan en % (g/100 g de carne).

Para determinar el contenido de cenizas, paso previo a la determinación del contenido de minerales, la muestra extraída de la estufa, es colocada en una mufla (Thermolyne digital con rampa de temperatura) a 508°C durante 72 hs. Pasado este tiempo, se dejó enfriar en el desecador y se pesó para calcular el % de cenizas de las muestras. Los resultados se expresan como % (g/100 g carne)

2.6. Determinación del contenido de elementos traza, Fe total, Zn, Cu y Mn

Las cenizas fueron digeridas en un volumen de HNO₃ 1M y HCl 6M, en caliente (80 °C en placa calentadora Thermolyne) hasta disolución completa, y filtradas con papel filtro Whatman 41 sin cenizas y llevadas a volumen de 25 ml en matraz aforado con agua desionizada de alta pureza (18 MΩ-cm). Esta solución fue usada para la medición de los contenidos de hierro, zinc, cobre y manganeso. Para cada muestra se cuantificaron los minerales, en duplicado en cada determinación. Los minerales, fueron determinados por espectrometría de absorción atómica de llama utilizando un EAA, equipo Analyst 300 (Perkin Elmer, EE. UU.).

El acondicionamiento del material de vidrio y polietileno consistió en su inmersión durante un mínimo de 24 horas en agua desionizada con HNO₃ al 10 % (Merck, Argentina), seguido de varios enjuagues con agua desionizada. Las soluciones estándar de Mn, Fe, Cu y Zn (Perkin Elmer, EE. UU.) se prepararon inmediatamente antes de su aplicación mediante la dilución con agua desionizada a partir de una solución patrón de 1000 mg/L. El control de calidad analítico se efectuó empleando un patrón certificado de hígado bovino (NIST, SRM 1577b, Gaithersburg, EE. UU.).

2.7. Determinación de hierro heme

Para realizar la medición del hierro heme, se siguió el método de Hornsey (1956). Se preparó una solución de acetona acidificada al 90 % (16 ml de agua desionizada (18 MΩ-cm) con 4 ml de HCl (Merck, puro, ppa) y 180 ml de acetona (Carlo Erba, ppa).

Se pesó 1 g de la muestra en balanza analítica y se le agregó 4.5 ml de la solución acetona acidificada. Esto se maceró con una varilla de vidrio durante 1 minuto. Luego se vortexeó durante 1 minuto más. Los tubos se dejaron en reposo en oscuridad, durante 1 hora. Se filtró la muestra con filtros MN 640d de 45 mm de diámetro y se midió la absorbancia en

colorímetro Genesys-10 vis, a 640 nm en cuba de cuarzo, contra blanco de acetona acidificada. Los resultados se expresaron en mg/kg de carne, de acuerdo a las ecuaciones siguientes:

$$M (\mu\text{g}) \text{ hematina en 1 g de muestra} = ((A_{640} \times 135825 \times \text{VOL (l)})) / (m (\text{g}) \text{ de muestra})$$

$$\mu\text{g de Fe/g muestra} = \mu\text{g de hematina} \times 0,0882 \mu\text{g Fe}/\mu\text{g hematina}$$

2.8. Determinación de glucógeno

Se pesaron 2 g de muestra evitando el tejido conectivo y la grasa intramuscular para que haya heterogeneidad de la distribución de glucógeno en el músculo (Ørtenblad et al., 2013). La muestra fue homogeneizada, se le agregó 4 ml de HCl 4M y se mantuvo durante 2 hs a 100 °C en tubos de vidrio sellados (Del Puerto et al., 2016). Luego de enfriados, se procedió al doble filtrado (filtro de celulosa, Macherey-Nagel, Alemania) y se neutralizó con NaOH 4N. El glucógeno fue determinado como equivalentes totales de glucosa, siguiendo el método Bergmeyer y Bernt (1965), usando un kit de diagnóstico colorimétrico (1001201, Spinreact, España) basado en la enzima glucosa-peroxidasa, medido en un espectrofotómetro Genesys-10 vis (Thermo Scientific Inc. EE. UU.). La concentración de glucógeno fue expresada en μmol de glucógeno/g de carne.

2.9. Análisis estadístico

Para evaluar los efectos del sistema de producción, tipo de músculo y tiempo de maduración se realizó un ANOVA GLM ($p < 0,05$ %) y cuando se detectaron diferencias significativas se realizó un Test de Tukey-Kramer. Por otro lado, se analizó a través de un ANOVA de una vía y Test de Tukey-Kramer, las diferencias debido a la maduración dentro de cada músculo y cada sistema, o cuando se entendió de interés comparar los músculos del mismo sistema a 60 días de maduración. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando el software *NCSS Data Analysis* (NCSS, 2025). Los resultados se expresaron como la media \pm error estándar (EE).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinó la variación de los parámetros fisicoquímicos; pH, color. Composición nutricional en minerales traza y de glucógeno, en la carne de novillos Aberdeen Angus, para los distintos sistemas de producción (sistema pastoril y feedlot), tipo de músculo (LD y SM) y tiempo de maduración (0 y 60 días).

3.1. pH

Los resultados de pH obtenido en las muestras de carne de novillos Aberdeen Angus, al día 0 (36 horas post mortem) se muestran en la Tabla 1, y se encuentran entre 5,4–5,7, lo que indica una adecuada acidificación *post mortem* en todos los tratamientos. Esto coincide con el rango normal reportado por Franco et al. (2002).

Tabla 1

Efecto del sistema productivo y músculo en el pH de carne en el día 0

	Maduración, Días	Sistema pasturas		Sistema Feedlot	
		Músculo		Músculo	
		LD	SM	LD	SM
pH	0	5,6 ± 0,05	5,7 ± 0,03	5,4 ± 0,04	5,6 ± 0,03

Efectos principales

Sistema ($P \leq 0,001$); $P > F$

Músculo ($P \leq 0,001$); $SM > LD$

Nota. Los valores son las medias \pm EE de $n=15$; los datos se analizaron en ANOVA GLM y Test de Tukey-Kramer, con efectos fijos el sistema y tipo de músculo.

Se observó un efecto del sistema de alimentación, con valores superiores en pastoril. Asimismo, el músculo SM presentó pH mayor que LD, evidenciando variaciones metabólicas propias del tipo de fibra y actividad muscular. Estando los valores de pH en el rango comercialmente aceptado, no tendría incidencia en el posterior cambio de la carne.

3.2. Color

Los resultados de color se presentan en la Tabla 2. La luminosidad (L^*) se situó entre 28,9 y 37,5, el componente rojizo (a^*) entre 6,9 y 14,3, y el componente amarillento (b^*) entre 10,7 y 15,8. El sistema feedlot presentó valores superiores de L^* , a^* y b^* respecto al sistema pastoril, lo que determinó que la carne de estos sistemas es más clara, con mayor intensidad de rojo y mayor tonalidad amarilla.

Tabla 2*Efecto del sistema productivo, músculo y maduración en el color de la carne*

	Maduración, Días	Sistema pasturas		Sistema Feedlot	
		Músculo		Músculo	
		LD	SM	LD	SM
L*	0	28,9 ± 0,45	34,7 a ± 0,41	35,0 ± 0,41	37,5 ± 0,67
	60	29,8 ± 0,30	31,6 b ± 0,80	35,2 ± 0,45	36,2 ± 0,88

Efectos principalesSistema ($P \leq 0,001$); $F > P$ Músculo ($P \leq 0,001$); $SM > LD$ Maduración ($P \leq 0,01$); $0 > 60$

	Maduración, días	Sistema pasturas		Sistema Feedlot	
		Músculo		Músculo	
		LD	SM	LD	SM
a*	0	6,9 ± 0,51	14,3 a ± 0,73	11,5 ± 0,44	13,1 ± 0,47
	60	6,9 ± 0,60	9,8 b ± 1,09	12,6 ± 0,49	11,8 ± 0,68

Efectos principalesSistema ($P \leq 0,001$); $F > P$ Músculo ($P \leq 0,001$); $SM > LD$ Maduración ($P \leq 0,01$); $0 > 60$

	Maduración, días	Sistema pasturas		Sistema Feedlot	
		Músculo		Músculo	
		LD	SM	LD	SM
b*	0	11,7 ± 0,29	15,8 a ± 0,48	15,2 ± 0,40	13,6 a ± 0,43
	60	11,0 ± 0,18	10,7 b ± 0,37	14,8 ± 0,39	11,7 b ± 0,45

Efectos principalesSistema ($P \leq 0,001$); $F > P$

Músculo NS

Maduración ($P \leq 0,01$); $0 > 60$

Nota. Los valores son la media ± EE de n=15; los datos se analizaron en ANOVA GLM y Test de Tukey-Kramer ($p < 0,05$) con efectos fijos el sistema, músculo y maduración. a,b: expresan diferencias significativas ($p < 0,05$) por ANOVA de una vía y Test de Tukey-Kramer entre 0 y 60 días para SM en cada sistema de producción.

Se observó efecto del músculo, con SM mostrando mayores valores que LD para L^* y a^* , mientras que para b^* no se observó diferencias significativas, determinando que SM es un músculo más claro y rojizo que LD. En cuanto al tiempo de maduración generó una disminución general de los parámetros cromáticos, con valores mayores al día 0 respecto al día 60, este resultado es esperable ya que según Descalzo et al. (2005) el grupo hemo de la mioglobina, puede verse afectado en la maduración por los procesos de oxidación lipídica, provocando una coloración más amarronada. Al comparar cada músculo dentro de cada sistema entre el día 0 y 60, se destaca la pérdida de color en el músculo SM, en el sistema pastoril, disminuyendo el L^* , a^* y b^* significativamente y no en LD. En sistema feedlot la pérdida es significativa en el b^* del músculo SM, pierde más color rojizo y amarillamiento en la maduración, mientras que LD no pierde su color, siendo más estable. El sistema pastoril afectaría más la pérdida de color que feedlot, para el músculo SM, probablemente debido a una mayor oxidación por mayor contenido de ácidos grasos poliinsaturados (Saadoun et al., 2019).

3.3. Materia Seca

Los resultados del contenido de materia seca se presentan en la Tabla 3, evidenciaron diferencias significativas entre los sistemas de feedlot y pastura, registrándose valores superiores de materia seca en el sistema feedlot. Se observaron diferencias significativas entre los músculos analizados, siendo el LD el que presentó los mayores valores en comparación con SM. En relación con los tratamientos de maduración, no se detectaron diferencias significativas en el contenido de materia seca entre el día 0 y el día 60.

Tabla 3

Efecto del sistema productivo, músculo y maduración del contenido de materia seca de la carne

	Maduración, Días	Sistema pasturas		Sistema Feedlot	
		Músculo		Músculo	
		LD	SM	LD	SM
MS %	0	26,8 ± 0,46	25,4 ± 0,41	27,7 ± 0,56	26,3 ± 0,22
	60	27,1 ± 0,31	26,2 ± 0,48	28,9 ± 0,31	25,9 ± 0,58

Efectos principales

Sistema ($P \leq 0,01$); $F > P$

Músculo ($P \leq 0,001$); $LD > SM$

Maduración NS

Nota. Los valores son medias \pm EE de $n=15$; los datos se analizaron en ANOVA -GLM y test de Tukey-Kramer, con efectos fijos el sistema, músculo y la maduración.

Las diferencias observadas en el contenido de agua o materia seca de la carne podrían estar asociadas, principalmente, al contenido de lípidos intramusculares, parámetro que, si bien no fue medido en el presente estudio, hay antecedentes de diferencias significativas entre sistemas (Terevinto et al., 2023). En este sentido, se ha reportado que un mayor contenido de materia seca en la carne de animales provenientes de sistemas feedlot, lo que se traduce en un menor contenido de agua, como consecuencia de una mayor deposición de grasa (Kaur et al., 2016). En concordancia con estos antecedentes, los animales alimentados en base a pasturas presentan carcasas más magras, con menor acumulación de grasa intramuscular y con un mejor perfil de ácidos grasos (Lukic et al., 2021), lo que confiere a esta carne un mayor interés desde el punto de vista de la salud cardiovascular (Saadoun & Cabrera, 2012). Sin embargo, el mayor contenido de agua en la carne del sistema pastoril la haría más vulnerable a una mayor pérdida de agua por goteo al final del tiempo de maduración, pero ese resultado no se observó en este trabajo. Asimismo, la grasa intramuscular puede variar en función del músculo analizado (Saadoun & Cabrera, 2012), lo que se refleja en los resultados obtenidos, donde el LD presentó el menor contenido de agua y, por ende, se puede deducir un mayor contenido de grasa intramuscular.

Si bien en este trabajo no se encontraron diferencias significativas debido al proceso de maduración, en el trabajo de Abdo (2011), la maduración afecta el contenido de materia

seca dependiendo del tipo de músculo, explicado por la pérdida de agua retenida por las proteínas musculares, las cuales son degradadas lo que facilita la movilización y pérdida del agua, generando así un incremento en la materia seca muscular (Ouali et al., 2006).

3.4. Contenido de Zinc, Cobre y Manganeso

A continuación, se presenta en la Tabla 4 las concentraciones de Zinc (Zn), Cobre (Cu) y Manganeso (Mn) determinadas en las muestras carne de LD y SM de los dos sistemas de producción. La información resume los resultados obtenidos en los siguientes ítems y se discutirá el comportamiento de cada mineral de forma individual.

Tabla 4*Efecto del sistema productivo, músculo y maduración en minerales traza de la carne*

	Maduración, Días	Sistema pasturas		Sistema Feedlot	
		Músculo		Músculo	
		LD	SM	LD	SM
Zn mg/kg carne	0	42,5 a ± 1,24	46,0 a ± 3,40	37,5 ± 0,81	39,1 a ± 2,85
	60	36,7 b ± 0,34	37,0 b ± 0,48	37,4 ± 0,28	35,5 b ± 0,59

Efectos principalesSistema ($P \leq 0,01$); $P > F$

Músculo NS

Maduración ($P \leq 0,001$); $0 > 60$

	Maduración, Días	Sistema pasturas		Sistema Feedlot	
		Músculo		Músculo	
		LD	SM	LD	SM
Cu mg/kg carne	0	1,2 ± 0,07	1,8 ± 0,14	1,0 ± 0,14	1,2 ± 0,15
	60	1,3 ± 0,16	1,6 ± 0,08	1,5 ± 0,11	1,6 ± 0,21

Efectos principales

Sistema NS

Músculo ($P \leq 0,005$); $SM > LD$ Maduración ($P \leq 0,01$); $60 > 0$

	Maduración, Días	Sistema pasturas		Sistema Feedlot	
		Músculo		Músculo	
		LD	SM	LD	SM
Mn mg/kg carne	0	0,19 ± 0,02	0,37 a ± 0,03	0,19 ± 0,02	0,29 a ± 0,03
	60	0,18 ± 0,02	0,24 b ± 0,01	0,31 ± 0,03	0,21 b ± 0,02

Efectos principalesSistema ($P \leq 0,005$); $F > P$

Músculo NS

Maduración ($P \leq 0,05$); $0 > 60$

Nota. Los valores son medias ± EE de $n=10$; los datos se analizaron en ANOVA GLM y Test de Tukey-Kramer, con efectos fijos el sistema, músculo y maduración. a,b: expresan diferencias significativas ($p < 0,05$) por ANOVA de una vía y Test de Tukey-Kramer entre 0 y 60 días para SM en cada sistema de producción.

3.4.1. Análisis del contenido de Zinc

Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre los sistemas de pastura y feedlot, con valores entre 34,6 y 65,8 mg Zn /kg de carne y 29,1 y 58,1 mg Zn/kg de carne respectivamente, registrándose una mayor concentración de Zn en la carne proveniente de animales terminados en pasturas. Estos resultados coinciden con los reportados por Saadoun et al. (2011, como se cita en Cabrera y Saadoun, 2015). En relación con los tratamientos de maduración, se detectaron diferencias significativas, observándose una disminución en la concentración de Zn durante la maduración de 60 días, este efecto se encuentra en concordancia con el análisis de Felice (2018) en un tiempo de maduración de 30 días. Sin embargo, Ramos et al. (2012) durante una maduración de 14 días no observó efecto. Esto se podría explicar, debido a que este mineral se encuentra mayormente unido y asociado a las proteínas (Kiouri et al., 2025), y el proceso de maduración provoca proteólisis, proceso que puede acentuarse a partir del día 14 de maduración (Ouali et al., 2006).

Para los músculos evaluados no se encontraron diferencias significativas en la concentración de Zn. Sin embargo, en un análisis por sistema y por músculo en función del tiempo de maduración se observa una mayor pérdida de Zn en el músculo SM en ambos sistemas y solo en LD del sistema pastoril, evidenciando una mayor fragilidad del sistema pastoril durante la maduración. Probablemente esto se relacione con un mayor contenido de Zn (Tabla 4) en las proteínas solubles y su posible pérdida a lo largo de la maduración. El Zinc está predominantemente ubicado dentro del tejido muscular en las proteínas miofibrilares asociado a las metaloproteínas y con la proteólisis pueden perderse y concentrarse en el fluido durante la maduración (Khan et al., 2016).

3.4.2. Análisis del contenido de Cobre

Los resultados indicaron que no se registraron diferencias significativas en el contenido de Cu entre los sistemas de producción basados en pastura y feedlot, mismo resultado expresado por Felice (2018). En relación con el tipo de músculo, se observaron diferencias significativas, presentando el SM una mayor concentración de Cu en comparación con el LD, estas diferencias se evidencian también en el trabajo de Cabrera et al. (2010).

Respecto a los tratamientos de maduración, la concentración de Cu fue significativamente mayor al día 60 en comparación con el día 0, teniendo el mismo efecto en el estudio de

Felice (2018), en el día 30. Probablemente, al haber una pérdida de agua al final de los 60 días se dé un leve aumento en la concentración de Cu en la carne.

3.4.3. Análisis del contenido de Manganeso

El contenido de manganeso osciló en los distintos tratamientos entre 0,10 y 0,56 mg Mn/kg de carne, si bien los datos sobre este mineral en la literatura científica son limitados, los valores obtenidos son concordantes con lo reportado por Cabrera et al. (2010) y Ramos et al. (2012). En relación con el tipo de músculo, se registra un efecto significativo, presentando el SM una mayor concentración en comparación con el LD, este resultado se encuentra en concordancia con estudios realizados en otros músculos por Ramos et al. (2012), en los cuales la bioaccesibilidad del Mn mostró un efecto principal significativo del músculo ($p < 0,05$).

En la maduración, no se detectaron diferencias significativas en la concentración de Mn entre el día 0 y el día 60 en el músculo LD, mismo resultado expuesto por Ramos et al. (2012). Este comportamiento, además, coincide con lo reportado por Abdo (2011), quien indica que el contenido de manganeso no varía durante la maduración de músculos bovinos y sugiere que el Mn se encuentra en una forma estable, no susceptible a pérdidas en el agua de maduración, en concordancia con su función como cofactor enzimático. Sin embargo, para el músculo SM entre el día 0 y 60 en ambos sistemas si se encontraron diferencias significativas, reduciéndose el contenido de Mn en el día 60.

Los resultados indicaron que no se observaron diferencias significativas en el contenido de Mn entre los sistemas de feedlot y pastura.

3.5. Contenido de Hierro y Hierro hemínico

A continuación, se presenta la Tabla 5 con las concentraciones de hierro total (Fe total) y hierro hemínico (Fe heme) determinadas en las muestras analizadas.

Tabla 5

Efecto del sistema productivo, músculo y maduración en hierro y hierro heme de la carne

	Maduración, días	Sistema pasturas		Sistema Feedlot	
		Músculo		Músculo	
		LD	SM	LD	SM
Fe total	0	19,4 ± 0,32	24,0 a ± 0,55	17,8 ± 0,74	23,2 a ± 0,84
mg/kg	60	18,1 ± 0,58	22,6 b ± 0,92	16,3 ± 0,66	20,3 b ± 0,66
carne					

Efectos principales

Sistema ($P \leq 0,005$); $P > F$

Músculo ($P \leq 0,001$); $SM > LD$

Maduración ($P \leq 0,001$); $0 > 60$

	Maduración, días	Sistema pasturas		Sistema Feedlot	
		Músculo		Músculo	
		LD	SM	LD	SM
Fe heme	0	17,1 ± 1,34	20,8 a ± 1,14	14,7 ± 0,64	20,4 a ± 1,18
mg/kg	60	17,7 ± 0,69	18,8 b ± 1,88	15,4 ± 1,58	15,7 b ± 2,12
carne					

Efectos principales

Sistema ($P \leq 0,05$); $P > F$

Músculo ($P \leq 0,005$); $SM > LD$

Maduración NS

Nota. Los valores son medias ± EE de n=10; los datos se analizaron en ANOVA GLM y Test de Tukey-Kramer, con efectos fijos el sistema, músculo y maduración. a,b: expresan diferencias significativas ($p < 0,05$) por ANOVA de una vía y Test de Tukey-Kramer entre 0 y 60 días para SM en cada sistema de producción.

3.5.1. Análisis del hierro total

Los contenidos de hierro obtenidos, van desde 13,57 a 28,88 mg Fe/kg de carne, valores similares a los obtenidos por Cabrera et al. (2010). Se registró una mayor concentración de Fe en la carne proveniente de animales terminados en pastura, mostrando una diferencia significativa según el sistema de alimentación. Purchas y Busboom (2005) observan el mismo efecto significativo entre sistemas de producción entre novillas

terminadas en pastoreo en Nueva Zelanda y novillas engordadas a corral en Estados Unidos. Sin embargo, Felice (2018) no observa este efecto significativo.

En relación con el tipo de músculo, se observaron diferencias significativas, presentando el SM una mayor concentración de Fe en comparación con el LD. Ramos et al. (2012), también observó este efecto en el LD, presentando menor concentración de Fe que *Psoas major*.

Respecto a la maduración, otros estudios con menores tiempo de maduración (14 días) no presentan diferencias significativas, como es el caso de Ramos et al. (2012). Sin embargo, en nuestro trabajo a un mayor tiempo de maduración, 60 días, la concentración de Fe fue significativamente menor en SM.

3.5.2. Análisis del Hierro hemínico (Fe heme)

El contenido de Fe heme osciló entre 14,75 y 20,82 mg Fe heme/kg de carne. Se observó un efecto significativo del sistema de alimentación, siendo mayor en la carne de los animales terminados a pasturas, mismo efecto observado por Pereiro (2014), también en novillos Aberdeen Angus.

En relación con el tipo de músculo, también se presentaron diferencias significativas, siendo mayor para SM. Ramos et al. (2012), al igual que cuando se compara Fe total, encontró que LD tiene un menor contenido de Fe heme respecto a *Psoas major*. En el estudio de Ramos et al. (2012), también se evidencia que la maduración a los 14 días no presenta diferencias significativas con el día cero, este afirma que no se han encontrado datos en la bibliografía sobre el efecto la maduración en el contenido de hierro heme en la carne. En este trabajo, se observó una disminución significativa del Fe heme en SM con la maduración.

3.6. Contenido de glucógeno residual

Los resultados obtenidos de glucógeno se muestran en la Tabla 6. En el día cero, se encuentran entre 8,9 y 13,2 $\mu\text{mol/g}$, en el rango reportado por Onopiuk et al. (2016) a las 48 horas *post mortem*. En comparación al día 60, el contenido de glucógeno desciende significativamente, un comportamiento similar fue informado por Komatsu et al. (2020), quien reportó una reducción significativa hacia el día 14 de maduración.

En relación con el tipo de músculo, no se observaron diferencias significativas cuando se analiza el conjunto de datos, en contraposición a lo reportado por Onopiuk et al. (2016) y

Komatsu et al. (2020), quienes informaron diferencias entre músculos de metabolismo predominantemente oxidativo y glucolítico. Sin embargo, en nuestro estudio, al analizar dentro de cada músculo al día 60 el SM pierde más glucógeno mientras que el LD lo conserva (Tabla 6), probablemente debido a la naturaleza más oxidativa del SM.

Tabla 6

Efecto del sistema productivo, músculo y maduración en el contenido de glucógeno de la carne

	Maduración, días	Sistema pasturas		Sistema Feedlot	
		Músculo		Músculo	
		LD	SM	LD	SM
Glucógeno μmol/g	0	9,6 ± 1,64	13,2 ± 1,56	8,9 ± 1,77	10,2 ± 2,71
	60	9,0 a ± 0,25	3,4 b ± 0,50	7,0 a ± 0,46	4,0 b ± 0,76
Efectos principales					
Sistema NS					
Músculo NS					
Maduración (P ≤ 0,001); 0>60					

Nota. Los valores son medias ± EE de n=7; los datos se analizaron en ANOVA GLM y Test de Tukey-Kramer, con efectos fijos el sistema, músculo y maduración. a,b: expresan diferencias significativas (p<0.05) por ANOVA de una vía y Test de Tukey-Kramer entre 0 y 60 días para SM en cada sistema de producción.

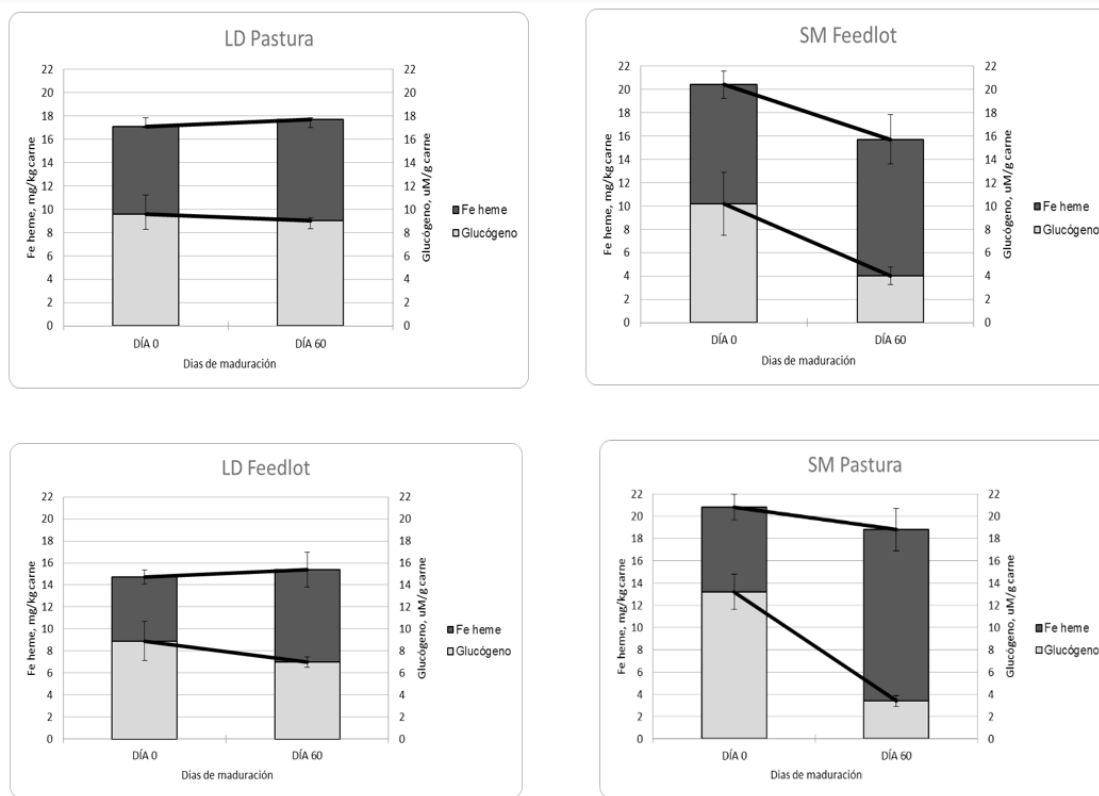
3.7. Interacciones entre el contenido de hierro hemínico, glucógeno y el color con el sistema de producción, tipo de músculo y tiempo de maduración

En conjunto, se graficaron los resultados de glucógeno y hierro heme y del color en las figuras 3 y 4 para una visualización del conjunto en función del sistema de producción y tipo de músculo y tiempo de maduración. Estos resultados muestran una relación entre el glucógeno y el hierro hemínico, que puede estar influenciada por factores biológicos y productivos como el tipo de músculo y el sistema de producción. Al día cero, el contenido de hierro hemínico y glucógeno son mayores para el músculo SM que para el LD. Al día 60, el contenido de hierro hemínico, se mantuvo para el músculo LD y disminuyó para el SM. Para el contenido de glucógeno, al día 60, disminuye para ambos músculos asociado al proceso de glucólisis *post mortem*, pero la disminución es mayor en SM, músculo con perfil oxidativo.

Por otro lado, la interacción sistema de producción y tiempo de maduración, muestra, que el contenido de hierro hemo es mayor en el sistema pastura. El contenido de glucógeno no presenta diferencias significativas entre sistema feedlot y pastura.

Figura 3

Contenido de hierro hemo (mg/kg de carne) y glucógeno ($\mu\text{M/g}$ de carne) en los músculos



Nota. Contenido de hierro hemo (mg/kg de carne) y glucógeno ($\mu\text{M/g}$ de carne) en el músculo Longissimus dorsi y Semimembranosus de animales provenientes de sistema feedlot y pastura, evaluados a 0 y 60 días de maduración. Los valores se expresan como medias \pm EE ($n = 7$). LD = Longissimus dorsi. SM = Semimembranosus.

En la figura 4, que se presenta a continuación, se muestra el efecto del sistema de producción, el tipo de músculo y el tiempo de maduración sobre los parámetros de color en la carne de novillos Aberdeen Angus.

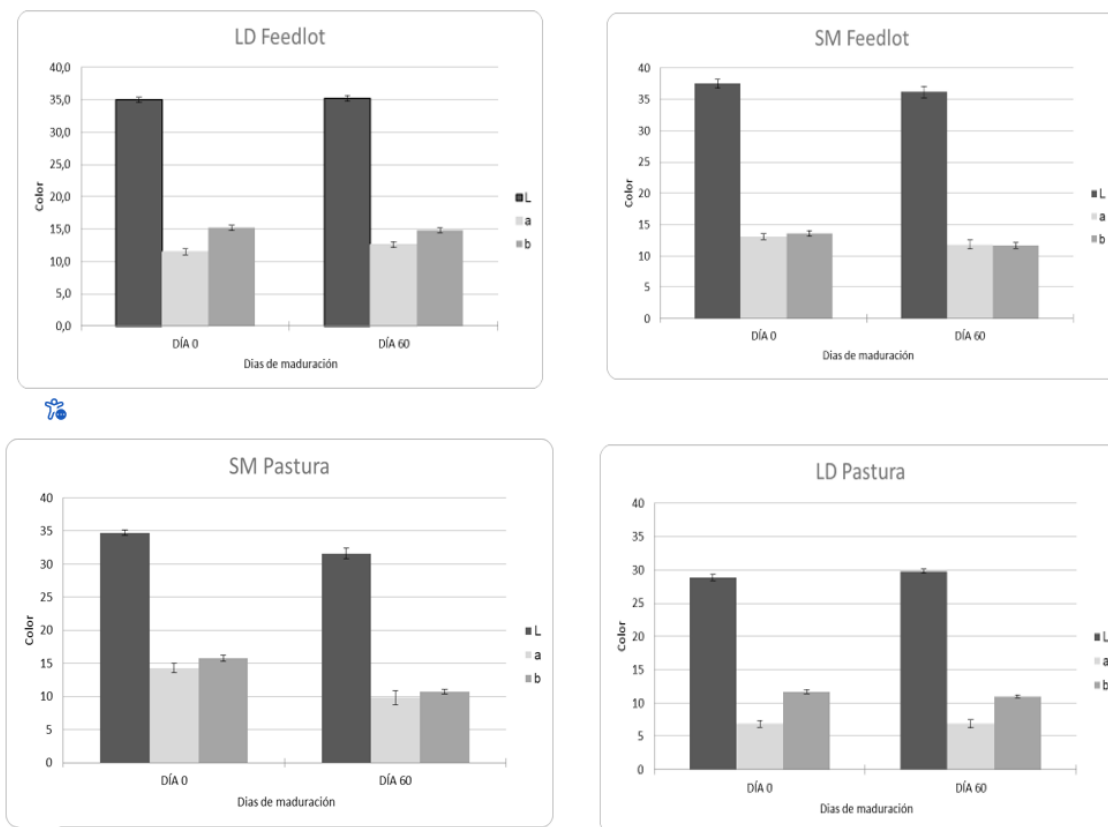
Estos contenidos iniciales de Hierro hemínico y glucógeno en cada músculo y sistema impactan en el color, variable percibida por el consumidor y la industria. Los parámetros de color L^* , a^* y b^* del músculo SM son superiores en los días 0 y 60 en comparación con el músculo LD, lo cual se asocia a su metabolismo oxidativo.

En relación con la maduración, el músculo SM tiende a disminuir los parámetros del color, evidenciando diferencias significativas entre el día 0 y el día 60. Esta disminución también se observa, para el mismo músculo, en los parámetros glucógeno y Fe hemínico. Estos cambios marcan una diferencia más importante entre el tipo de músculo que el

sistema de producción, siendo el músculo SM más frágil a la inestabilidad del color que el músculo LD, que tiene más estabilidad.

Figura 4

Parámetros de color (L^* , a^* , b^*) en los músculos LD y SM



Nota. Parámetros de color (L^* , a^* , b^*) en los músculos Longissimus dorsi y Semimembranosus de animales provenientes de sistemas de producción a pasturas y feedlot, evaluados a 0 y 60 días de maduración. Los valores se expresan como medias \pm EE (n = 10). LD = Longissimus dorsi; SM = Semimembranosus; L^* = luminosidad; a^* = componente rojo; b^* = componente amarillo. NS = diferencias no significativas.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió evaluar de forma integrada los cambios fisicoquímicos y nutricionales durante una maduración prolongada (60 días, 2 °C, *in vacuum*) en carne bovina de novillos Aberdeen Angus provenientes de sistemas pastoril y feedlot, considerando además el efecto del tipo de músculo (LD y SM).

Los resultados evidenciaron que el tipo de músculo constituyó un factor determinante en la mayoría de los parámetros analizados. Las diferencias estructurales y metabólicas entre los músculos explican las variaciones observadas como contenido de hierro hemo, luminosidad y glucógeno. El LD, siendo un músculo con metabolismo predominantemente glucolítico y de contracción rápida, contiene menos mioglobina y se caracterizó por un menor brillo y enrojecimiento. En cambio, el SM contiene mayor contenido de hierro hemo, como resultado de un mayor contenido de mioglobina, por lo tanto, presentó un mayor enrojecimiento y luminosidad.

Con respecto al glucógeno, siendo su efecto ya conocido, sobre el descenso de pH *post-mortem*, un mayor contenido de glucógeno favorece una mayor producción de ácido láctico, promoviendo una disminución más marcada del pH. En general, los músculos con predominio de fibras oxidativas, rojas, como el SM, presentaran menores reservas de glucógeno y, en consecuencia, valores de pH final más elevados, debido a una disminución constante y lenta del mismo, en contraposición a los músculos con mayor proporción de fibras glucolíticas blancas, como el LD. En este trabajo no se observaron diferencias en el contenido de glucógeno entre los músculos analizados particularmente al día 0. Sin embargo, al día 60 de maduración, LD presenta mayor contenido de glucógeno que SM en ambos sistemas de producción manteniendo estable su contenido inicial con una muy leve y no significativa disminución.

Se observaron diferencias en los distintos sistemas que puede deberse al tipo de alimentación y el nivel de actividad física. Los animales terminados en feedlot reciben dietas con mayor contenido energético, lo que favorece una mayor deposición de grasa intramuscular y puede influir en el color de la carne. Se obtuvieron los valores más altos de luminosidad (L*), asociados a carnes más claras, y en mayores valores de a* y b*, que indican una mayor intensidad del color rojo y amarillo. Estas diferencias pueden relacionarse con cambios en la composición del músculo, el contenido de pigmentos y el estado de oxidación de la mioglobina, principal responsable del color de la carne.

Respecto a la maduración, al día 60, los parámetros hierro total, hierro hemínico, Mn, Zn, color (L^* , a^* y b^*) y glucógeno, disminuyeron su contenido levemente en el músculo LD y significativamente en el músculo SM, demostrando la inestabilidad probablemente asociado a su metabolismo oxidativo.

Desde un enfoque nutricional, la carne bovina producida en Uruguay presenta contenidos relevantes de minerales de importancia para la salud humana, como el Fe, especialmente en su forma biodisponible (Fe hemínico), así como Zn, Mn y Cu. Los resultados obtenidos muestran una tendencia clara en cuanto al efecto del sistema de alimentación sobre la concentración de minerales. Estas diferencias fueron a favor del sistema pastoril para Zn y Cu, sin embargo, para Mn, sucede lo contrario. La maduración también afectó el contenido de Zn y el Mn, lo cual releva la importancia de atender el proceso *post mortem* para evitar esta pérdida. El contenido diferencial de elementos traza entre los dos músculos estudiados como Fe, Mn y Cu contribuye con un mejor conocimiento de los aportes de cada corte de carne y su rol en la prevención de carencias nutricionales.

Finalmente, en este trabajo se pudo evidenciar que, compuestos como el glucógeno y sus cambios en los procesos oxidativos, como la maduración, afectan los cambios de otro marcador como el Fe hemínico asociado a su vez a la inestabilidad del color, pero esta relación es muy dependiente del sistema de producción y del tipo de músculo considerado. Un músculo más oxidativo, como SM, es más inestable a los procesos oxidativos impactando en la calidad final de la carne en mayor magnitud que en un músculo más estable, como LD. Un músculo glucolítico es más estable, lo que estaría asociado a un mayor contenido de glucógeno residual, ya que este protege indirectamente a las células del daño oxidativo inducido por el hierro, al sustentar mecanismos antioxidantes vitales. Alimenta la vía de las pentosas, que genera NADPH, el cual es un agente reductor que permite mantener los niveles de GSH (agente antioxidante) (Fillebeen et al., 2020). Estos resultados abren camino para abordar todo el sistema enzimático antioxidante que permita dilucidar en cuál se impacta más y poder atender esto a nivel de la alimentación pre faena y las tecnologías de maduración.

4.1. Discusiones finales

En función de las hipótesis planteadas al inicio, los resultados obtenidos nos permitieron afirmar que tanto la composición nutricional y los parámetros fisicoquímicos de la carne

si están influenciados por el sistema de producción, tipo de músculo y maduración de la carne.

Tomando la segunda y tercera hipótesis planteada, se determina que la capacidad antioxidante expresada como la estabilidad del hierro heme, glucógeno residual y color en la maduración larga de 60 días no es mayor en el sistema pastoril que en el sistema feedlot. Sino que, lo que más está influyendo es el tipo de músculo, siendo el músculo glucolítico (LD) el más estable.

La identificación del glucógeno residual y Fe hemínico como posibles biomarcadores de estabilidad del color durante maduraciones prolongadas, permitirán una aplicación práctica. Para plantas frigoríficas exportadoras sería conveniente seleccionar músculos con mayor contenido de glucógeno residual (como es el caso del LD), ya que serían más estables frente a la oxidación y podrían mantener una mejor calidad de carne durante la maduración larga. De esta forma, los resultados obtenidos podrían utilizarse como una herramienta práctica para mejorar la calidad final de la carne exportada.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdo, A. (2011). *Variación del contenido de zinc, cobre, manganeso, hierro e hierro hemínico en músculos frescos y madurados de novillos Hereford terminados a grano* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/1649>
- Albertí, P., & Ripoll, G. (2010). Los pigmentos de la carne y factores que afectan su color. En G. Bianchi & O. Feed (Eds.), *Introducción a la ciencia de la carne* (pp. 115-128). Hemisferio Sur.
- Allingham, P. G., Harper, G. S., Hennessy, D. W., & Oddy, V. H. (2001). The influence of pre-weaning nutrition on biochemical and myofibre characteristics of bovine semitendinosus muscle. *Australian Journal of Agricultural Research*, 52(9), 891-902. <https://doi.org/10.1071/AR00162>
- Andersen, H. J., Oksbjerg, N., Young, J. F., & Therkildsen, M. (2005). Feeding and meat quality: A future approach. *Meat Science*, 70(3), 543-554. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.07.015>
- Andújar, G., Pérez, D., & Venegas, O. (2009). *Química y bioquímica de la carne y los productos cárnicos*. IIIA.
- Barra, D., Schinina, M. E., Simmaco, M., Bannister, J. V., Bannister, W. H., Rotilio, G., & Bossa, F. (1984) The primary structure of human liver manganese superoxide dismutase. *Journal of Biological Chemistry*, 259(20), 12595-12601. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)90788-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)90788-X)
- Bekhit, A. E. A., Morton, J. D., Bhat, Z. F., & Kong, L. (2019). Meat color: Factors affecting color stability. En L. Melton, F. Shahidi & P. Varelis (Eds.), *Encyclopedia of food chemistry* (Vol. 2, pp. 202-210). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21665-X>
- Bergmeyer, H.-U., & Bernt, E. (1965). Determination with glucose oxidase and peroxidase. En H.-U. Bergmeyer (Ed.), *Methods of enzymatic analysis* (pp. 123-130). Verlag Chemie GmbH.
- Blasina y Asociados. (2025, 18 de octubre). La intensificación ganadera mueve la matriz agrícola. *El Observador*. <https://www.elobservador.com.uy/agro/la-intensificacion-ganadera-mueve-la-matriz-agricola-n6021243>
- Brewer, S. (2004). Irradiation effects on meat color: A review. *Meat Science*, 68(1), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.02.007>
- Briviba, K., & Sies, H. (1994). Nonenzymatic antioxidant defense systems. En B. Frei (Ed.), *Natural antioxidants in human health and disease* (pp. 106-128). Academic Press.
- Cabrera, M. C., Ramos, A., Saadoun, A., & Brito, G. (2010). Selenium, copper, zinc, iron and manganese content of seven meat cuts from Hereford and Braford steers fed pasture in Uruguay. *Meat Science*, 84(3), 518-528. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.10.007>

- Cabrera, M. C., & Saadoun, A. (2014). An overview of the nutritional value of beef and lamb meat from South America. *Meat Science*, 98(3), 435-444. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.033>
- Cabrera, M. C., & Saadoun, A. (2015). *Caracterización del valor nutricional de alimentos*. PROCISUR; IICA. https://www.procisur.org.uy/files/documento/64_procisur_caracterizacion_valor_nutricional_Alimentos.pdf
- Cabrera, M. C., Terevinto, A., Zaccari, F., & Saadoun, A. (2015). Creatina, carnosina y anserina en el músculo Longissimus dorsi de novillos Aberdeen Angus alimentados a pasto versus concentrado. En Sociedad Chilena de Producción Animal (Org.), *XXIV Congreso de la Asociación Latinoamericana de Producción Animal y XL Congreso de la Sociedad Chilena de Producción Animal, Sochipa. A.G.* (p. 179). <https://www.sochipa.cl/wp-content/uploads/2020/04/Congreso-Puerto-Varas-2015.pdf>
- Caputi, P., & Méndez, C. (2010). Producción de carne en el mundo y la inserción de Uruguay en el comercio exterior. En G. Bianchi & O. Feed (Coords.), *Introducción a la ciencia de la carne* (pp. 17-49). Hemisferio Sur.
- Carocho, M., & Ferreira, I. C. F. R. (2013). A review on antioxidants, prooxidants and related controversy: Natural and synthetic compounds, screening and analysis methodologies and future perspectives. *Food and Chemical Toxicology*, 51, 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.09.021>
- Choi, Y. M., & Kim, B. C. (2009). Muscle fiber characteristics, myofibrillar protein isoforms, and meat quality. *Livestock Science*, 122(2-3), 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.08.015>
- Church, D. C. (1989). *Alimentos y alimentación del ganado*. Hemisferio Sur.
- Cobos, Á., & Díaz, O. (2015). Chemical composition of meat and meat products. En P. C. K. Cheung & B. M. Mehta (Eds.), *Handbook of food chemistry* (pp. 1-32). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41609-5_6-1
- Código de prácticas de higiene para la carne: CXC 58/2005.* (s.f.). FAO. https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/zh/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXC%2B58-2005%252FCXC_058s.pdf
- Consigli, R., & Aleu, G. (2022). *La maduración de la carne bovina*. AgroGlobal. <https://agroglobalcampus.com/wp-content/uploads/2024/02/AgroGlobal-Ebook-Maduracion-de-la-carne-bovina-.pdf>
- Davies, K. J. (2000). Oxidative stress, antioxidant defenses, and damage removal, repair, and replacement systems, *IUBMB Life*, 50(4-5), 279-289. <https://doi.org/10.1080/713803728>
- Del Puerto, M., Terevinto, A., Saadoun, A., Olivero, R., & Cabrera, C. (2016). Effect of different sources of dietary starch on meat quality, oxidative status and glycogen and lactate kinetic in chicken pectoralis muscle. *Journal of Food and Nutrition Research*, 4(3), 185-194. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/22096>

- Descalzo, A. M., Insani, E. M., Biolatto, A., Sancho, A. M., García, P. T., Pensel, N. A., & Josifovich, J. A. (2005). Influence of pasture or grain-based diets supplemented with vitamin E on antioxidant/oxidative balance of Argentine beef. *Meat Science*, 70(1), 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.11.018>
- Descalzo, A. M., Rossetti, L., Grigioni, G., Irurueta, M., Sancho, A. M., Carrete, J., & Pensel, N. A. (2007). Antioxidant status and odour profile in fresh beef from pasture or grain-fed cattle. *Meat Science*, 75(2), 299-307. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.07.015>
- Descalzo, A. M., Rossetti, L., Sancho, A. M., García, P. T., Biolatto, A., Carduza, F., & Grigioni, G. M. (2008). Antioxidant consumption and development of oxidation during ageing of buffalo meat produced in Argentina. *Meat Science*, 79(3), 582-588. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.10.020>
- Dutt, S., Hamza, I., & Bartnikas, T. B. (2022). Molecular mechanisms of iron and heme metabolism. *Annual Review of Nutrition*, 42, 311-335. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-062320-112625>
- Estévez, M. (2017). What's new in meat oxidation? En P. P. Purslow (Ed.), *New aspects of meat quality: From genes to ethics* (pp. 91-109). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100593-4.00006-0>
- Fairweather-Tait, S., & Hurrell, R. F. (1996). Bioavailability of minerals and trace elements: Members of EC Flair Concerted Action No. 10: Measurements of micronutrient absorption and status. *Nutrition Research Reviews*, 9(1), 295-324. <https://doi.org/10.1079/NRR19960016>
- Falowo, A. B., Fayemi, P. O., & Muchenje, V. (2014). Natural antioxidants against lipid-protein oxidative deterioration in meat and meat products: A review. *Food Research International*, 64, 171-181. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.06.022>
- Feiner, G. (2018). *Manual de productos cárnicos: Ciencia práctica y tecnología*. Acribia.
- Felice, Á. (2018). *Contenido de minerales traza, bioaccesibilidad in vitro y contaminantes en la carne de novillos Aberdeen Angus alimentados a pastura versus feedlot* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/44861>
- Fernández, E., Clariget, J., Zarza, R., Lattanzi, F., Bancho, G., La Manna, A., & Canozzi, M. E. A. (2020). Sistemas ganaderos intensivos de la región suroeste y centro sur del país: ¿Cuáles son las prácticas tecnológicas y decisiones de manejo predominantes en las empresas? *Revista INIA*, (63), 34-38. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/14889/1/Revista-INIA-63-Diciembre-2020-p-34-38.pdf>
- Fernandez, X., Lefaucheur, L., & Čandek, M. (1995). Comparative study of two classifications of muscle fibres: Consequences for the photometric determination of glycogen according to fibre type in red and white muscle of the pig. *Meat Science*, 41(2), 225-235. [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(94\)00059-G](https://doi.org/10.1016/0309-1740(94)00059-G)

- Fillebeen, C., Lam, N. H., Chow, S., Botta, A., Sweeney, G., & Pantopoulos, K. (2020). Regulatory connections between iron and glucose metabolism. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(20), Artículo e7773. <https://doi.org/10.3390/ijms21207773>
- Formento, P. (2015). *Calidad de carnes*. INAC. <https://www.inac.uy/innovaportal/file/11973/1/calidad-de-carnes.pdf>
- Franco, J., Feed, Ó., Aguilar, I., Gimeno, D., & Navajas, E. (2002). Calidad de la carne: pH y terneza. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Seminario de Actualización Técnica: Cruzamiento en bovinos para carnes* (pp. 63-67). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11089/1/SAD-295.pdf>
- Franco, J., Feed, Ó., Bianchi, G., Garibotto, G., Ballesteros, F., Nan, F., Percovich, M., Piriz, M., & Bentancur, O. (2008). Parámetros de calidad de carne en cinco músculos de novillos Holando durante la maduración post-mortem: III. Calidad sensorial. *Agrociencia (Uruguay)*, 12(1), 74-79. <https://doi.org/10.31285/AGRO.12.748>
- Fratti, L. A. (2016). *A qualidade da carne bovina do Uruguai: O resultado de um longo caminho*. INAC. https://www.inac.uy/innovaportal/file/8335/1/presentacion_goi_ania_2.pdf
- Frylinck, L., Strydom, P. E., Webb, E. C., Du Toit, E. (2013). Effect of South African beef production systems on postmortem muscle energy status and meat quality. *Meat Science*, 93(4), 827-837. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.11.047>
- Gardner, G. E., McGilchrist, P., & Pethick, D. W. (2014). Ruminant glycogen metabolism. *Animal Production Science*, 54(10), 1575-1583. <https://doi.org/10.1071/AN14434>
- Geletu, U. S., Usmael, M. A., Mummed, Y. Y., & Ibrahim, A. M. (2021). Quality of cattle meat and its compositional constituents. *Veterinary Medicine International*, 2021(1), Artículo e7340495. <https://doi.org/10.1155/2021/7340495>
- Gil, S. B. (2005). *Feedlot, elementos que intervienen y posibles impactos en el medio ambiente*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/invernada_o_engorde_a_corral_o_feedlot/76-fedlot_impactos_medio_ambiente.pdf
- Gonçalves, É. C. B. A., Teodoro, A. J., & Takase, I. (2007). Teores de cobre em extratos de carne in natura e processada. *Food Science and Technology*, 27(2), 298-302. <http://doi.org/10.1590/S0101-20612007000200015>
- Gunja-Smith, Z., Marshall, J. J., Mercier, C., Smith, E. E., & Whelan, W. J. (1970). A revision of the Meyer-Bernfeld model of glycogen and amylopectin. *FEBS Letters*, 12(2), 101-104. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(70\)80573-7](https://doi.org/10.1016/0014-5793(70)80573-7)
- Guyon, C., Meynier, A., & De Lamballerie, M. (2016). Protein and lipid oxidation in meat: A review with emphasis on high-pressure treatments. *Trends in Food Science & Technology*, 50, 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.01.026>

- Halliwell, B. (1990). How to characterize a biological antioxidant. *Free Radical Research Communications*, 9(1), 1-32. <https://doi.org/10.3109/10715769009148569>
- Hornsey, H. C. (1956). The colour of cooked cured pork: I. Estimation of the nitric oxide-haem pigments. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 7(8), 534-540. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740070804>
- Huff-Lonergan, E., & Lonergan, S. M. (2005). Mechanisms of water-holding capacity of meat: The role of postmortem biochemical and structural changes. *Meat Science*, 71(1), 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.04.022>
- Huff Lonergan, E., Zhang, W., & Lonergan, S. M. (2010). Biochemistry of postmortem muscle: Lessons on mechanisms of meat tenderization. *Meat Science*, 86(1), 184-195. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.05.004>
- Hurrell, R., & Egli, I. (2010). Iron bioavailability and dietary reference values. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 91(5), 1461S-1467S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2010.28674F>
- Immonen, K., Ruusunen, M., & Puolanne, E. (2000). Some effects of residual glycogen concentration on the physical and sensory quality of normal pH beef. *Meat Science*, 55(1), 33-38. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(99\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(99)00122-9)
- Instituto Nacional de Carnes. (2023). *Manual uruguayo de cortes bovinos*. https://uruguaymeats.uy/wp-content/uploads/2024/05/Manual-Cortes-de-Carne_ESPING-DIGITAL-3.pdf
- Instituto Nacional de Carnes. (2024). *Consumo de carnes en Uruguay: Informe 2024*. <https://www.inac.uy/innovaportal/file/18275/1/cierre-del-consumo-de-carnes.pdf>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.). *Evaluaciones genéricas bovinas*. <https://www.geneticabovina.com.uy/>
- Irshad, M., & Chaudhuri, P. S. (2002). Oxidant-antioxidant system: Role and significance in human body. *Indian Journal of Experimental Biology*, 40(11), 1233-1239.
- Kalman, D., Hewlings, S., Madelyn-Adjei, A., & Ebersole, B. (2025). Dietary heme iron: A review of efficacy, safety and tolerability. *Nutrients*, 17(13), Artículo e2132. <https://doi.org/10.3390/nu17132132>
- Karlsson, A. H., Klont, R. E., & Fernandez, X. (1999). Skeletal muscle fibres as factors for pork quality. *Livestock Production Science*, 60(2-3), 255-269. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00098-6](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00098-6)
- Kaur, L., Astruc, T., Vénien, A., Loison, O., Cui, J., Irastorza, M., & Boland, M. (2016). High pressure processing of meat: Effects on ultrastructure and protein digestibility. *Food & Function*, 7(5), 2389-2397. <https://doi.org/10.1039/c5fo01496d>
- Keen, C. L., Ensunsa, J. L., Watson, M. H., Baly, D. L., Donovan, S. M., Monaco, M. H., & Clegg, M. S. (1999). Nutritional aspects of manganese from experimental studies. *Neurotoxicology*, 20(2-3), 213-223. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10385885>

- Khan, M. I., Jung, S., Nam, K. C., & Jo, C. (2016). Postmortem aging of beef with a special reference to the dry aging. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 36(2), 159-169. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4869541/>
- Kiouri, D. P., Chasapis, C. T., Mavromoustakos, T., Spiliopoulou, C. A., & Stefanidou, M. E. (2025). Zinc and its binding proteins: Essential roles and therapeutic potential. *Archives of Toxicology*, 99, 23-41. <https://doi.org/10.1007/s00204-024-03891-3>
- Klont, R. E., Brocks, L., & Eikelenboom, G. (1998). Muscle fibre type and meat quality. *Meat Science*, 49(Suppl. 1), S219-S229. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(98\)90050-X](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(98)90050-X)
- Komatsu, T., Komatsu, M., & Shoji, N. (2020). Changes in glycogen and monosaccharide during aging of Japanese black cattle beef. *Nihon Chikusan Gakkaiho*, 91(2), 119-125.
- Lawrie, R. A., & Ledward, D. A. (2006). *Lawrie's meat science* (7th ed.). Woodhead Publishing Limited.
- Lefaucheur, L. (2010). A second look into fibre typing: Relation to meat quality. *Meat Science*, 84(2), 257-270. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.05.004>
- Liu, J., Liu, D., Zheng, A., & Ma, Q. (2022). Haem-mediated protein oxidation affects water-holding capacity of beef during refrigerated storage. *Food Chemistry: X*, 14, Artículo e100304. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100304>
- Lobo, V., Patil, A., Phatak, A., & Chandra, N. (2010). Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. *Pharmacognosy Reviews*, 4(8), 118-126. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.70902>
- López-Bote, C. (2017). Chemical and biochemical constitution of muscle. En F. Toldrá (Ed.), *Lawrie's meat science* (8th ed., pp. 99-158). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100694-8.00004-2>
- Lukic, M., Trbovic, D., Karan, D., Petrovic, Z., Jovanovic, J., Milijasevic, J. B., & Nikolic, A. (2021). The nutritional and health value of beef lipids-fatty acid composition in grass-fed and grain-fed beef. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 854, Artículo e012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/854/1/012054>
- Luzardo, S., Saadoun, A., Cabrera, M. C., Terevinto, A., Brugnini, G., Rodriguez, J., De Souza, G., Rovira, P., & Rufo, C. (2023). Effect of beef long-storage under different temperatures and vacuum-packaging conditions on meat quality, oxidation processes and microbial growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(2), 1143-1153. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12999>
- McAfee, A. J., McSorley, E. M., Cuskelly, G. J., Moss, B. W., Wallace, J. M. W., Bonham, M. P., & Fearon, A. M. (2010). Red meat consumption: An overview of the risks and benefits. *Meat Science*, 84(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.08.029>
- Mercier, Y., Gatellier, P., & Renerre, M. (2004). Lipid and protein oxidation in vitro, and antioxidant potential in meat from Charolais cows finished on pasture or mixed diet. *Meat Science*, 66(2), 467-473. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(03\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(03)00135-9)

- National Institutes of Health. (2022, 18 de octubre). *Copper*.
<https://ods.od.nih.gov/factsheets/Copper-HealthProfessional/>
- National Institutes of Health. (2026, 6 de enero). *Zinc*.
<https://ods.od.nih.gov/factsheets/Zinc-HealthProfessional/>
- National Research Council. (2005). *Mineral tolerance of animals* (2nd ed.). NAP.
- NCSS. (2025). *NCSS 2025* (Versión 25.0.3) [Software].
<https://www.ncss.com/download/ncss/updates/ncss-2025/>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2024). *Anuario estadístico agropecuario 2024*. MGAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2024/Anuario2024/%20ANUARIO2024.pdf>
- Olivares Grohnert, M., Castillo Durán, C., Arredondo Olguín, M., & Uauy Dagach-Imbarack, R. (2004). Cobre y zinc en nutrición humana. En Á. Gil Hernández & F. Sánchez de Medina Contreras (Eds.), *Tratado de nutrición: T. 1. Bases fisiológicas y bioquímicas de la nutrición* (pp. 973-996). Editorial Médica Panamericana.
- Onopiuk, A., Póltorak, A., & Wierzbicka, A. (2016). Influence of post-mortem muscle glycogen content on the quality of beef during aging. *Journal of Veterinary Research*, 60(3), 301-307. <https://doi.org/10.1515/jvetres-2016-0046>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2024-2033*.
https://www.oecd.org/content/dam/oecd/es/publications/reports/2024/07/oecd-fao-agricultural-outlook-2024-2033_e173f332/2b0c9d81-es.pdf
- Ørtenblad, N., Westerblad, H., & Nielsen, J. (2013). Muscle glycogen stores and fatigue. *The Journal of Physiology*, 591(18), 4405-4413.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2013.251629>
- Ouali, A., Herrera-Méndez, C. H., Coulis, G., Becila, S., Boudjellal, A., Aubry, L., & Sentandreu, M. A. (2006). Revisiting the conversion of muscle into meat and the underlying mechanisms. *Meat Science*, 74(1), 44-58.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.05.010>
- Patel, N., Bergamaschi, M., Magro, L., Petrini, A., & Bittante, G. (2019). Relationships of a detailed mineral profile of meat with animal performance and beef quality. *Animals*, 9(12), Artículo e1073. <https://doi.org/10.3390/ani9121073>
- Pereira Morales, A., Maycotte Morales, C. C., Restrepo, B. E., Mauro, F., Calle Montes, A., & Velarde, M. J. E. (2011). *Sistemas de producción animal I*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4782/sistemas_produccion_animal_i.pdf
- Pereiro, M. (2014). *Contenido y bioaccesibilidad in vitro del hierro en músculos de novillos Aberdeen Angus alimentados a pastura, pastura más suplemento y feedlot* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/5065>

- Picard, M., Hepple, R. T., & Burrelle, Y. (2012). Mitochondrial functional specialization in glycolytic and oxidative muscle fibers: Tailoring the organelle for optimal function. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 302(4), C629-C641. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00368.2011>
- Pirotti Corrales, F. D. (2020). *Estatus antioxidante de carne bovina uruguaya: Influencia del sistema de producción, tipo de músculo y tiempo de maduración* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/27460>
- Purchas, R. W., & Busboom, J. R. (2005). The effect of production system and age on levels of iron, taurine, carnosine, coenzyme Q₁₀, and creatine in beef muscles and liver. *Meat Science*, 70(4), 589-596. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.02.008>
- Ramos, A., Cabrera, M. C., Del Puerto, M., & Saadoun, A. (2009). Minerals, haem and non-haem iron contents of rhea meat. *Meat Science*, 81(1), 116-119. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.07.005>
- Ramos, A., Cabrera, M. C., & Saadoun, A. (2012). Bioaccessibility of Se, Cu, Zn, Mn and Fe, and heme iron content in unaged and aged meat of Hereford and Braford steers fed pasture. *Meat Science*, 91(2), 116-124. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.01.001>
- Rhee, M. S., Wheeler, T. L., Shackelford, S. D., & Koohmaraie, M. (2004). Variation in palatability and biochemical traits within and among eleven beef muscles. *Journal of Animal Science*, 82(2), 534-550. <https://doi.org/10.2527/2004.822534x>
- Saadoun, A., & Cabrera, M. C. (2012). *Calidad nutricional de la carne bovina producida en Uruguay*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/carne_y_subproductos/161-calidad_uruguay.pdf
- Saadoun, A., Cabrera, M. C., Terevinto, A., del Puerto, M., & Zaccari, F. (2019). Nutritional value of bovine meat produced on pasture. *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*, 2, 189-196. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22595-X>
- Schiaffino, S., & Reggiani, C. (1994). Myosin isoforms in mammalian skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*, 77(2), 493-501. <https://doi.org/10.1152/jappl.1994.77.2.493>
- Simeone, Á., Beretta, V., & Beriau, M. E. (2010). La alimentación a corral y la ganadería a pasto: Una propuesta de integración para analizar la posibilidad "ganar-ganar" en el negocio ganadero. En Á. Simeone & V. Beretta (Eds.), *Ganadería a pasto, feedlot e industria frigorífica: ¿Es posible una integración del tipo "ganar-ganar" en la cadena de la carne?* (pp. 12-21). UPIC.
- Simeone, Á., Bonino, F., Costa, E., & Moyal, S. (1996). El confinamiento en los sistemas de producción agrícola-ganaderos (I). *Cangüe*, (6), 27-32. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/45240>

- Suttle, N. F. (2022). *Mineral nutrition of livestock* (5th ed.). CABI.
<https://www.cabidigitallibrary.org/cms/asset/2254e0b4-fec3-4707-b981-cd53051f9c5d/9781789240924.0000.preview.pdf>
- Tarrant, P. V. (1981). The occurrence, causes and economic consequences of dark-cutting in beef: A survey of current information. En D. E. Hood & P. V. Tarrant (Eds.), *The problem of dark-cutting in beef* (pp. 3-36). Springer.
- Terevinto, A., Cabrera, M. C., & Saadoun, A. (2015). Influence of feeding system on lipids and proteins oxidation, and antioxidant enzymes activities of meat from Aberdeen Angus steers. *Journal of Food and Nutrition Research*, 3(9), 581-586.
<https://www.sciepub.com/portal/downloads?doi=10.12691/jfnr-3-9-4&filename=jfnr-3-9-4.pdf>
- Terevinto, A., Cabrera, M. C., Zaccari, F., & Saadoun, A. (2023). The oxidative and color stability of beef from steers fed pasture or concentrate during retail display. *Animals*, 13(18), Artículo e2972. <https://doi.org/10.3390/ani13182972>
- Terevinto, A., Ramos, A., Castroman, G., Cabrera, M. C., & Saadoun, A. (2010). Oxidative status, in vitro iron-induced lipid oxidation and superoxide dismutase, catalase and glutathione peroxidase activities in rhea meat. *Meat Science*, 84(4), 706-710. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.11.007>
- Uruguay XXI. (2023). *Informe anual comercio exterior 2023: Celulosa: se destaca como producto de importación*.
<https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/3fda643c80b4c3ca697cba33a4b1a26cdcc12af5.pdf>
- Uruguay XXI. (2024). *Sector ganadero en Uruguay*.
<https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/94b50e8850ce20033e048c8c3b15f37823d2454b.pdf>
- Wang, J., Sheppard, G. S., Lou, P., Kawai, M., Park, C., Egan, D.A., Schneider, A., Bouska, J., Lesniewski, R., & Henkin, J. (2003). Physiologically relevant metal cofactor for methionine aminopeptidase-2 is manganese. *Biochemistry*, 42(17), 5035-5042. <https://doi.org/10.1021/bi020670c>
- Warriss, P. D. (2003). *Ciencia de la carne*. Acribia.
- World Health Organization. (1996). *Trace elements in human nutrition and health*.
http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/37931/2/9241561734_eng.pdf?ua=1
- Zelko, I. N., Mariani, T. J., & Folz, R. J. (2002). Superoxide dismutase multigene family: A comparison of the CuZn-SOD (SOD1), Mn-SOD (SOD2), and EC-SOD (SOD3) gene structures, evolution and expression. *Free Radical Biology and Medicine*, 33(3), 337-349. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(02\)00905-X](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(02)00905-X)