



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

MAESTRÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y

RECURSOS NATURALES

**"EFECTO DE LA SUPLEMENTACIÓN DE CROMO ORGÁNICO EN LA
RESPUESTA PRODUCTIVA, METABOLISMO DE LOS NUTRIENTES Y
CARACTERÍSTICAS DE LA CANAL DE TRES GENOTIPOS PORCINOS
CON DIFERENTE POTENCIAL DE CRECIMIENTO"**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

PRESENTA:

JOVITA FALCÓN MARTÍNEZ

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México; agosto de 2025.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

MAESTRÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y

RECURSOS NATURALES

**"EFECTO DE LA SUPLEMENTACIÓN DE CROMO ORGÁNICO EN LA
RESPUESTA PRODUCTIVA, METABOLISMO DE LOS NUTRIENTES Y
CARACTERÍSTICAS DE LA CANAL DE TRES GENOTIPOS PORCINOS
CON DIFERENTE POTENCIAL DE CRECIMIENTO"**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

PRESENTA:

JOVITA FALCÓN MARTÍNEZ

COMITÉ TUTORIAL

Dr. Ignacio A. Domínguez Vara

Director de Tesis

Dr. Nazario Pescador Salas

Co Director

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México; agosto de 2025.

"EFECTO DE LA SUPLEMENTACIÓN DE CROMO ORGÁNICO EN LA RESPUESTA PRODUCTIVA, METABOLISMO DE LOS NUTRIENTES Y CARACTERÍSTICAS DE LA CANAL DE TRES GENOTIPOS PORCINOS CCA, DIFERENTE POTENCIAL DE CRECIMIENTO"

RESUMEN

El objetivo fue analizar la respuesta productiva, características de la canal, concentración plasmática de glucosa, creatinina, colesterol, triglicéridos, urea, cortisol, insulina y leptina de tres genotipos porcinos en engorda, G1=Pelón Mexicano (PM)×Yorkshire, G2=Asiático×PM y G3=Asiático×Yorkshire, machos y hembras, sin y con Cromo (Cr) orgánico (0.250 mg Cr kg⁻¹ MS) de Cr metionina. El diseño experimental fue completamente al azar con estructura factorial 3×2×2 de tratamientos (Genotipos×Sexo×Cromo); se realizaron análisis de varianza con procedimientos mixtos en el programa SAS, las medias se compararon con el método de Tukey. La engorda duró 126 días, contó con 84 cerdos, peso vivo=20.65±0.68 kg (42 machos y 42 hembras): G1=36; G2=24 y G3=24, alojados en grupos (repeticiones) de tres (G1) y dos (G2 y G3) cerdos por corral (n=12 repeticiones por genotipo). En las semanas 3, 6, 9, 12, 15 y 18 se muestrearon al azar, en la vena yugular, 36 cerdos, doce de cada genotipo, seis machos y seis hembras por genotipo y, de cada sexo, tres sin y tres con Cr en la dieta. La premezcla (Cr-L Metionina, 1000 ppm de Cr, Zinpro, Corp.®) se suministró diario con el alimento. Los metabolitos se midieron con técnicas enzimáticas, reactivos (kits) comerciales, química seca (Equipo Vitros DT60 II) y fotometría por reflexión. Las hormonas se analizaron por radioinmunoanálisis (RIA), para cortisol e insulina kits de (Diagnostic Products Corporation, DPC) y leptina kit multiespecies (Linco Research). Al finalizar la engorda, 36 cerdos se sacrificaron por métodos humanitarios para evaluar las canales. Hubo efecto ($P \leq 0.05$) de genotipo, sexo y Cr en peso vivo final (PVF) y ganancia de peso total (GDPT), y efecto de genotipo ($P \leq 0.04$) en consumo de MS total (CMST); los G2 y G3, las hembras y cerdos con Cr ganaron más peso. Los G2 y G3 tuvieron mayor ganancia diaria de peso (GDP) y mejor conversión alimenticia (CA) ($P \leq 0.05$). El Cr mejoró la GDP y CA ($P \leq 0.05$). El Cr redujo ($P \leq 0.05$) la glucosa en plasma. El colesterol fue distinto entre semanas, genotipos y sexos ($P \leq 0.05$); el colesterol fue menor en los machos. Hubo efecto de genotipo ($P \leq 0.05$) en la urea. La insulina, cortisol y leptina aumentaron ($P \leq 0.05$) con las semanas, pero sin efecto ($P > 0.05$) de genotipo, sexos y Cr. Hubo efecto de genotipo en peso de canal caliente y fría (PCC, PCF) y rendimiento de canal (RC) ($P \leq 0.05$); las hembras tuvieron mayor PCC :

($P \leq 0.05$); el Cr aumentó el PCC, PCF y RC ($P \leq 0.05$). Las hembras tuvieron más GD ($P \leq 0.05$). El Cr redujo ($P \leq 0.05$) la GD. Se concluye que los G2 y G3 tuvieron mayor GDP y mejor CA, la GDP fue mayor en hembras y el Cr mejoró la GDP y CA. El Cr redujo la glucosa en plasma. El colesterol varió por efecto de genotipo y sexo. Las interacciones afectaron el contenido de los triglicéridos. El genotipo, sexo y Cr no afectaron el nivel hormonal. Las canales de los G1 y G2 pesaron más; el Cr redujo la GD y aumentó el PCF y RC.

Palabras clave: Cerdos Engorda, Cromo Orgánico, Canales, Metabolitos, Hormonas.

**"EFFECT OF ORGANIC CHROMIUM SUPPLEMENTATION ON THE
PRODUCTIVE RESPONSE, NUTRIENT METABOLISM AND CARCASS
CHARACTERISTICS OF THREE PIG GENOTYPES WITH DIFFERENT
GROWTH POTENTIAL "**

ABSTRACT

The objective was to analyze the productive response, carcass traits, plasma concentration of glucose, creatinine, cholesterol, triglycerides, urea, cortisol, insulin and leptin of three fattening pig genotypes, G1=Pelón Mexicano (PM)×Yorkshire, G2=Asian×PM and G3=Asian×Yorkshire, males and females, without and with organic Chromium (Cr) (0.250 mg Cr kg⁻¹ DM) of Cr-L Methionine. The experimental design was completely randomized with a 3×2×2 factorial structure of treatments (Genotypes×Sex×Chromium); analysis of variance with mixed procedures was carried out in the SAS program, the means were compared with the Tukey method. The fattening lasted 126 days, it had 84 pigs, live weight=20.65±0.68 kg (42 males and 42 females): G1=36; G2=24 and G3=24, housed in groups (replications) of three (G1) and two (G2 and G3) pigs per pen (n=12 repetitions per genotype). In weeks 3, 6, 9, 12, 15 and 18, 36 pigs were randomly sampled in the jugular vein, twelve of each genotype, six males and six females per genotype and, of each sex, three without and three with Cr in the diet. The premix (Cr-L Methionine, 1000 ppm Cr, Zinpro, Corp.®) was supplied daily with the feed. Metabolites were measured with enzymatic techniques, commercial reagents (kits), dry chemistry (Vitros DT60 II Equipment) and reflection photometry. Hormones were analyzed by radioimmunoassay (RIA), for cortisol and insulin kits (Diagnostic Products Corporation, DPC) and leptin multispecies kit (Linco Research). At the end of fattening, 36 pigs were slaughtered by humane methods to evaluate the carcasses.

There was an effect ($P \leq 0.05$) of genotype, sex and Cr on final live weight (FLW) and total weight gain (TWG), and an effect of genotype ($P \leq 0.04$) on total DM intake (TDMI); In G2 and G3, females and pigs with Cr gained more weight. G2 and G3 had greater daily weight gain (DWG) and better feed conversion (FC) ($P \leq 0.05$). Cr improved DWG and FC ($P \leq 0.05$). Cr reduced ($P \leq 0.05$) plasma glucose. Cholesterol was different between weeks, genotypes and sexes ($P \leq 0.05$); cholesterol was lower in males. There was a genotype effect ($P \leq 0.05$) in

urea. Insulin, cortisol and leptin increased ($P \leq 0.05$) with the weeks, but without effect ($P > 0.05$) of genotype, sex and Cr. There was an effect of genotype on hot and cold carcass weight (HCW, CCW) and yield of channel (YC) ($P \leq 0.05$); females had higher HCW and CCW ($P \leq 0.05$); Cr increased HCW, CCW and YC ($P \leq 0.05$). Females had more back fat (BF) ($P \leq 0.05$). Cr reduced ($P \leq 0.05$) BF. It is concluded that G2 and G3 had higher DWG and better FC, DWG was higher in females and Cr improved DWG and FC. Cr reduced plasma glucose. Cholesterol varied by effect of genotype and sex. The interactions affected the triglyceride content. Genotype, sex and Cr did not affect the hormonal level. The G1 and G2 carcasses weighed more; Cr reduced BF and increased CCW and YC.

Keywords: Fattening Pigs, Organic Chromium, Carcasses, Growth, Metabolites, Hormones.

CONTENIDO

CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE CUADROS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. REVISIÓN DE LITERATURA	15
2.1 Generalidades	15
2.2. Metabolismo del cromo	16
2.2.1 Absorción y transporte.....	16
2.2.2 Excreción.....	16
2.2.3 Esencialidad del cromo.....	17
2.3 Función biológica del Cr ³⁺	18
2.4 Fuentes de cromo.....	22
2.4.1 Beneficios del cromo orgánico	24
2.5 Uso del cromo en la producción (nutrición) animal	24
2.5.1 Efecto del cromo orgánico en la respuesta productiva de cerdos.....	25
2.5.2 Efecto del Cr en las características y calidad de la canal de cerdos	28
2.5.3 Efecto del Cr en el metabolismo de minerales	31
2.6 Composición química de la carne.....	32
2.7 Calidad de la carne	33
2.7.1 pH muscular.....	34
2.7.2 Capacidad de retención de agua	35
2.7.3 Color	37
2.7.4 Textura.....	40
2.7.5 Colágeno.....	43
2.7.6 Lípidos de la carne y la grasa	45
2.7.7 Ácidos grasos.....	46
3. JUSTIFICACIÓN	50
4. HIPÓTESIS	52
5. OBJETIVOS.....	53
5.1 Objetivo general	53

5.2 Objetivos específicos.....	53
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	54
6.1 Respuesta productiva.....	54
6.2 Ensayo metabólico.....	57
6.3 Evaluación de las características de la canal	58
6.3.1 Matanza y faena de los cerdos.....	58
6.4 Diseño experimental, modelo y análisis estadístico	60
6.4.1 Diseño experimental	60
6.4.2 Análisis estadístico	60
7. RESULTADOS	61
7.1 Respuesta productiva.....	61
7.2 Características de la canal.....	61
7.3 Ensayo metabólico.....	63
7.3.1 Metabolitos en plasma	63
7.3.2 Hormonas en plasma	71
8. DISCUSIÓN	74
8.1 Respuesta productiva.....	74
8.2 Evaluación de la calidad de las canales	77
8.3 Ensayo metabólico (metabolitos y hormonas en plasma)	78
9. CONCLUSIONES.....	85
10. LITERATURA CITADA.....	86
11. ANEXOS	105
Anexo 1. Anexo 1. Artículo científico publicado en la revista internacional indizada Canadian Journal of Animal Science.....	105

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Principales factores que causan deficiencia de cromo en el organismo.	17
Cuadro 2. Contenido de Cr en forrajes y subproductos alimenticios para animales.	23
Cuadro 3. Contenido de Cr en los alimentos convencionales para humanos.	23
Cuadro 4. Función jerárquica obtenida de cuatro indicadores significativos de la respuesta productiva de la evaluación integral de cuatro fuentes orgánicas de Cr orgánico exógeno.	30
Cuadro 5. Composición química del músculo <i>L. dorsi</i> de especies pecuarias adultas.	33
Cuadro 6. Características de las carnes PSE (pálida, blanda, exudada) y DFD (oscura, dura, seca).	35
Cuadro 7. Valores promedio de los parámetros de coloración L*, a* y b* en diferentes músculos de cinco especies pecuarias.	39
Cuadro 8. Valores medios de esfuerzo al corte en muestras de carne de cerdo en diez centros comerciales y dos sectores de Ciudad Obregón, Sonora, México.	43
Cuadro 9. Composición típica de ácidos grasos de la grasa de bovino, ovino y cerdo.	48
Cuadro 10. Composición típica de ácidos grasos de los músculos de bovino, ovino y cerdo.	48
Cuadro 11. Composición y análisis químico de las dietas base (DB) en cada etapa de la engorda.	56
Cuadro 12. Efecto del genotipo, sexo y suministro de Cr Orgánico en la respuesta productiva de cerdos en engorda.	62
Cuadro 13. Efecto del genotipo, sexo y suministro de Cr Orgánico en las características de la canal de cerdos en engorda.	63
Cuadro 14. Efecto de genotipo, sexo y Cr orgánico en el contenido (mg dL ⁻¹) de metabolitos en sangre de cerdos durante las semanas 3, 6, 9, 12, 15 y 18 de la engorda.	69
Cuadro 15. Efecto del genotipo, sexo y Cr orgánico en la concentración de hormonas en sangre de cerdos durante las semanas 3, 6, 9, 12, 15 y 18 de la engorda.	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismo de acción de la activación del Cr.	20
Figura 2. Efecto del suministro de Cr orgánico (0.250 mg kg^{-1}) en la dieta sobre la concentración de glucosa en plasma de cerdos en engorda.	64
Figura 3. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el genotipo porcino en la concentración de creatinina en plasma.	65
Figura 4. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el genotipo porcino en la concentración de colesterol en plasma.	66
Figura 5. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el genotipo porcino en la concentración de triglicéridos en plasma.	67
Figura 6. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el sexo de los cerdos en la concentración de triglicéridos en plasma.	67
Figura 7. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el genotipo de los cerdos en la concentración de urea en plasma.	68
Figura 8. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el sexo de los cerdos en la concentración de urea en plasma.	69
Figura 9. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el genotipo de los cerdos en la concentración de cortisol en plasma.	73

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios para mejorar la eficiencia de la producción de carne de las especies pecuarias sugieren que los modificadores metabólicos pueden ser una buena opción para mejorar el rendimiento del crecimiento, las características de la canal y la calidad de la carne de rumiantes, cerdos y aves de engorda (Arvizu *et al.*, 2011).

El cromo (Cr) está considerado como mineral traza vital, tanto para humanos como para animales, el Cr es un micronutriente esencial, necesario para el metabolismo de carbohidratos, lípidos y proteínas (Mertz, 1993); su función más importante es aumentar la adhesión de la insulina a la superficie de la membrana celular y la introducción de glucosa, ácidos grasos y aminoácidos a la célula (Vincent, 2000). No obstante, la magnitud de la respuesta metabólica del Cr, depende de la forma química de este, observándose mayor efectividad de las formas orgánicas vs las inorgánicas, ya que las formas inorgánicas de Cr se absorben en niveles bajos (0.4 a 3%) (Anderson, 1987). En consecuencia, se han desarrollado diferentes fuentes orgánicas de Cr exógeno, las cuales están aprobadas para agregarse como aditivos en las dietas de cerdos de engorda: nicotinato de Cr, levadura de Cr, Cr metionina, picolinato de Cr y propionato de Cr (He *et al.*, 2023).

La fuente orgánica Cr Metionina (Cr-Met) está aprobada para su uso como aditivo complementario de este micro mineral en la dieta de especies pecuarias (Spears *et al.*, 2017). El Cr-Met, un quelato de aminoácidos, es más barato que otros tipos de complejos de Cr orgánico y puede absorberse directamente a través de las membranas de células epiteliales intestinales y metabolizarse sin digestión previa (Ohh *et al.*, 2005).

Durante la producción de carne porcina, una práctica generalmente usada es adicionar cromo orgánico a la dieta para complementar el cromo requerido para el crecimiento y el metabolismo de los nutrientes de los cerdos en engorda. Varios estudios en cerdos y rumiantes han sugerido que la suplementación con Cr al mejorar el rendimiento del crecimiento (Mousaie *et al.*, 2014), también reduce el depósito de grasa en la canal (Domínguez-Vara *et al.*, 2009). Además, otros estudios, aunque menos, realizados en cerdos,

han encontrado que la suplementación con Cr puede mejorar la calidad de la carne y la composición de ácidos grasos (Tian *et al.*, 2015). De acuerdo con el metaanálisis realizado por He *et al.* (2023), el suministro dietético de cromo orgánico exógeno, la dosis de 0.125 a 0.150 mg kg⁻¹ de MS de nicotinato de Cr, y la dosis de 0.125 a 0.150 mg kg⁻¹ de MS de picolinato de Cr, puede mejorar la ganancia diaria de peso, el consumo voluntario de alimento y las características de la canal, tanto de cerdos al destete como de cerdos en la fase de crecimiento y finalización. Sin embargo, la complementación dietética con Cr orgánico en cerdos de engorda, considerando los factores del sexo y genotipo, está poco estudiada y determinada, principalmente debido a las inconsistencias en los efectos del Cr exógeno sobre el metabolismo de los nutrientes, los niveles hormonales, calidad de la carne y el desempeño de la producción animal.

Por otra parte, la función del Cr en las especies pecuarias puede ser percibida desde dos aspectos, el primero, al mejorar la productividad y el segundo, al mejorar el perfil nutritivo del producto cárnico. El impacto del Cr en los indicadores de calidad de la carne se ha evaluado en cerdos y aves; la investigación señala mejoras en el contenido de proteína, disminución en la concentración de grasa intramuscular (Amatya *et al.* 2004; Lambertini *et al.*, 2004), efectos en el color de la carne (luminosidad) (Ondřej *et al.*, 2013), en la textura (Boleman *et al.*, 1995) y en el perfil de ácidos grasos (Bučko *et al.*, 2012).

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue investigar el efecto de suplementar la fuente orgánica, Cr-Met, sobre el rendimiento del crecimiento, parámetros sanguíneos, características de la canal y calidad de la carne en tres genotipos de cerdos en engorda.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades

El cromo es un elemento natural que se encuentra en rocas, animales, plantas, suelo; está presente en el ambiente, ocupa el número 21 en abundancia sobre la corteza terrestre, su concentración media en el suelo, como cromita, varía de 20 a 590 $\mu\text{g/kg}$. Este elemento químico fue descubierto en 1979 por Vaquelin, su símbolo es Cr, número atómico 24, peso atómico 51.996; está considerado como un metal de color blanco plateado, de textura dura y quebradiza. Las formas más comunes son de acuerdo a sus diferentes estados de oxidación y valencia, el cero (0), el trivalente (Cr^{3+}) y el hexavalente (Cr^{6+}), son los más importantes en el ambiente y los productos comerciales (Jeejeebhoy, 1999). **a) cromo cero:** no está presente en la corteza terrestre y es biológicamente inerte; **b) cromo hexavalente (Cr^{6+}):** es la segunda forma más estable y es un fuerte agente de oxidación, especialmente en acidez media, este elemento al reaccionar con material genético de las células se convierte en un compuesto carcinogénico (Pechova y Pavlata, 2007); **c) cromo trivalente (Cr^{3+}):** es la forma con más estabilidad química y se enlaza a ligandos que contienen nitrógeno, oxígeno o radicales sulfuro, formando complejos octaédricos; se usa con fines nutricionales. Casi todo el Cr presente en la naturaleza se encuentra en forma de Cr trivalente (Cr^{3+}); en la mayoría de los materiales biológicos está asociado fuertemente con proteínas, ácidos nucleicos y otros componentes del organismo (Anderson, 1997).

El Cr está considerado como un elemento traza esencial en humanos y animales, tiene una función importante a través de la insulina, en el metabolismo de carbohidratos, lípidos y proteínas (Mertz, 1993; Vincent, 2000). La deficiencia del Cr en el organismo de humanos y animales es responsable de un deterioro del metabolismo de la glucosa debido a una baja eficiencia de la insulina. El deterioro de la tolerancia a la glucosa es el primer síntoma de esta deficiencia en animales de experimentación y es posible que sea una de las causas de la intolerancia a la glucosa en humanos.

La manera en que el ser humano puede obtener el Cr es a través del consumo de alimentos ricos en este elemento. Está contenido en la mayoría de los alimentos frescos, las

fuentes ricas en Cr incluyen: yema de huevo, productos de granos completos, cereales, café, nueces, frijol, brócoli, carne y levadura de cerveza (Cefalu y Hu, 2004). Los compuestos de Cr^{3+} se emplean en humanos y animales con diferentes finalidades, actualmente su uso es muy difundido, lo que ha generado en el medio científico controversias relacionadas con su función como nutriente, uso terapéutico y toxicidad (Jeejeebhoy, 1999).

2.2. Metabolismo del cromo

2.2.1 Absorción y transporte

El Cr puede absorberse por vía digestiva, respiratoria y cutánea. La absorción intestinal (yeyuno) del Cr es baja, tanto en humanos como en animales, varía de 0.5 a 2%, dependiendo de la ingesta dietética; el resto del Cr se excreta en heces, orina y bilis; la excreción normal a través de la orina es de 0.05-0.5 $\mu\text{g}/\text{día}$. El mecanismo de absorción no se conoce con precisión, se cree que es por difusión o por una proteína transportadora. Post absorción, el Cr circula en el plasma a una concentración de 0.01 a 0.3 g/L, posiblemente unido a la transferrina y albúmina, mediante la unión a la transferrina, el Cr tiene un efecto significativo en el transporte del hierro (Anderson, 1998); el Cr es distribuido y almacenado en varios tejidos, con mayor concentración en riñones, músculo, hígado y epidídimo, se encuentra también en el bazo y tejido óseo (Cefalu y Hu, 2004). La absorción del Cr se ve limitada por su competencia con elementos como Ca, Fe, Mn y Zn (Nielsen, 1984), o por la presencia de fitatos (Dattilo y Miguel., 2003), niacina, ácido ascórbico y almidón (Offenbacher, 1994; Seaborn y Stoecker, 1989). Otras posibles causas de la deficiencia de Cr se presentan en el Cuadro 1. La absorción media del Cr en humanos es de 0.5 a 2.5%, pero en las formas orgánicas el valor es mayor (Dattilo y Miguel, 2003), además, su absorción es inversamente proporcional al consumo del mineral (Vincent, 2000).

2.2.2 Excreción

El Cr absorbido se excreta principalmente por filtración glomerular o unido a un transportador orgánico de bajo peso molecular (Ducros, 1992). Sin embargo, una pequeña cantidad se elimina en el pelo, transpiración y la bilis. La excreción de Cr, especialmente por el sistema urinario, puede aumentar de 10 a 300 veces en situaciones de estrés, o en consecuencia a una dieta rica en hidratos de carbono (Pechova y Pavlata, 2007).

Cuadro 1. Principales factores que causan deficiencia de cromo en el organismo.

Factores que afectan la absorción de cromo	Factores que causan la pérdida de cromo
Bajo consumo de materia seca.	Consumo de dietas con elevadas concentraciones de azúcares simples, lactosa, propionato, nitrógeno no proteico y/o grasa.
Baja concentración de cromo bioactivo en los alimentos.	Estrés (calórico, durante mercadeo y transporte, etc.).
Alimentos deficientes en cromo.	Preñez.
Niveles elevados de Fe y Zn que interfieren con la absorción de Cr.	Lactancia.
Pobre nivel y tipo de aminoácido en la dieta.	Ejercicio agudo.
Bajo contenido de niacina en la dieta.	Hemorragias.
Elevado nivel de sustancias amortiguadoras (buffers) en la ración.	Trauma físico.
Bajo nivel reducida síntesis de ácido ascórbico.	Infecciones.
Edad.	Obesidad.

Mowat (1997).

2.2.3 Esencialidad del cromo

La esencialidad del Cr en la nutrición animal fue reconocida por primera vez por Schwartz y Mertz en 1959. Estos investigadores indicaron que las ratas que recibieron levadura torula desarrollaron intolerancia a la glucosa; sin embargo, las ratas alimentadas con levadura de cerveza no desarrollaron este trastorno metabólico. Inicialmente se denominó factor de tolerancia a la glucosa (FTG) a una sustancia presente en la levadura de cerveza, pero no en la levadura torula. Posteriormente, se demostró que el ingrediente activo en el FTG es el Cr (III) (Schwartz y Mertz, 1959; Vincent, 2000). La naturaleza exacta del Factor de Tolerancia a la Glucosa propuesta originalmente en 1959 quedó poco definida. A partir de la levadura de cerveza hidrolizada con ácido y riñón porcino se purificó parcialmente un

material que contenía Cr el cual potenciaba el metabolismo de la glucosa. El material a partir de levadura recibió la mayor atención y fue llamada comúnmente levadura FTG. Se informó que el Cr en la levadura FTG se absorbía más fácilmente que en las fuentes de Cr inorgánico y se propuso que la levadura FTG se componía de iones Cr (III), ácido nicotínico, glicina, ácido glutámico y cisteína.

A principios de la década de los 90's se iniciaron una serie de estudios con fines zootécnicos en animales domésticos, el principal interés de estos estudios fue orientado a aprovechar los efectos lipolíticos de las sales de Cr. Los resultados positivos obtenidos en cerdos (Page *et al.*, 1993) promovieron su utilización en ganado bovino, en el caso de esta especie, los resultados más sobresalientes se asociaron a los efectos en la salud y función inmune de los bovinos, durante los períodos de estrés, no sólo disminuyendo los niveles circulantes de cortisol, sino también aumentando la producción de inmunoglobulinas (Chang y Mowat, 1992; Moonsie-Shageer y Mowat, 1993).

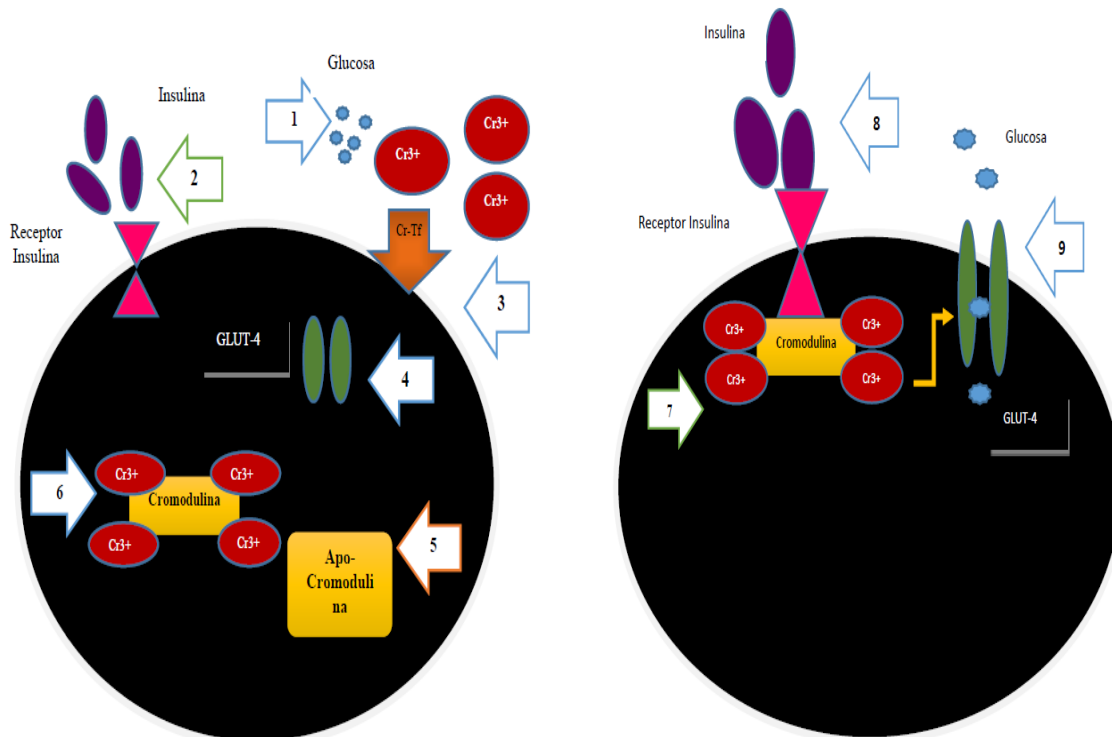
2.3 Función biológica del Cr³⁺

Para describir los mecanismos de acción del Cr, se propuso que este mineral traza aumenta la fluidez de la membrana celular para facilitar la unión de la insulina a su receptor (Evans y Bowman, 1992). Recientemente, el Cr se caracterizó como un componente del mecanismo de amplificación celular de señalización de la insulina, es decir, un factor que contribuye en el aumento de la sensibilidad de los receptores de insulina en la membrana plasmática (Vincent, 1999). Al mecanismo sobre la participación del Cr en la acción de la insulina, llamado inicialmente *sustancia que une al cromo de bajo peso molecular*, (LMWCr, por sus siglas en inglés) (Vincet, 2000). El oligopéptido tiene un peso molecular aproximado de 1500 Da y está constituido por cuatro aminoácidos (glicina, cisteína, glutamato y aspartato), además enlaza a cuatro iones de Cr, aceptándose que juega un papel crítico en la modulación de la acción de la insulina sobre sus receptores; este péptido parece estar ampliamente distribuido en tejidos de mamíferos y se ha aislado a partir de diversas fuentes (Vincent, 2000). La liberación de la *cromodulina* se parece a la secreción hormonal porque se libera en la circulación sanguínea en respuesta a un estímulo que puede ser la hiperglicemia (Vincent, 1999). Debido a la similitud en estructura y función con la calmodulina, recibe el

nombre de *cromodulina*, (cuando se enlaza a cuatro iones de Cr), mientras que en la forma libre de minerales se denomina *apocromodulina*, la cual se encuentra predominantemente en el medio intracelular, concretamente, en el citosol y el núcleo (Vincent, 2000). La acción primaria del Cr, como complejo cromo-cromodulina, es mediante un sistema de auto amplificación de la señal de la insulina por la activación de la región tirosinacinasas en la subunidad beta del receptor de insulina, la cual modifica la captura de glucosa y el metabolismo de los lípidos (Davis y Vincent., 1997).

Está bien documentado que, en respuesta a un aumento de la glucosa en sangre, la insulina se secreta rápidamente en la circulación y se une a la subunidad del receptor, situado en la cara exterior de la membrana plasmática, provocando un cambio conformacional que resulta en la auto-fosforilación de residuos de tirosina en la subunidad α , situada en la cara interna de la membrana. Este cambio desencadena una serie de fosforilaciones en cascada para, de esta forma, estimular la translocación de transportadores de glucosa (GLUT) a la membrana plasmática (Champe y Harvey, 1994).

El modelo propuesto (Figura 1) para explicar la acción de la *cromodulina* como parte del sistema de auto amplificación de la señal de la insulina sugiere que la *cromodulina* se almacena en la forma *apocromodulina* en el núcleo y en el citosol de las células sensibles a la insulina. El aumento de la insulina circulante provoca dos condiciones recurrentes: mayor movilización de Cr, en las células diana, mediada principalmente por la transferrina y la movilización del receptor de la transferrina a partir de vesículas intracelulares a fusionarse con la membrana. Por lo tanto, la transferrina saturada con Cr se une a sus receptores y el complejo formado es internalizado por endocitosis. El pH ácido en el espacio intravesicular favorece la digestión de este complejo y la liberación del Cr en el citosol. Cuatro átomos de Cr^{3+} se unen a la *apocromodulina* por lo que se activa en la forma de *cromodulina*, que a su vez se une al sitio activo en el receptor de insulina, completando la activación y amplificación de la señal de la insulina (Vincent, 2000; Sun *et al.*, 2000) (Figura 1).



Respuesta a un aumento en glucosa (1), la insulina se secreta en la circulación (2). El aumento de la insulina circulante provoca mayor movilización de Cr a las células diana (3). GLUT-4 sin realizar el transporte de glucosa (4). La cromodulina se almacena en forma Apo-cromodulina (5).

Cuatro átomos de Cr^{3+} se unen a la apocromodulina por lo que se activa la forma cromodulina (6), que a su vez se une al sitio activo en el receptor de la insulina (7), completando la activación y la amplificación de la señal de la insulina (8). Una serie de reacciones de fosforilación en cascada produce y estimula la translocación de GLUT-4 a la membrana plasmática (9), esto produce la captación de glucosa.

(Modificado de Palhari, 2014).

Figura 1. Mecanismo de acción de la activación del Cr.

El Cr desempeña funciones adicionales, particularmente en el metabolismo de la glucosa y los lípidos. Así mismo, tiene acción sobre la actividad de la lipoproteína lipasa y hay evidencias de su acción en el metabolismo del colesterol. Los estudios demuestran que al suplementar Cr aumentan las lipoproteínas de alta densidad (HDL) y disminuyen las lipoproteínas de baja densidad (LDL), pero un mecanismo de acción bien definido (Juturu y Komorowski, 2002).

El Cr también está involucrado en el metabolismo de las proteínas mediante la estimulación de la captación de aminoácidos por las células (Kreider, 1999). En ratas, el suministro de dietas deficientes en Cr y proteína, causa menor capacidad para incorporar aminoácidos en proteínas (Mertz, 1987). En el hígado el Cr se une a una proteína en el núcleo celular, participa en la síntesis de ARN y controla la generación de las células hepáticas; por lo tanto, su acumulación en el núcleo induce la síntesis proteínica, se une a la proteína y activa la cromatina nuclear, incrementando así la síntesis del ARN nuclear (Okada *et al.*, 1989). Por lo tanto, el Cr participa en la síntesis de proteína y de ARN y puede ser importante para mantener la integridad del ADN y la expresión de genes (Okada, 1982; Van Heugten y Spears, 1997). El Cr protege el ARN contra la desnaturalización, y podría participar en el mantenimiento de la estructura terciaria de los ácidos nucleicos (Lindemann *et al.*, 1995). El Cr trivalente (III) parece estar involucrado en la estructura y expresión de la información genética en animales. La vinculación del Cr a ácidos nucleicos es más fuerte que en otros iones metálicos (Okada *et al.*, 1982). En ratones el Cr aumenta la síntesis *in vitro* de ARN (Okada *et al.*, 1983), lo cual sustenta la hipótesis de que el Cr tiene efecto en el funcionamiento de los genes. El Cr participa en la expresión de los genes vinculándose a la cromatina y consecuentemente en un aumento en la síntesis de ARN, esto principalmente se debe a la inducción de la proteína unida en los núcleos y a la activación de la cromatina nuclear (Okada *et al.*, 1989).

Otra función del Cr está relacionada con la fuente de aminoácidos para el músculo esquelético y el metabolismo de los ácidos nucleicos (Anderson, 1987; Mooney y Cromwell, 1995). Evans y Bowman (1992) demostraron un aumento en la absorción de aminoácidos y glucosa en el músculo esquelético de ratas que fueron alimentadas con picolinato de Cr. La alteración en la absorción de nutrientes está asociada con la alteración de parámetros de insulina y es Cr-dependiente. Estas observaciones pueden explicar el efecto de tolerancia a la glucosa, así como el aumento en el porcentaje de músculo esquelético reportado por algunos investigadores. El potencial de mejoramiento de la absorción de aminoácidos por células musculares es benéfico para la deposición total de proteína. Roginski y Mertz (1969) afirmaron que la suplementación con Cr intensifica la incorporación de aminoácidos dentro de proteínas del corazón, así como la absorción de aminoácidos en tejidos de ratas.

2.4 Fuentes de cromo

Algunos productos ricos en Cr son la carne, cereales y sus subproductos, chícharos, brócoli, guisantes, levadura de cerveza, en contraste, los alimentos altos en azúcares simples son bajos en Cr y tienden a aumentar su excreción (Lukaski, 1999). La determinación de Cr en los alimentos es técnicamente complicada, por lo tanto, la información disponible del nivel de Cr en alimentos, forrajes y subproductos es variable y escasa. Los forrajes de corte y harinas de carnes son más altos en Cr que los granos y fuentes proteicas vegetales, pero los niveles de Cr pueden mayores en forrajes como el ensilado de maíz (Bunting, 1994) (Cuadro 2).

Se han evaluado diferentes métodos para suplementar el Cr en especies pecuarias como el cerdo, en esta especie, se indica que la forma química del Cr influye en la respuesta productiva, siendo la forma orgánica, la que produce un mejor desempeño sobre las formas inorgánicas (Bunting *et al.*, 1994; Jeejeebhoy, 1999). Algunas de las fuentes de Cr orgánico que se utilizan en raciones para animales son levadura de cerveza, levadura-Cr, picolinato de Cr, nicotinato de Cr, quelatado de Cr con aminoácidos y proteinato de Cr. La fuente natural de Cr más rica es la levadura de cerveza, pero su nivel es bajo, 1-2 mg kg⁻¹ de MS. Ese nivel es aún menor si se considera que solamente la mitad de esa concentración está presente como Cr biológicamente activo (Mowat, 1997). La levadura de Cr consiste de FTG biológicamente sintetizado y contiene el nivel más elevado de Cr con 1000 mg kg⁻¹ de MS. Sin embargo, no todo el Cr forma parte de la molécula de FTG. La levadura-Cr tiene al mineral encapsulado en las células de la levadura y ofrece la ventaja para los rumiantes de sobrepasar el rumen, evitando así pérdidas por degradación, precipitación o formación de complejos con otros compuestos. Hay también varios complejos bioactivos de Cr que han sido sintetizados, entre los que se encuentran el picolinato de Cr, nicotinato de Cr y quelatos de Cr con aminoácidos. Estas fuentes sintéticas tienen una mayor pureza y consistencia que la levadura-Cr, siendo el picolinato de Cr el más utilizado en experimentos. Su composición consiste en tres moléculas de ácido picolínico ligadas al Cr lo que ha mejorado la absorción y el transporte de Cr y otros minerales por su gran capacidad de formar quelatos (Evans, 1989). Ambos ácidos, picolínico y nicotínico, son derivados del triptófano y aunque muestran estructuras químicas semejantes, sus diferencias biológicas son muy marcadas cuando forman parte del picolinato

o nicotinato de Cr, respectivamente (Evans y Pauchnik, 1993). Los Cuadros 2 y 3 muestran el contenido de Cr en forrajes, subproductos y otros alimentos.

Cuadro 2. Contenido de Cr en forrajes y subproductos alimenticios para animales.

Alimento	Cr, ppm
Maíz	0.91
Salvado de trigo	0.63
Harina de carne	0.80
Harina de pescado	0.63
Harina de soya	0.15
Levadura de cerveza	1.00

Subiyatno (1994): citado por Mowat (1997).

Cuadro 3. Contenido de Cr en los alimentos convencionales para humanos.

Alimento	Humedad (%)	Contenido de cromo ($\mu\text{g/g}$) ²
Frijol	69.60	0.0200
Carne	53.60	0.0822
Huevo	69.50	0.0219
Tortilla de maíz	45.90	0.0337
Leche	89.20	0.0086
Azúcar	2.00	0.0004
Tortilla de trigo	27.70	0.0553
Café	99.30	0.0012
Papas	52.90	0.0435
Tomate	94.00	0.0412
Sodas	99.80	0.0211
Pan de trigo	31.40	0.0488
Queso fresco	59.00	0.1641
Sopa pasta	77.70	0.1147
Arroz	72.60	0.0139
Naranja	86.30	0.0263
Lechuga	94.90	0.0517
Plátano	74.30	0.0264

²Base seca.

Grijalva *et al.* (2001).

2.4.1 Beneficios del cromo orgánico

Las formas orgánicas del Cr trivalente, a saber, FTG, picolinato de Cr, complejos sintéticos de Cr y niacina son bioactivas y una vez absorbidas activan a la insulina (Mowat, 1997). Estas fuentes orgánicas de Cr son absorbidas más eficiente y rápidamente que las inorgánicas, tales como el óxido y el cloruro de Cr, las que por su baja absorción se usan como marcadores en estudios de digestibilidad aparente *in vivo*. Además, las fuentes de Cr inorgánico no tienen ninguna actividad biológica sino hasta que son convertidas a complejos orgánicos como el FTG. El Cr trivalente orgánico tiene 50 veces más actividad biológica que el Cr trivalente inorgánico (McDowell, 1992). Posiblemente la diferencia en la actividad biológica entre fuentes orgánicas e inorgánicas de Cr se debe a la velocidad de paso más rápido en las orgánicas hacia el interior de la célula. Sin embargo, el contenido total de Cr (orgánico más inorgánico) en la dieta tiene poca relación con su actividad biológica debido a que las fuentes inorgánicas de Cr no son bioactivas y su absorción es baja.

El Cr inorgánico exógeno es absorbido por el organismo del hombre y animales en niveles muy bajos (0.4 a 3%) (Anderson y Kozlowski, 1985; Anderson, 1987). Por otra parte, el Cr en forma orgánica de quelatos se asimila mejor por el organismo. Chang *et al.* (1994) observaron que el coeficiente de absorción para el Cr quelado varió de 10 a 25%. El quelato puede definirse como el complejo formado entre un ligante y un ión metálico, donde el ligante (o agente quelante) debe contener grupos funcionales capaces de donar un par de electrones para poder combinarse a través de una unión covalente con un metal, entre las formas de Cr orgánico (o quelado) más usadas se encuentran el picolinato de Cr (Pic-Cr); el cromo niacina (Cr-Niac); el cromo levadura (Cr-Lev) y el cromo metionina (Cr-Met) (Langwinsky y Patino, 2002).

2.5 Uso del cromo en la producción (nutrición) animal

Durante la década de los años 90's se realizaron varios estudios con fines zootécnicos en especies pecuarias, el principal interés de estas investigaciones fue aprovechar los efectos lipolíticos de las sales de Cr sobre el crecimiento y producción de carne más magra. Los resultados positivos obtenidos en los estudios en cerdos (Page *et al.*, 1993) promovieron su uso en el ganado bovino productor de carne y leche, en esta especie, los resultados más sobresalientes se asociaron a los efectos en la salud y función inmune de los animales, durante

los períodos de estrés, no sólo disminuyendo los niveles circulantes de cortisol, sino también aumentando la producción de inmunoglobulinas (Chang y Mowat, 1992; Moonsie-Shageer y Mowat, 1993).

2.5.1 Efecto del cromo orgánico en la respuesta productiva de cerdos

Actualmente hay literatura disponible que demuestra que el Cr en los cerdos de engorda ejerce diferentes efectos sobre la eficiencia del crecimiento, características de la canal y calidad de la carne durante los diferentes períodos de la engorda (Sales y Jancík, 2011). El análisis de la información a través de los estudios de metaanálisis ha permitido evaluar la influencia del tipo de suplementación con Cr sobre el crecimiento y calidad de la canal de cerdos en diferentes etapas de crecimiento con resultados científicamente válidos (He *et al.*, 2023).

Efecto en la ganancia diaria de peso (GDP). La ganancia de peso diaria es una medida esencial del crecimiento de los cerdos, que se ve afectada por múltiples factores, tales como la raza, la dieta y el manejo de la granja (Lu *et al.*, 2015). La suplementación con Cr orgánico de las dietas para cerdos mejora significativamente la GDP de lechones destetados y los cerdos en fases de crecimiento-finalización, los resultados son consistentes entre las investigaciones realizadas (Linderman *et al.*, 2004). Los efectos se han atribuido a que la suplementación con Cr aumenta los niveles de ARNm de la hormona del crecimiento en el suero sanguíneo promoviendo una mayor la secreción de esta hormona (Lukaski, 1999).

Por otra parte, la función principal de Cr es facilitar la unión de la insulina a sus receptores en la membrana celular (Al-Qatati *et al.*, 2012). Las células sensibles a la insulina, a su vez, capturan más glucosa, en consecuencia, hay una mayor cantidad de energía, la cual es destinada para aumentar la ganancia de tejido magro y reduciendo la grasa en la canal, por lo tanto, debido a que la deposición de tejido adiposo es menos eficiente que la deposición de tejido muscular (Spacek *et al.*, 2007), la suplementación dietética de Cr en los cerdos mejora la eficiencia alimenticia y reduce los costos de alimentación (Iskra *et al.*, 2016).

Además, el Cr es un componente activo del factor de tolerancia a la glucosa, que aumenta la fluidez de la membrana celular, potencializa la acción de la insulina, promueve la unión de la insulina a sus receptores, mejora la sensibilidad celular a la glucosa y acelera la conversión de tiroxina en triyodotironina (Varady and Hellerstein, 2007). Por lo tanto, el Cr es indispensable para el metabolismo de los carbohidratos, lípidos y proteínas como compuesto esencial en la formación del factor de tolerancia a la glucosa. Además, el Cr aumenta el contenido del factor de crecimiento I similar a la insulina I, que desempeña un papel clave en la tasa de crecimiento de los cerdos y en la utilización de nutrientes (Bin-Jumah *et al.* 2020).

De acuerdo con el metaanálisis de He *et al.* (2023), los resultados mostraron que la adición de Cr orgánico a la dieta de cerdos mejoró significativamente la GDP de lechones destetados ($p < 0.001$) y de cerdos en engorda en crecimiento-finalización ($p < 0.001$). Asimismo, las distintas fuentes de Cr orgánico tuvieron diferentes influencias sobre la GDP de lechones destetados; el orden de grado de influencia fue: nicotinato de Cr ($p < 0.001$) > picolinato de Cr ($p < 0.001$) > Cr de levadura ($p = 0.162$); mientras para cerdos en engorde en fase de crecimiento y finalización, el orden de grado de influencia en la GDP fue el siguiente: picolinato de Cr ($p = 0.042$) > metionina de Cr ($p = 0.007$) > propionato de Cr ($p = 0.232$) > levadura de Cr ($p = 0.852$), con alta heterogeneidad en los cerdos de estas fases del engorde.

Efecto en el consumo voluntario diario de alimento (CVA). Los resultados del efecto de adicional Cr orgánico en la dieta de cerdos indican que este aditivo no produce un aumento rápido en la ingestión diaria de alimento tanto de los lechones destetados como de los cerdos en crecimiento-finalización; por lo tanto, no hay una acumulación excesiva de grasa, pero se mantiene un consumo de alimento ligeramente alto. Esto se debe principalmente al hecho de que el Cr puede mejorar la tolerancia del cerdo a la glucosa, estimular la absorción de la glucosa por los tejidos y acelerar la tasa de eliminación de la glucosa en la sangre, reduciendo así el nivel de glucosa en la sangre y, finalmente promoviendo el consumo de alimento (Abdourahman y Edwards, 2008).

El efecto del Cr orgánico sobre el CVA de lechones destetados y de cerdos en crecimiento-finalización, utilizando el modelo de efectos aleatorios para su cálculo, indica que aumentó de forma significativa. Del mismo modo, según el análisis de subgrupos del impacto de diversas formas de Cr orgánico en el CVA de lechones destetados, la fuente de levadura de Cr tuvo el mayor impacto en los lechones destetados ($p < 0.001$), mientras que el picolinato de Cr ($p = 0.051$) tuvo el impacto más significativo en el CVA de cerdos en engorde en crecimiento-finalización. También se observó que la heterogeneidad fue baja ($p = 0.436$) (He *et al.*, 2023).

Efecto en la conversión alimenticia (CA). La relación del consumo de alimento con la ganancia de peso es una variable importante para medir la conversión del alimento consumido en ganancia de peso del cerdo. La suplementación con Cr en la dieta de cerdos en engorda puede mejorar significativamente la conversión alimenticia con ahorro importante de alimento por kg de ganancia de peso de los lechones destetados; lo anterior coincide con los resultados de la investigación de (Xu *et al.*, 2017); en contraste, según el metaanálisis de (He *et al.*, 2023) el Cr suplementario no ha tenido un impacto significativo en la CA de los cerdos en la fase de crecimiento-finalización. La reducción del índice de CA puede deberse a un menor consumo de alimentos o a un aumento de la producción de carne. Por lo tanto, queda demostrado que agregar Cr al alimento puede mejorar la eficiencia productiva, la conversión alimenticia y la remuneración y, por lo tanto, aumentar los beneficios económicos.

En condiciones de alta heterogeneidad ($p = 0.016$), el suministro de Cr orgánico tuvo un impacto significativo en el índice CA (consumo de alimento/ganancia diaria de peso: CVA/GDP) de lechones destetados ($p = 0.004$), con mejora en su nivel de producción. Sin embargo, no se observó ningún efecto notable en la CA de los cerdos en crecimiento-finalización ($p = 0.878$). Respecto a los efectos de diferentes tipos de Cr orgánico en la CA de lechones destetados, los resultados mostraron que el nicotinato de Cr tuvo el efecto más significativo en la reducción de la CA ($p < 0.001$). De forma similar, el picolinato de Cr fue la fuente más eficaz en la reducción de la CA en los cerdos en crecimiento-finalización ($p = 0.049$) (He *et al.*, 2023).

2.5.2 Efecto del Cr en las características y calidad de la canal de cerdos

La calidad de la canal de los cerdos está estrechamente relacionada con la calidad de su carne. Los resultados del estudio de metaanálisis realizado por (He *et al.*, 2023) muestran que los índices de rendimiento de la canal se pueden mejorar ligeramente después de suplementar Cr a la dieta de cerdos en crecimiento-finalización; sin embargo, este efecto no es significativo. Esto significa que agregar Cr en la dieta no puede aumentar significativamente el rendimiento de la canal o el espesor de la grasa dorsal de cerdos en crecimiento-finalización. En contraste, la regulación de la proporción magra de la canal, así como el área del músculo del lomo son significativas, lo que significa que el Cr puede mejorar notablemente la proporción magra de la canal y el área del ojo de la chuleta de los cerdos en crecimiento-finalización. Esto se debe a que la suplementación con Cr puede promover la descomposición de grasas y aumentar la síntesis de proteínas, reducir el nivel de colesterol circulante en la sangre, promover la síntesis de cortisol y mejorar la calidad de la canal y de la carne. Estos hallazgos son consistentes con los resultados de estudios anteriores reportados en la literatura (Xiao *et al.*, 2012; Matthews *et al.*, 2001; Tian *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2017).

Efecto del Cr en el rendimiento de la canal (RC). Los resultados del metaanálisis, con la información de 35 publicaciones, llevado a cabo por He *et al.* (2023), con el modelo general aleatorio, sobre el impacto general de diferentes fuentes de Cr orgánico en el rendimiento (%) de la canal de cerdos en engorde en las fases de crecimiento-finalización y el correspondiente análisis de subgrupos, indicó que el efecto general fue considerable, pero no significativo ($p=0.989$), además, la fuente Cr levadura tuvo el mayor efecto en el RC, pero sin ser significativo ($p=0.484$). Asimismo, los resultados de la prueba de heterogeneidad, después del análisis de subgrupos, no fueron significativos ($p=0.365$).

Efecto del Cr en la proporción magra de la canal (PMC). El modelo de efectos aleatorios indicó una mejora en la proporción magra de la canal de los cerdos en crecimiento-finalización, con significación estadística ($p=0.020$); además, el análisis de subgrupos mostró que la fuente picolinato de Cr ($p=0.198$) tuvo mayor impacto en la PMCI de los cerdos de engorde (He *et al.*, 2023).

Efecto del Cr en el depósito de grasa dorsal de la canal (DGDC). Con el modelo de efectos aleatorios para el cálculo debido a la alta heterogeneidad, los resultados mostraron que el Cr orgánico redujo el espesor de la grasa dorsal de la canal de los cerdos en crecimiento-finalización ($p=0.142$). Asimismo, el análisis de subgrupos mostró que la fuente picolinato de Cr ($p=0.335$) tuvo el mayor efecto sobre la grasa del lomo (He *et al.*, 2023).

Efecto del Cr en el área del ojo de la chuleta de la canal (AOCh). Según el modelo de efectos aleatorios, el Cr orgánico aumentó significativamente el área del músculo *Longissimus dorsi* de los cerdos en crecimiento-finalización en condiciones de alta heterogeneidad ($p<0.001$). Asimismo, el análisis de subgrupos mostró que la fuente picolinato de Cr ($p<0.001$) tuvo el efecto más significativo en el AOCh de los cerdos en crecimiento-finalización (He *et al.*, 2023).

Selección óptima de la fuente orgánica de Cr para suplementar la dieta de cerdos en engorda. Hay pocos estudios disponibles en la literatura analizada en los que agregaron levadura de Cr a la dieta de lechones destetados, y no se obtuvieron datos del índice de calidad de la canal para este tipo de cerdos. Por lo tanto, solamente se evaluaron y analizaron los efectos de las fuentes orgánicas picolinato de Cr y Cr ácido nicotínico sobre el rendimiento del crecimiento de lechones destetados. Los resultados indican que la adición de Cr ácido nicotínico tuvo el impacto más significativo en el crecimiento de los lechones destetados según la magnitud del efecto. Debido a que pocos estudios, de los 35 analizados, agregaron nicotinato de Cr a la dieta de cerdos en crecimiento-finalización, solamente se consideraron los estudios con picolinato de Cr, propionato de Cr, metionina de Cr y levadura de Cr sobre el crecimiento y calidad de la canal de cerdos en crecimiento-finalización. Los resultados de la evaluación integral mostraron que la fuente orgánica picolinato de Cr fue la forma química más adecuada para complementar la dieta de cerdos en crecimiento-finalización (Cuadro 4) (He *et al.*, 2023).

En el Cuadro 4 se indica la función jerárquica obtenida de cuatro indicadores significativos: ganancia diaria de peso (GDP), consumo diario de alimento (CVA), proporción magra de la

canal (PMC) y área del ojo de la chuleta (AOCh). Los resultados reflejan las puntuaciones de evaluación integral de cuatro fuentes orgánicas de Cr orgánico exógeno.

Cuadro 4. Función jerárquica obtenida de cuatro indicadores significativos de la respuesta productiva de la evaluación integral de cuatro fuentes orgánicas de Cr orgánico exógeno.

Fuentes de Cr orgánico ¹	GDP ²	CVDA ³	PCMC ⁴	AOCh ⁵	Resumen ⁶
Picolinato de cromo	1.000	1.000	1.000	1.000	4.000
Propionato de cromo	0.514	-0.384	0.044	0.158	0.331
Cromo metionina	0.661	0.831	0.475	0.418	2.385
Levadura de cromo	0.093	0.022	0.310	-0.202	0.223

¹Fuentes de cromo orgánico incluidas en la función jerárquica. ²Grado de pertenencia a ganancia diaria de peso. ³Grado de pertenencia a consumo diario de alimento. ⁴Grado de pertenencia a la proporción magra de la canal. ⁵Grado de pertenencia al área del ojo de la chuleta. ⁶Grado de pertenencia (He *et al.*, 2023).

Concentración dietética óptima de suplementación de Cr orgánico para cerdos en engorda. De acuerdo con los resultados del análisis de correlación entre la dosis de suplementación del Cr orgánico con el tamaño del efecto sobre el rendimiento del crecimiento y la calidad de la canal de los cerdos, se logró predecir, de manera integral, la dosis óptima de suplementación con Cr en las dietas de lechones destetados y cerdos en crecimiento-finalización. Según el rendimiento del crecimiento de los lechones destetados, la dosis óptima de nicotinato de Cr fue de 0.125 a 0.150 mg kg⁻¹ de alimento. Sin embargo, debido a la falta de investigaciones con dosis altas, fue imposible predecir si el crecimiento de los lechones destetados cambia cualitativamente a una dosis más alta. La dosis óptima de picolinato de Cr para suplementar cerdos en crecimiento-finalización fue de 0.250 a 0.300 mg kg⁻¹ de alimento (He *et al.*, 2023).

En general, el efecto debido a la suplementación con Cr orgánico sobre el rendimiento del crecimiento de los cerdos en engorda es más significativo en los lechones destetados que en cerdos en crecimiento finalización, lo anterior está relacionado con la etapa fisiológica única de los lechones destetados. Por lo tanto, agregar Cr en la dieta de lechones al destete

puede maximizar el rendimiento del crecimiento. Asimismo, según los resultados de predicción de la curva de dosis efectiva, el índice de rendimiento de crecimiento óptimo se puede lograr complementando 0.125-0.150 mg de Cr kg⁻¹ alimento en los lechones destetados, y para cerdos en crecimiento-finalización, la cantidad óptima de suplementación con Cr es de 0.250 a 0.300 mg Cr kg⁻¹ de dieta (He *et al.*, 2023).

Las fuentes de heterogeneidad en la literatura estudiada de cerdos en engorda pueden atribuirse a tres aspectos: 1) La heterogeneidad en el año de publicación se atribuye a mejoras significativas en la suplementación de Cr orgánico y medición de indicadores con condiciones de prueba más avanzadas; esto significa que los valores de medición en los primeros estudios difieren de las investigaciones realizadas en años más recientes 2) Heterogeneidad en la etapa de crecimiento, es decir, lechones en etapa de destete y cerdos de engorde en fase de crecimiento y finalización, se redujo mediante análisis de subgrupos para la mayoría de los indicadores y; 3) Heterogeneidad en el período de suplementación, que se refiere a la duración de la suplementación con Cr, tiene un efecto significativo en la ganancia diaria de peso (He *et al.*, 2023).

2.5.3 Efecto del Cr en el metabolismo de minerales

En la literatura disponible hay escasos estudios sobre el efecto de la suplementación con Cr en el metabolismo de otros minerales. La relación Cr con Fe ha sido investigada desde que se hizo evidente que ambos minerales son transportados por la transferrina (Vincent, 2000). Por ejemplo, a baja saturación de Fe, el Cr y el Fe se unen a diferentes sitios, pero si la concentración de Fe es alta, ambos elementos compiten por los mismos sitios de enlaces. De Acuerdo con Ani y Mostaghie (1992), el Cr puede afectar el metabolismo del Fe, la homeostasis del Fe también se ha reportado por otros autores, la alteración más significativa fue detectada cuando se suplementó con PicCr (Lukaski *et al.*, 1996). La alteración del metabolismo del Fe al suplementar Cr fue reportada por Anderson *et al.* (1996), quienes encontraron disminución en las concentraciones de Fe en los tejidos.

El metabolismo de minerales con deficiencia de Cr, inducida experimentalmente en cabras, fue estudiada a detalle por Frank *et al.* (2000) para evaluar las concentraciones de los

minerales Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Se, Sr, V y Zn en tejidos y fluidos como el hígado, riñones, costillas y plasma sanguíneo. Estos autores observaron una concentración renal de Cu 43% más baja comparada con el control, pero altas concentraciones de Al, Co y V en riñones e hígado. Los autores atribuyen el aumento del contenido de estos minerales a la disminución en la concentración de Cr, causando subsecuentemente la liberación de sitios de enlace en la transferrina. Una disminución en la pérdida de algunos microelementos (Zn, Fe, Cu, Mn) durante el estrés, después de la suplementación con Cr en ratones, fue reportada por Schrauzer *et al.* (1986). La interacción del Cr y el Cu fue estudiada por Stahlhut *et al.* (2006); la suplementación con Cr no tuvo efecto en el contenido de Cu en hígado o plasma de vacas, sin embargo, el Cr suplementado resultó en altas concentraciones de Cu en terneros en el día 279. Pechova *et al.* (2002) detectaron altas concentraciones de Cu plasmático en respuesta a la suplementación con Cr en toros de engorda. Las interacciones entre el Cr, Ca y Mg fueron reportadas por Moonsie-Shageer y Mowat (1993), quienes mencionaron que la suplementación con Cr estaba asociada a incrementos en la concentración de Ca y Mg en el día 7 de la prueba.

2.6 Composición química de la carne

La carne es el producto pecuario de mayor valor. Posee proteínas y aminoácidos, minerales, grasas y ácidos grasos, vitaminas y otros componentes bioactivos, así como pequeñas cantidades de carbohidratos. Desde el punto de vista nutricional, la importancia de la carne deriva de sus proteínas de alta calidad, contienen todos los aminoácidos esenciales, minerales y vitaminas de elevada biodisponibilidad (FAO, 2013).

El Codex Alimentarius define a la carne como “todas las partes de un animal que han sido dictaminadas como inocuas y aptas para el consumo humano o se destinan para este fin”. La composición química de la carne puede variar de acuerdo con la especie, el músculo, la edad, el tipo de alimentación y el sexo del animal, pero en términos generales el músculo *L. dorsi* contiene: 76.6-77.7% de agua, 21.25-23.12% de proteínas, 2.0-7.9% de grasa intramuscular, 0.18 a 0.20% de P, y 0.02 a 0.91% de mioglobina (Cuadro 5).

Cuadro 5. Composición química del músculo *L. dorsi* de especies pecuarias adultas.

Componente	Conejo	Ovino	Cerdo	Bovino	Ballena
Agua (% libre de grasa)	77.0	77.0	76.7	76.8	77.7
Grasa intramuscular (%)	2.0	7.9	2.9	3.4	2.4
Proteína Cruda (N*6.25)	3.4(21.25)	3.6(22.5)	3.7(23.12)	3.6(22.5)	3.6(22.5)
P soluble total (%)	0.20	0.18	0.20	0.18	0.20
Mioglobina (%)	0.02	0.25	0.06	0.50	0.91

Adaptado de Lawrie (1998).

2.7 Calidad de la carne

La “calidad” es un término complejo de definir, el concepto de “calidad” más aceptado es el que la define como “*la adecuación al uso*”, es decir, la capacidad de un producto para satisfacer las expectativas del consumidor. En el caso de un alimento, la calidad contempla diferentes conceptos:

1. Calidad higiénico-sanitaria: Libre de contaminación microbiana y de sustancias tóxicas.
2. Calidad nutritiva: Que aporte los nutrientes necesarios para satisfacer las necesidades del organismo.
3. Calidad organoléptica: Que durante su consumo, ofrezca, percepciones satisfactorias de carácter sensorial.
4. Calidad tecnológica: que mantenga las características necesarias para el desarrollo de determinados procesos de transformación en la industria de manejo y de conservación.
5. Calidad de servicio: que posea ciertas cualidades culinarias o cierto formato de presentación que permita que sea fácil de preparar y /o consumir.
6. Calidad simbólica: que posea ciertas características que el consumidor asocie con una mayor calidad (producto fresco vs a congelado, imagen de una determinada marca, etc.).

Atendiendo a las distintas definiciones de calidad existen diversos parámetros y atributos indicativos de la calidad de la carne, como son el pH, el color, el contenido de pigmentos, la flora bacteriana, la capacidad de retención de agua, la composición química y energética, los niveles de oxidación lipídica, propiedades de textura, atributos sensoriales como olor, sabor

y aromas percibidos durante la masticación. Dichos atributos de calidad no pueden considerarse independientes, ya que están muy relacionados entre sí y su interacción proporciona las características globales de calidad de carne (Sierra, 2010).

2.7.1 pH muscular

El pH de la carne está determinado por la concentración de ácido láctico producido a partir del glucógeno durante de glucólisis muscular anaerobia (Lawrie, 1998). El valor de pH es la característica de calidad de la carne más importante ya que afecta directamente a la estabilidad y propiedades de las proteínas, de su valor final (medido generalmente a las 24 horas post-mortem) así como la velocidad de caída del mismo durante la transformación del músculo en carne, afectan a las características organolépticas (color, jugosidad, etc.) y tecnológicas de la misma (capacidad de retención de agua, capacidad de conservación). (Sañudo, 1991). El pH del tejido muscular del animal vivo es prácticamente neutro. Cuando el animal muere, cesa el aporte sanguíneo de oxígeno y nutrientes al músculo, el cual debe utilizar sus reservas de energía para sintetizar ATP con el fin de mantener su temperatura e integridad muscular. Conforme se reducen los niveles de ATP se genera simultáneamente fosfato inorgánico, que a su vez estimula la degradación de glucógeno a ácido láctico mediante la glucólisis anaerobia (Garrido *et al.*, 2005). La formación de ácido láctico y de otros ácidos orgánicos provoca un descenso del pH muscular que continua hasta que se agotan las reservas de glucógeno o hasta que se inactivan las enzimas que rigen el metabolismo muscular (Lawrie, 1998). Debido a la relación que existe entre el descenso del pH y la transformación del músculo en carne, la determinación de este parámetro constituye una buena medida para conocer el proceso de maduración y valorar la calidad de la carne como producto final del mismo (Purchas, 1990). Hay dos circunstancias en la evolución del pH de los animales sacrificados que producen alteraciones en la calidad de la carne, las cuales son conocidas como carnes PSE (pale, soft, exudative) y DFD (dark, firm, dry), cuyas características han sido ampliamente estudiadas (Galian, 2007). En el Cuadro 6 se pueden observar estas características.

La medida de los valores de pH sobre los diferentes músculos de la canal tiene como finalidad comprobar la evolución de este parámetro durante los procesos de transformación

en carne. Por esta razón, se utilizan para su medición tiempos cercanos a la obtención de la canal a los 45 minutos del sacrificio (pH₄₅) y a las 24 horas post mortem (pH₂₄), ya que este es el momento cuando se alcanza el pH más bajo, a partir de aquí se mantiene o comienza a subir, según la temperatura ambiental (Oliver *et al.*, 1991).

La medida de los valores de pH sobre los diferentes músculos de la canal tiene como finalidad comprobar la evolución de este parámetro durante los procesos de transformación en carne. Por esta razón, se utilizan para su medición tiempos cercanos a la obtención de la canal a los 45 minutos del sacrificio (pH₄₅) y a las 24 horas post mortem (pH₂₄), ya que este es el momento cuando se alcanza el pH más bajo, a partir de aquí se mantiene o comienza a subir, según la temperatura ambiental (Oliver *et al.*, 1991).

Cuadro 6. Características de las carnes PSE (pálida, blanda, exudada) y DFD (oscura, dura, seca).

Características	Carne PSE	Carne DFD
Glicólisis, caída del pH	Muy elevada	Lenta e incompleta
Valor de pH	pH 45min < 5.8	pH 24h > 6.2
Color	Claro, pálido	Oscuro
Consistencia	Blanda	Dura, firme
Capacidad de retención de agua	Escasa	Elevada
Pérdida por oreo	Alta	Baja
Terneza	Disminuida	Aumentada

Hoffmann (1987).

2.7.2 Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua (CRA) es la propiedad que posee la carne para retener su agua constitutiva tanto durante la aplicación de fuerzas externas como por otros tratamientos (Jason and Yancey, 2013). Esto es importante, ya que pérdidas o ganancias de agua afectan al peso y valor económico de la carne. El contenido y distribución del agua influyen en las propiedades de la carne y de sus productos derivados, estando relacionada con la textura, terneza y color de la carne cruda y con la jugosidad y firmeza de la carne cocinada (Offer *et al.*, 1989). La carne cruda de los mamíferos inmediatamente después del sacrificio contiene, por término medio un 75% de agua (Lawrie, 1998), este porcentaje que

varía con la especie de procedencia y el músculo que se considere. Parte de esta agua se pierde por evaporación durante el enfriamiento de las canales (las de bovino pierden hasta un 2% de su peso) o por goteo, como consecuencia de la disección de tejidos (según el grado de partición de la carne puede perderse hasta un 6%, el cual puede duplicarse tras la descongelación y que puede ser mayor aún en las carnes PSE). Las mayores pérdidas de agua, sin embargo, se producen en el cocinado de la carne, pérdidas que pueden superar el 40%. Las pérdidas de agua por evaporación de la superficie de las canales se producen durante el enfriamiento de estas, por diferencias de presión de vapor. La evaporación afecta al aspecto de la carne, disminuyendo su aceptabilidad por parte del consumidor. La evaporación se produce fundamentalmente a partir de la superficie de la carne, siendo prácticamente insignificante más allá de unos milímetros hacia el interior, pero el contenido de agua de la superficie puede disminuir en un 33%, con el correspondiente incremento en la concentración de sales y proteínas (Offer y Knight, 1988).

El 70% del agua constitutiva de la carne fresca se encuentra localizada en las miofibrillas musculares, el 20% en el sarcoplasma y el resto en el tejido conjuntivo. Del total de agua del músculo un 4-5% se encuentra asociada a los grupos polares de la proteína, lo cual se conoce como “*agua ligada*”. Este grado de unión depende de la solubilidad proteica y esta a su vez del estado de las proteínas miofibrilares y del pH. Así el agua ligada permanece fuertemente unida a las proteínas, incluso cuando se aplican fuerzas externas sobre el músculo. A medida que esta aleja de los grupos reactivos de las proteínas se disponen moléculas de agua unidas por fuerzas de menor intensidad, la cual se denomina “*agua inmovilizada*” y la cantidad que se desprende depende de la intensidad de la fuerza externa aplicada sobre el músculo. El agua que se mantienen unida a la estructura del músculo únicamente por fuerzas superficiales se denomina “*agua libre*” y se libera fácilmente del mismo al aplicar una fuerza externa (Jason y Yansey, 2013).

Los cambios en la CRA afectan al agua que se denomina “*inmovilizada*” y no tienen ninguna relación con el “*agua de constitución*” (fuertemente ligada a grupos específicos de la molécula o ubicada en regiones intersticiales) ni tampoco con el “*agua de interfase*”. El término “*agua ligada*” incluye tanto el agua de constitución como el agua de interfase

próxima a las proteínas, y el resto de las fracciones se consideran "*agua inmovilizada*" (en la superficie de las proteínas, en buena medida fijada a sus cargas) (Hamm, 1986). Solamente tratamientos muy severos (deshidratación a altas temperaturas) afectan al agua ligada.

Hay múltiples procedimientos para medir la CRA de la carne. Considerando la forma en que el agua está presente en el músculo y los distintos mecanismos que la retienen en él, Hamm (1986) propuso cuatro métodos para su determinación:

1. Pérdidas por goteo (drip loss), determinadas por la formación de un exudado sobre la carne, sin aplicación de fuerzas externas.
2. Pérdidas por descongelación (thawing loss), que originan un exudado sobre la carne tras su congelación y descongelación, sin aplicación de fuerzas externas.
3. Pérdidas por cocinado (cooking loss), consistente en fluidos liberados tras el calentamiento de la carne sin aplicación de fuerzas externas.
4. Jugo exprimible (squeezing juice) de la carne no calentada (incluso de la descongelada), mediante aplicación de fuerzas externas originadas por métodos de compresión, centrifugación o succión.

2.7.3 Color

El color de la carne es un parámetro esencial para definir su calidad, la carne puede ser rechazada por el consumidor por su color sin valorarse otras propiedades como su aroma, textura, jugosidad o sabor. Por lo tanto, el color del producto cárnico es una variable de gran importancia para la industria cárnica, su apariencia es crucial para que el consumidor muestre un alto grado de aceptabilidad (Shackelford *et al.*, 1992; Kramer, 1994), sin embargo, en la aceptación del color influyen factores de tipo geográfico, social y cultural, por lo que la generalización en este parámetro es compleja.

El color de la carne depende de la concentración de pigmentos hemínicos (principalmente mioglobina) (Cuadro 7), del estado químico de la mioglobina en su superficie, de la estructura y estado físico de las proteínas musculares, así como de la proporción de grasa de infiltración o marmoleo (Warris *et al.*, 1990). El color rojizo de la carne es el resultado de la presencia

del pigmento mioglobina, proteína conjugada con un grupo prostético llamado *hemo*, el cual contiene hierro, que juega un papel primordial en las distintas coloraciones. Este pigmento se presenta en diversas formas: la oxihemoglobina, de color rojo brillante, la meta mioglobina de color café y la mioglobina reducida de color rojo púrpura; las altas concentraciones de oximioglobina son deseables ya que confieren el color rojo brillante, asociado a la carne de óptima calidad (Ranken, 2003). Los cambios de color dependen de la cantidad de este pigmento y de sus cambios químicos. Cuanto mayor presencia de mioglobina, más oscura será la carne, por otra parte, el cambio de color de la carne está vinculado a la presencia o ausencia de aire, debido a la sensibilidad de los pigmentos a la oxigenación y oxidación; la superficie de los cortes frescos va cambiando de tonalidad debido al estado oxigenado de este pigmento (Cañeque y Sañudo, 2005).

Por otra parte, el hierro puede cambiar de su forma ferrosa a férrica y los microorganismos compiten por el O₂ y oxidan los pigmentos de la carne fresca. La habilidad de la mioglobina para combinarse con el oxígeno se pierde cuando las proteínas de la carne se desnaturalizan por el calor, por esta razón la carne cambia de color durante la cocción. Otra causa de cambios en los colores normales es la presencia de microorganismos en la superficie de la carne lo que ocasiona una oxidación de la misma (Guerrero *et al.*, 2002). El color de la carne no está asociado con la terneza o suavidad de la misma, en general, cuanto más oscura sea la carne, más intenso será su sabor.

La percepción del color es única y exclusiva para cada individuo consumidor, por lo tanto, había una gran dificultad para comunicar subjetivamente un color específico, sin tener una base de referencia, de tal forma que las primeras medidas de color se realizaron basadas en estándares por medio de comparación. Actualmente, para la identificación exacta de un color, hay muchos instrumentos que asignan valores numéricos, los cuales hacen objetiva esta propiedad de la carne. La Comisión Internacional de la Iluminación (Commission International de l'Eclairage- CIE) definió el sistema más importante y más usado en la actualidad para describir la coloración, el sistema está basado en el uso de observadores y fuentes de iluminación estándar (Giese, 1995). El método de referencia ampliamente utilizado para la medición del color es el descrito por Honikel (1997, 1998). La ventaja de

utilizar este espacio de color (CIE-Lab) es su similitud con la uniformidad visual humana. El sistema obtiene los valores triestímulo CIE en relación con el espectro visible, definiendo tres colores primarios: rojo (X), verde (Y) y azul (Z). A partir de ellos se calculan matemáticamente las coordenadas de color: L* (luminosidad), a* (rojo-verde), b* (amarillo-azul). El parámetro L* varía de 0 (negro) a 100 (blanco), el valor de a* puede ser positivo (+a*>0, rojo) o negativo (-a*<0, verde) y el valor de b* puede ser positivo (+b*>0, amarillo) o negativo (-b*<0, azul). La coordenada L* se relaciona con la valoración visual del consumidor (Murray, 1989). El color de la carne también depende de factores como el pH, capacidad de retención de agua, humedad, integridad de la estructura muscular y, en menor medida, del grado de oxidación de los hemopigmentos (Sayas, 1997). El contenido de grasa es otro factor a tener en cuenta sobre esta coordenada, ya que a mayor contenido de grasa en carne de aves, cerdo y ternera mayores valores de L*. La coordenada a* (rojo-verde) está relacionada con el contenido de mioglobina, y la coordenada b* (amarillo-azul) ha sido relacionada con los distintos estados de la mioglobina (Pérez-Álvarez *et al.*, 1998).

Cuadro 7. Valores promedio de los parámetros de coloración L*, a* y b* en diferentes músculos de cinco especies pecuarias.

Especie/Raza	Músculo	L*	a*	b*
Bovino ¹	<i>Longissimus dorsi</i>	39.1	17.1	7
Bovino ²	<i>Longissimus thoracis</i>	32.2	23.4	13.2
Pollo ³	<i>Pectoralis</i>	57.0	7.44	15.9
Cerdo ⁴	<i>Longissimus dorsi</i>	57.0	7.44	15.9
Cerdo ⁵	<i>Semimembrano</i>	63.17	8.12	2.13
Conejo ⁶	<i>Biceps femoralis</i>	52.08	3.47	4.40
Corderos (raza Segureña) ⁷	<i>Longissimus dorsi(machos)</i>	40.38	12.64	2.88
Corderos (raza Segureña) ⁷	<i>Longissimus dorsi(hembras)</i>	38.10	12.70	3.05
Corderos (Santa Inés) ⁸	<i>Longissimus dorsi</i>	42.62	14.17	7.22
Ovinos (HampshireXSuffolk) ⁹	<i>Longissimus dorsi</i>	41.39	16.55	8.6
Ovinos (Pelibuey) ⁹	<i>Longissimus dorsi</i>	42.18	17.29	8.11
Ovinos (Pelibuey) ¹⁰	<i>Longissimus dorsi</i>	36.77	12.76	11.65

¹Rubio *et al.* (2005); ²Gil *et al.* (2001); ³Holownia *et al.* (2003); ⁴Norman *et al.* (2003);

⁵Ondřej *et al.* (2013); ⁶Pla *et al.* (1998); ⁷Cano *et al.* (2003); ⁸Rodríguez *et al.* (2008); ⁹Torres (2013); ¹⁰García *et al.* (1998).

El color de la carne puede modificarse por factores de tipo fisiológico y del mismo proceso, tales como la especie pecuaria (los bovinos poseen mayor concentración de mioglobina que los porcinos); el contenido de mioglobina en los ovinos es aproximadamente 0.25%; el sexo (los machos poseen mayor contenido de mioglobina que las hembras y que los machos castrados); la cantidad y tipo de fibras musculares, las características genéticas y la edad (los animales viejos producen carne de color marrón) (Díaz, 2001). En el Cuadro 7 se muestran los parámetros de color en diferentes músculos de distintas especies pecuarias.

2.7.4 Textura

La mayoría de los consumidores de carne consideran a la dureza o suavidad como el factor más importante que determina su calidad. Esto puede ser debido a que cuando se habla de carne, con frecuencia se usan indistintamente los términos textura y dureza o terneza (suavidad), y conviene aclarar que no son sinónimos. La textura es una propiedad sensorial, mientras que la dureza y terneza son atributos de la textura (Chrystall *et al.*, 1982). La textura de la carne se percibe como un conjunto de sensaciones táctiles resultado de la interacción de los sentidos con las propiedades físicas y químicas, entre las que se incluyen, la densidad, la dureza, la plasticidad, la elasticidad, la consistencia, la cantidad de grasa, la humedad y el tamaño de las partículas de la misma. Es común que el consumidor considere mayor importancia a la terneza, la cual es antagónica de la dureza, como principal atributo de la textura, siendo uno de los criterios determinantes de la calidad de la carne (Lawrie, 1998).

Dos fracciones proteicas determinan la terneza, por una parte, están las proteínas del tejido conjuntivo y, por otra, las proteínas miofibrilares. Las primeras están constituidas por el colágeno, la elastina y la reticulina, constituyen un elemento negativo que reduce la terneza. El colágeno es el principal componente del tejido conjuntivo, determina la dureza de base, ya que cuanto mayor es su contenido, más dura es la carne. No obstante, Hill, (1966) señala que es la solubilidad del colágeno el factor más importante a considerar al hablar de terneza. La segunda fracción proteica implicada en la terneza, son las proteínas miofibrilares, cuyas transformaciones *post mortem* son responsables de las variaciones de esta cualidad, hay estrecha relación entre la terneza y el grado de concentración de miofibrillas. Herring *et al.*

(1967) demostraron que la dureza de la carne está relacionada con la contracción de las fibras musculares.

Sobre la terneza influyen tres componentes (Van Hoof, 1981). En primer lugar, está el tamaño de los paquetes de fibras contenidas en el músculo, ya que los diferentes tipos de fibras musculares presentan diferentes capacidades de contracción y de retención de agua y por lo tanto, reaccionan de distinta forma a las temperaturas que determinan la cocción y la refrigeración. En animales de talla grande, como el ganado bovino, estos paquetes son mayores que en animales más pequeños como el cordero o el cerdo. En segundo lugar, inciden sobre la dureza la longitud del sarcómero y de las miofibrillas, de tal forma que cuanto mayor es su contracción mayor es la dureza. Por último, como se ha mencionado, influye el contenido y naturaleza del tejido conjuntivo. Un mayor contenido de colágeno implica mayor dureza, sobre todo si está muy polimerizado, lo cual disminuye su solubilidad (Touraille, 1978).

Adicionalmente, la actividad enzimática depende de la temperatura, en consecuencia, a medida que la temperatura *post mortem* disminuye, la actividad de las enzimas que actúan en el proceso de degradación miofibrilar (calpaína y calpastatina), disminuye también; por lo tanto, la degradación miofibrilar, la cual está correlacionada con la menor dureza de la carne, se ve reducida (Miller, 1989). El grado de ablandamiento de la carne es proporcional con el contenido y actividad de las enzimas calpaínas y calpastatinas (Koomaraie, 1992). Asimismo, Shackelford *et al.* (1991) observaron que el inhibidor de las calpains (calpastatina) es el parámetro mejor correlacionado con la dureza de la carne, tras 14 días de almacenamiento refrigerado a 2° C, especulando sobre su función en la regulación de la dureza. El pH de la carne también influye sobre su dureza; algunos estudios han demostrado que la dureza probablemente alcanza su valor más bajo si la glicolisis *post mortem* se verifica a una velocidad intermedia (correspondiente a un valor de pH aproximado de 5.9, 3 horas *post mortem*), y es mayor con una velocidad más lenta o más rápida (Smulders *et al.*, 1990).

Se ha observado que dentro del mismo músculo la dureza también varía, por ejemplo, en el músculo del lomo, la dureza aumenta desde el centro hacia los extremos, debido, sobre todo, al contenido de tejido conjuntivo que contienen. Está establecido que muchos de los

puentes covalentes que unen a las moléculas de tropocolágeno son relativamente lábiles en animales jóvenes y, se hacen más estables, conforme aumenta la edad (Miller, 1990). Varios estudios han mostrado que el endurecimiento es causa del “acortamiento por frío” en ganado bovino. También parecen haber diferencias en cuanto a la dureza debida al factor raza (Sierra *et al.*, 1998), aunque se considera relativamente poco importante, porque, dentro de la misma raza, pueden darse variaciones mayores. El factor sexo tampoco parece tener un efecto especialmente importante. En animales jóvenes Sañudo *et al.* (1996) no encontraron diferencias en la dureza de la carne entre machos y hembras, Dransfield *et al.* (1990) tampoco encontraron diferencias en la dureza de la carne entre machos enteros y castrados, en contraste Alvi (1980) detectó que en los animales enteros la carne era algo más dura que la de los castrados. Dreyer *et al.* (1977) afirmaron que la carne de los machos tiene mayor dureza debido a un mayor contenido de colágeno, y menor contenido de grasa de infiltración que las hembras.

La textura de la carne puede evaluarse por diferentes métodos, algunos son subjetivos por aplicación de test a consumidores y/o paneles a catadores, y otros con características más objetivas, los cuales pueden clasificarse en mecánicos (corte, compresión, penetración), estructurales, químicos y otros (ultrasonido, fluorescencia). Las mediciones objetivas de la textura de la carne tratan de imitar las fuerzas necesarias producidas al morder y durante la masticación. Las mediciones se pueden realizar sobre la carne cruda y cocinada. En el caso de las muestras cocinadas, la temperatura y el tiempo de cocción influyen notablemente sobre la fuerza de deformación de la muestra, por este motivo, la temperatura final de cocción, en el centro de la muestra, debe ser definida y medida con precisión, u valor de 75° C, es la recomendación general. El grosor y peso de las muestras deben ser igualmente constantes. Todas las mediciones de la prueba deben ser siempre claramente definidas en la metodología (Honikel, 1998).

El método más utilizado es el mecánico de corte o cizalla mediante la cuchilla Warner-Bratzler (Warner-Bratzler Shear Test-WBST), la cual mide la fuerza necesaria para cortar una muestra de carne con un área de sección determinada mediante una cuchilla de borde romo. Cuanto mayor es el esfuerzo al corte más dura es la carne. Numerosos factores influyen

en la medición (la temperatura de cocinado, uniformidad de la muestra a analizar, dirección de las fibras musculares, cantidad y distribución del tejido conjuntivo y materia grasa, temperatura de la muestra, y velocidad de la cuchilla Warner-Bratzler). Al momento de evaluar las medidas reflejadas en la curva de la fuerza se debe tener en cuenta el pico máximo de fuerza aplicada (peak force), así como la energía total o fuerza total aplicada (área total bajo la curva), el resultado se expresa en kg por cm² (Galián, 2007).

En el Cuadro 8 se muestran resultados de estudio realizado por Olivas *et al.* (2017) para la variable de fuerza de corte de la carne de cerdo en centros comerciales de dos sectores del municipio de Ciudad Obregón, Sonora en el norte de México.

Cuadro 8. Valores medios de esfuerzo al corte en muestras de carne de cerdo en diez centros comerciales y dos sectores de Ciudad Obregón, Sonora, México.

Muestreos	Esfuerzo al corte Kg ^f	Promedio de Sector
1	2.70	Norte: 3.16
2	3.11	Sur: 2.93
3	2.55	Promedio 3.04
4	3.50	
5	3.27	
Promedio	3.02	

Olivas *et al.* (2017).

2.7.5 Colágeno

El colágeno es la proteína más abundante en el cuerpo de los animales mamíferos; representa 25% del total de la proteína del cuerpo y el 95% de los elementos fibrosos del tejido conectivo, aunque mucha de ella asociada al esqueleto (Pearson y Young, 1989). Desde el punto de vista molecular, el colágeno es una glucoproteína fibrosa, es insoluble en medio neutro y tiene menor contenido de aminoácidos esenciales que las proteínas intracelulares. No contiene los aminoácidos triptófano y cistina, por lo que es de bajo valor biológico, sin embargo, se le considera el principal responsable de la denominada “dureza base de la carne” ya que casi no se ve afectado por la maduración. La unidad funcional del colágeno es el tropocolágeno, formado por tres cadenas polipeptídicas, portadoras de glúcidos (glucosa y

galactosa), enrolladas entre sí en una hélice triple. Las cadenas polipeptídicas están unidas por fuertes enlaces, de ahí que sea una proteína difícilmente degradable por las enzimas digestivas. La proporción de estas uniones incide en la textura de la carne y es diferente de un músculo a otro. Por ello, la textura de la carne, depende del colágeno que contenga y en particular de su rigidez mecánica. Cuanto más grande sea, mayor número de enlaces, mayor resistencia al corte y por lo tanto, mayor será la dureza de la carne. Las cadenas polipeptídicas que forman el tropocolágeno están constituidas por una secuencia conocida de aminoácidos, principalmente por glicocola, que representa un tercio de los aminoácidos de la molécula, prolina, alanina e hidroxiprolina, que representan otro tercio de la molécula y el último tercio que puede incluir casi todos los aminoácidos, dependiendo del tipo de colágeno de que se trate. La hidroxiprolina es el aminoácido característico del colágeno, y es muy poco frecuente en las proteínas, por lo que su cuantificación se usa comúnmente para la determinación del contenido de colágeno en la carne. A la hidroxiprolina se fijan los glúcidos de la molécula de colágeno, además es importante en la formación de los entrecruzamientos en las fibras de colágeno, por lo tanto en la estabilidad de estas. Mediante la cuantificación específica de la hidroxiprolina, se puede calcular, con bastante aproximación, la cantidad de colágeno presente al multiplicar la hidroxiprolina por un coeficiente de transformación que oscila entre 7 y 8, según el tipo de colágeno considerado (Bonnet y Kopp, 1984).

El contenido de colágeno depende de diferentes factores, dentro de la misma especie y raza del animal, también está influenciado por la edad y el tipo de músculo, puede ser hasta tres veces superior en un músculo que en otro (Heinze *et al.*, 1986). Este contenido varía también en un mismo músculo desde la periferia a la parte más interna del mismo. Diversos estudios realizados en animales de abasto aportan información contradictoria respecto a los cambios cuantitativos que se producen en función de la edad, al respecto, Wada *et al.* (1980) indicaron aumento del contenido de colágeno con la edad del animal, mientras que Reagan *et al.* (1976) no encontraron una relación significativa entre ambos factores.

Las propiedades físicas de las fibras de colágeno dependen del número y naturaleza de los enlaces que poseen. Los enlaces serán más o menos lábiles según la temperatura y condiciones del medio (presencia de agua, pH, etc.). El colágeno es una proteína insoluble

en medio neutro, sin embargo, en medio ácido y/o altas temperaturas se produce la hidrólisis de las proteínas y por ello cuando la temperatura aumenta a 70-80° C, el colágeno se transforma en gelatina, la cual está formada por moléculas hidrosolubles de fácil digestión, pero continúa siendo una proteína de bajo valor biológico. Esta desnaturalización térmica del colágeno es debida a la rotura de los enlaces lábiles, lo que se traduce en una contracción fibrilar, hasta alcanzar una temperatura máxima, en la que el número de enlaces rotos es mayoritario. Mediante la rotura de estas uniones las fibras cambian más o menos profundamente su conformación, permitiendo a las moléculas de agua introducirse en el entramado fibrilar y las fibras comienzan a disociarse, produciéndose de esta forma la contracción y solubilidad del colágeno (formación de gelatina) (Díaz, 2001).

La solubilidad del colágeno muscular varía con el músculo, la raza y el sexo (Heinze *et al.*, 1986) pero el factor esencial de variación es el resultado de la polimerización que progresa con el envejecimiento y que explica una parte de las diferencias que se observa dentro de una misma raza. La cantidad de colágeno y sobre todo el estado de estructuración de los componentes del mismo, inciden sobre la dureza de la carne (Díaz, 2001). Con la edad del animal aumenta el estado de reticulación del colágeno (aumenta el número de cruzamientos covalentes), haciendo que las fibras colágenas sean más robustas, provocando una textura más dura de la carne. Los enlaces cruzados son termorresistentes, hecho al que se atribuye el que la cantidad de colágeno solubilizado mediante calentamiento sea superior en los animales más jóvenes, es decir, que la solubilidad del colágeno disminuya con la edad (Hill, 1966).

2.7.6 Lípidos de la carne y la grasa

Las grasas se clasifican comúnmente como grasa de depósito o subcutánea (tejido adiposo intermuscular) y las que forman parte del tejido muscular (grasa intramuscular). Las grasas de depósito se localizan en la capa subcutánea, pero en ocasiones también están presentes en cantidades considerables entre los músculos, como depósitos intermusculares, así como en la cavidad del cuerpo, alrededor de los riñones, pelvis y regiones del corazón (Ramírez, 2004). La cantidad de grasa de cada depósito difiere según la especie (en el cerdo hay más grasa subcutánea que en el bovino), incluso dentro de cada especie, observándose, como en

el caso de ganado bovino de raza lechera, una acumulación predominantemente de grasa interna, mientras que los bovinos más especializados en la producción de carne, acumulan mayor grasa subcutánea, también denominada grasa de cobertura e intramuscular, también llamada grasa de marmoleo (Lister, 1980). Por otra parte, en todas las especies pecuarias hay una relación positiva alta entre el contenido de grasa intramuscular o de infiltración y el de grasa total de la carne. La grasa intramuscular no influye tanto en la calidad de la canal sino en la calidad de la carne, ya que tiene un alto valor por su contribución al aumento del flavor, habiéndose demostrado que en el flavor de la carne *per se* reside su fracción soluble en agua, mientras que las características del flavor y aroma de las especies reside en su fracción lipídica. Otra contribución de los lípidos musculares a la calidad de la carne es la estabilidad frente a la oxidación, influyendo de gran manera en la formación de los sabores desagradables o también llamados “Warmed-over Flavor” (Pearson *et al.*, 1977). Los lípidos intramusculares también influyen en la jugosidad y, por lo tanto, en la terneza de la carne (Pearson, 1966), así como en el color, puesto que un metabolismo más aeróbico de los músculos rojos u oscuros, comparado con los músculos blancos o luminosos, se asocia no sólo con mayores concentraciones de mioglobina, sino también con mayores proporciones de lípidos. Por otra parte, la fracción lipídica, desde el punto de vista nutricional, también contribuye como una fuente de energía, provee nutrientes esenciales (ácidos grasos linoleico, C18:2 y linolénico C18:3 y vitaminas liposolubles A, D, E y K), facilitando su absorción (Linschneer y Vergroesen, 1988).

2.7.7 Ácidos grasos

Los ácidos grasos de la carne, presentes en forma de triglicéridos y fosfolípidos, difieren principalmente, en la longitud de la cadena y los tipos de enlaces de los átomos de carbono. La mayoría de los ácidos grasos de las grasas animales, contienen un número par de átomos de carbono (de 2 a 30), aunque en la grasa de ovinos y bovinos hay ácidos grasos de cadenas impares y ramificadas, además de ácidos grasos *trans* e isómeros posicionales del ácido oleico y linoleico (Enser *et al.*, 1996).

En el Cuadro 8 se comparan la composición en ácidos grasos de la grasa de bovino, ovino y porcino, puede observarse que los músculos del cerdo contienen más ácidos grasos

linoleico y araquidónico que los músculos de bovinos y ovinos. En el Cuadro 9 se muestra información de la composición en ácidos grasos del músculo de bovino, ovino y porcino, puede observarse que la diferencia se debe sobre todo al contenido del ácido graso linoleico en la grasa del cerdo En el Cuadro 8 se comparan la composición en ácidos grasos de la grasa de bovino, ovino y porcino, puede observarse que la diferencia se debe sobre todo al contenido del ácido graso linoleico en la grasa del cerdo (Lawrie, 1998).

Los ácidos grasos saturados mayoritarios en la grasa de origen animal son laúrico (C12:0), mirístico (C14:0), palmítico (C16:0), esteárico (C18:0) y araquidónico (C20:0). Los ácidos grasos monoinsaturados más importantes cuantitativamente son los ácidos palmitoleico (C16:1) y oleico (C18:1); los poliinsaturados, como el ácido linoleico (C18:2), linoleico (C18:3) y araquidónico (C20:4). Los ácidos grasos con un número impar de átomos de carbono mayoritarios en la grasa animal son el pentadecanoico (C15:0) y el heptadecanoico (C17:0) (Body, 1988). En general, los ácidos grasos saturados y monoinsaturados son los mayoritarios en la carne de las especies pecuarias, siendo el ácido oleico el mayoritario en la carne de ovino (Solomon *et al.*, 1992). Así, en el caso de los ovinos, se ha observado que cerca de 36% de la grasa total es saturada, y el resto es mono o poliinsaturada; menos de la mitad de los ácidos grasos son saturados, principalmente esteárico (C18:0), palmítico (C16) y mirístico (C14), relacionados los últimos dos con los niveles de colesterol (Tshabalala *et al.*, 2003).

La grasa que va junto a la carne de ovino, ya sea superficial o intramuscular, presenta un contenido considerable de ácidos grasos insaturados (benéficos). Con gran impacto positivo en la salud humana se encuentra al ácido oleico (C18:1) como el ácido graso insaturado en mayor cantidad, además hay importantes contribuciones de grasas esenciales polinsaturadas como las que proporcionan los ácidos linoleico (C18:2), linolénico (C18:3) y araquidónico (C20:2) (Velasco *et al.*, 2001). Hay también, otros ácidos grasos poliinsaturados, en pequeñas concentraciones, pero de efectos muy benéficos para la salud, como lo son los ácidos grasos omega 3 (ácido eicosapentanoico (EPA), el decosaheptanoico (DHA) y el ácido linoleico conjugado (CLA), cuya síntesis solo se realiza en los animales rumiantes, siendo los ovinos los que presentan las más altas concentraciones (Cuadros 9 y 10). La importancia de estos

ácidos grasos radica en sus efectos como protectores de enfermedades cardiovasculares y propiedades anticancerígenas, necesarios para desarrollar funciones vitales en el hombre ya que estos no pueden ser sintetizados por el propio organismo, por lo tanto, deben ser aportados con la dieta (Santos, 2002).

Cuadro 9. Composición típica de ácidos grasos de la grasa de bovino, ovino y cerdo.

Ácido graso	% de ácido graso en la grasa		
	Bovino	Ovino	Cerdo
Palmítico	29.0	25.0	28.0
Esteárico	20.0	25.0	13.0
Hexadecenoico	2.0	-----	3.0
Oleico	42.0	39.0	46.0
Linoleico	2.0	4.0	10.0
Linolénico	0.5	0.5	0.7
Araquidónico	0.1	1.5	2.0

Lawrie (1998).

Cuadro 10. Composición típica de ácidos grasos de los músculos de bovino, ovino y cerdo.

Ácido graso	% de ácido graso en la grasa		
	Bovino	Ovino	Cerdo
Laurico	0.1	0.3	0.1
Mirístico	2.7	3.3	1.3
Palmítico	25.0	22.2	23.2
Hexadecenoico	4.5	2.2	2.7
Esteárico	13.4	18.1	12.2
Oleico	36.1	32.5	32.8
Linoleico	2.4	2.7	14.2
A-Linolénico	0.7	1.4	1.0
Araquidónico	0.6	0.6	2.2

Lawrie (1998).

Los animales monogástricos, como en el caso del cerdo, acumulan en los depósitos grasos importantes cantidades de los ácidos grasos esenciales linoleico (C18:2) y linolénico (C18:3) de la dieta. En el caso de los rumiantes, el origen de estos ácidos grasos también es exógeno, pero su hidrogenación por los microorganismos del rumen conduce a un aumento en el

contenido del ácido esteárico (C18:0) (Smith, 1993). La presencia de los ácidos grasos insaturados cis-14:1, cis-16:1, cis-17:1 y cis-18:1 está directamente relacionada con la actividad del complejo enzimático Δ -desaturasa, que sintetiza ácidos grasos insaturados a partir de las correspondientes cadenas carbonadas saturadas de igual número de átomos de carbono (Thompson *et al.*, 1973). Los ácidos grasos son importantes en diferentes procesos tecnológicos de la calidad de la carne, poseen diferentes puntos de fusión, la variación en la composición en los ácidos grasos tiene un efecto importante en la firmeza o blandura de la carne, especialmente en la grasa subcutánea e intermuscular, pero también en la intramuscular. Dentro de los ácidos grasos de la serie de 18 átomos de carbono, el ácido esteárico (C18:0) funde a 69.6 °C, ácido oleico (18:1) a 13.4 °C, el ácido linoleico (18:2) a -5 °C y el ácido linoleico (18:3) a -11 °C, por ello, al aumentar el nivel de insaturación, disminuye el punto de fusión. Los grupos de adipocitos que tienen grasa solidificada, con un elevado punto de fusión, aparecen más blancos que aquella grasa líquida, con un punto de fusión más bajo, de manera que el color de la grasa es otro aspecto de calidad, afectado por los ácidos grasos. La habilidad de los ácidos grasos insaturados para oxidarse rápidamente, especialmente aquellos con más de dos dobles enlaces, es importante para regular el periodo de vida útil de la carne (enranciamiento y deterioro del color) (Wood *et al.*, 2004).

3. JUSTIFICACIÓN

La producción intensiva de carne de cerdos es una actividad mundial muy importante en las cadenas agroalimentarias; en México, en el año 2021, considerando una población de 130.3 millones de mexicanos, el consumo per cápita de carne fue de 73.3 kg (5° lugar mundial: pollo=35, cerdo=20.8, bovino=15.3=pavo=1.4, ovino=0.6 y cabra=0.3 kg); el consumo nacional aparente de carne fue de 9,543,031 ton (6° lugar, 3.4% del consumo mundial), pero la producción fue de 7,599,503 ton. (6° lugar mundial: 48% pollo, 28% cerdo y 22% bovino), en el mismo año se exportaron 574,065 ton., y se importaron 2,517,593 ton., por lo tanto, se importó 33.1% de la producción y 26.4% del consumo, para satisfacer la demanda anual, ocupando el tercer lugar entre los países que más importaron carne. Para estar en posibilidades de producir la cantidad de carne de cerdo necesaria para cubrir la demanda interna, e incluso exportar a otros países, es imprescindible elevar la productividad, y, sobre todo, producir carne de mejor calidad, que pueda competir con los estándares que ofrece el mercado internacional, el cual ejerce una presión cada vez más fuerte por su alta competitividad y eficiencia (Consejo Mexicano de la Carne, 2021).

Por otra parte, la preferencia actual del consumo de carne magra ha aumentado y ha disminuido considerablemente el consumo de grasa en productos de origen animal, por su asociación con enfermedades cardiovasculares; la carne de cerdo no ha sido la excepción, por lo tanto, se han buscado nuevas técnicas de alimentación que mejoren el comportamiento productivo, las características de la canal y calidad de la carne, favoreciendo la deposición de proteína y la reducción de grasa (Consejo Mexicano de la Carne, 2021).

El Cr es un micronutriente esencial, necesario para el metabolismo de carbohidratos, lípidos y proteínas (Mertz, 1993); fue aceptado como elemento traza indispensable en animales de laboratorio desde 1959. Su función más importante es aumentar la adhesión de la insulina a la superficie de la membrana celular y la introducción de glucosa, ácidos grasos y aminoácidos a la célula (Anderson, 1998).

Diversas investigaciones sugieren que la suplementación con diferentes concentraciones y fuentes orgánicas de Cr en la dieta de cerdos destetados y en la fase de crecimiento y finalización promueve efectos significativos en el crecimiento y características de calidad de

la canal como lo muestra en metaanálisis realizado por (He *et al.*, 2021). Mayorga *et al.* (2019) consignaron que la suplementación con Cr orgánico (CrPic) puede beneficiar el desempeño de los cerdos en fase de crecimiento en condiciones de estrés, aunque el Cr no tuvo efectos en la concentración sanguínea de glucosa, insulina, AGNE, colesterol, triglicéridos, o proteína fijadora de lipopolisacáridos.

El Cr dietético aumenta los parámetros tradicionales de productividad de los animales de granja mediante el aumento de la acción de la insulina en los tejidos adiposo y muscular, sensibles a esta hormona (Davis y Vincent, 1997). Sin embargo, aunque se han observado inconsistencias (Kim *et al.*, 2009; Seibert *et al.*, 2018), está demostrado que el Cr dietético estimula el consumo de alimento (Hayirli *et al.*, 2001; Hung *et al.*, 2014) y mejora el crecimiento, las características de la canal y el rendimiento reproductivo en las especies pecuarias (Lindemann *et al.*, 1995; Soltan, 2012). Además, estudios previos indican una mejora de la función inmune con la suplementación de Cr (Burton *et al.*, 1993; Horst *et al.*, 2018), aceptando que el Cr suministrado en la dieta puede desempeñar una función importante durante la activación del sistema inmune de las especies pecuarias.

Por otra parte, aunque está aceptada la función esencial del Cr en el metabolismo de los nutrientes del organismo animal, aún no se definen los requerimientos de Cr en dietas para cerdos con diferente genotipo, sexo y nivel de producción; por lo tanto, aún no es posible determinar el nivel biológico óptimo de Cr en la producción de carne de cerdos en engorda intensiva en etapa de crecimiento finalización.

4. HIPÓTESIS

La inclusión de cromo orgánico, a partir de Cr-Metionina, en la dieta mejora el crecimiento, influye en la concentración sérica de los metabolitos (glucosa, creatinina, colesterol, triglicéridos y urea), de las hormonas (insulina, leptina y cortisol) y mejora las características de calidad de la canal en tres genotipos porcinos, machos y hembras, en engorda durante la fase de crecimiento y finalización.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Evaluar la respuesta productiva, las características de la canal y las concentraciones plasmáticas de metabolitos y hormonas, de tres genotipos porcinos, machos castrados y hembras en engorda en crecimiento y finalización: G1=Pelón Mexicano×Yorkshire, G2=Asiático×Pelón Mexicano y G3=Asiático×Yorkshire, sin y con suministro de cromo orgánico (0.250 ppm de Cr L-Met.).

5.2 Objetivos específicos

- a) Evaluar el efecto de suplementar Cr Metionina en la dieta de cerdos en engorda sobre la respuesta productiva.
- b) Medir el efecto de suplementar Cr Metionina en la dieta de cerdos en engorda en la concentración de metabolitos sanguíneos glucosa, creatinina, colesterol, triglicéridos y urea.
- c) Determinar el efecto de la suplementación con Cr Metionina en la dieta de cerdos en engorda sobre la concentración sanguínea de las hormonas, insulina, cortisol y leptina.
- d) Analizar el efecto de suplementar Cr Metionina en la dieta de cerdos en engorda sobre las características de la canal (pesos en caliente y frío, rendimiento, grasa dorsal, grasa interna y área del ojo de chuleta).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Respuesta productiva

El estudio de comportamiento productivo en su fase experimental se realizó en el Centro de Enseñanza e Investigación y Extensión en Producción Porcina de la Universidad Nacional Autónoma de México, ubicado en el km 2 de la carretera Jilotepec-Corrales, municipio de Jilotepec, Estado de México, durante los meses de febrero a junio de 2004.

Como material experimental se usaron ochenta y cuatro cerdos en engorda de tres genotipos: G1=Pelón Mexicano×Yorkshire, G2=Asiático×Pelón Mexicano y G3=Asiático×Yorkshire, con peso vivo inicial promedio de 20.66 ± 0.68 kg (42 machos y 42 hembras), el 50% de los cerdos de cada sexo, fueron asignados de forma aleatoria a los tratamientos: 1) Dieta Basal (DB)+0.0 ppm de Cr y 2) DB+0.250 mg de Cr kg⁻¹ de MS. Los cerdos fueron alojados en corrales de 2 × 3m, con dos o tres animales por corral equipados con comedero de tolva con tres bocas y un bebedero de chupón. La dieta base utilizada fue elaborada de acuerdo a los requerimientos por etapa productiva de crecimiento y finalización de los cerdos (NRC, 1998), con el software APOLLO® de la Universidad de Davies, CA, USA (Cuadro 11).

Se usó el complejo Cromo L-Metionina, en forma de Bio-Chrome® (Co-Factor III Cr³⁺, Alltech, Nicholasville, KY, USA), el cual contiene 1000 mg Cr kg⁻¹, suministrado diario por la mañana a cada cerdo durante las etapas de crecimiento y finalización hasta el sacrificio de los animales por métodos humanitarios de acuerdo con la normativa vigente.

El período de engorda para evaluar la respuesta productiva tuvo una duración de 126 días. El periodo de adaptación a los tratamientos fue de 15 días. La dieta basal (DB) fue suministrada a libre acceso (8:00 am), midiendo la cantidad asignada y rechazada para calcular el consumo por animal por día. Previo al experimento, los cerdos fueron desparasitados (Ivermectina, 1 mL/50 kg PV) y vitaminados (ADE, Vigantol, 1 mL cerdo).

La premezcla Bio-chrome con el Cr se suministró diariamente al momento de asignar el alimento matutino. Los cerdos fueron pesados al inicio y posteriormente cada 15 días, este pesaje se realizó con ayuno de 08 h para reducir el efecto de llenado del tubo digestivo.

Dos veces por semana, se obtuvieron muestras de las dietas base suministradas, la muestra compuesta se secó en horno de aire forzado a 60 °C durante 24 h y se analizó su composición química: contenido de materia seca (MS), proteína cruda (PC), extracto etéreo (EE), fibra cruda (FC) y cenizas, de acuerdo con las técnicas de (AOAC, 1997): método número 930.15, 942.05, 945.16, 984.13 y 962.09. El contenido de P fue analizado por colorimetría en espectrofotómetro de luz ultravioleta (Perkin Elmer, modelo Génesis 20), y el de Ca y Cr fue analizado usando un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 3110 (1982), según las técnicas descritas por Fick *et al.* (1979).

Las variables evaluadas durante la primera fase del experimento fueron las siguientes:

1. **Consumo de materia seca por día y total.** Se obtuvo de la diferencia entre el alimento ofrecido y el rechazado.
2. **Ganancia diaria de peso vivo.** Se determinó al obtener el peso de los animales al inicio y con intervalo de 15 días.
3. **Conversión alimenticia.** Se calculó dividiendo el consumo diario de MS entre la ganancia diaria de peso.
4. **Eficiencia alimenticia.** Se calculó como el cociente entre la ganancia de peso y el consumo de MS x 100.
5. **Peso vivo inicial.** Se obtuvo el peso de los animales al inicio del experimento, previo ayuno de agua y alimento por 14h.
6. **Peso vivo final.** Se obtuvo el peso de los animales al final del experimento, previo ayuno de agua y alimento por 14 h.

Cuadro 11. Composición y análisis químico de las dietas base (DB) en cada etapa de la engorda.

Ingredientes	Composición		Aporte nutricional, % BS ²
	% BS	% BH	
Etapas: crecimiento			MS=88.81
Maíz molido	72.2	72.8	Energía Metabolizable=3.57 Mcal
Harina de soya	14.4	14.3	Proteína cruda=17.02
Harina de canola	5.5	5.3	Extracto etéreo=4.83
Salvado de trigo	4.0	4.1	Fibra cruda=4.19
Premezcla minerales-vitaminas ¹	2.5	2.2	Cenizas=5.20
CaCO ₃	0.6	0.6	Calcio=0.67; Fósforo=0.56
Fosfato de calcio	0.5	0.5	Lisina=0.83
Sal, NaCl	0.3	0.2	Treonina=0.68
Total	100.0	100.0	Triptófano=0.21
Etapas: finalización			MS=88.91
Maíz molido	76.8	77.5	Energía Metabolizable=3.57 Mcal
Harina de soya	7.0	6.9	Proteína cruda=15.58
Harina de canola	7.9	7.6	Extracto etéreo=6.01
Salvado de trigo	5.0	5.1	Fibra cruda=4.19
Premezcla minerales-vitaminas ¹	2.5	2.2	Cenizas=4.50
CaCO ₃	0.6	0.5	Calcio=0.67; Fósforo=0.56
Fosfato de calcio	----	----	Lisina=0.83
Sal, NaCl	0.2	0.2	Treonina=0.68
Total	100.0	100.0	Triptófano=0.21

¹Premezcla minerales y vitaminas (Malta Cleyton®): Macrominerales (%): Ca 22.8; P 9.5; Mg 2.3; Microminerales (mg kg⁻¹): Zn 2,270; Fe 2010; Cu 150; I 3.1; Se 4.6; Vitaminas liposolubles (UI kg⁻¹): A 110.2; D₃ 13.3; E 57.0; Vitaminas complejo B (mg kg⁻¹): Biotina 6.6; Niacina 551.1; Ácido pantoténico 440.9; Riboflavina 132.3; B₁₂ 551.2.

²La dieta basal aportó 0.02 mg Cr kg⁻¹ MS.

6.2 Ensayo metabólico

Para realizar el estudio de metabolismo, de los ochenta y cuatro cerdos en evaluación del comportamiento productivo, alojados en grupos (repeticiones) de dos o tres cerdos por corral, se muestrearon al azar, en la vena yugular, en las semanas 3, 6, 9, 12, 15 y 18, treinta y seis cerdos en total, doce de cada genotipo, seis machos y seis hembras por genotipo, y de cada sexo, tres cerdos que recibieron Cr y tres cerdos del grupo control sin Cr. Para la evaluación de los metabolitos, variables dependientes, se midió la concentración plasmática de glucosa, creatinina, colesterol, triglicéridos y urea; así como la concentración plasmática de las hormonas insulina, cortisol y leptina.

Se usaron tubos vacutainer de 7 mL con fluoruro de sodio y oxalato de potasio. Inmediatamente después de la colección de sangre, las muestras fueron colocadas en hielo y transportadas al laboratorio de Bromatología del Departamento de Nutrición Animal de la FMVZ-UAEM, para ser centrifugadas a 2,000 rpm/15 min., el plasma colectado se almacenó a -20° C hasta su análisis correspondiente en laboratorio.

Los metabolitos evaluados fueron medidos mediante técnicas enzimáticas y reactivos (kits) comerciales, empleando química seca (Equipo Vitros DT60 II de sistema semi-automatizado) mediante el método de fotometría por reflexión, utilizando los siguientes reactivos SLIDE (Johnson and Jonhnson): Película seca, de múltiples capas; Slide Kodak Ektachem DT (GLU), Slide kodak Ektachem DT (BUN/UREA); Slide Kodak Ektachem DT (COL), Slide Kodak Ektachem DT (TRIG).

Las hormonas fueron determinadas en plasma por radioinmunoanálisis (RIA), para las hormonas cortisol e insulina se usaron kits de (Diagnostic Products Corporation, DPC) y para la hormona leptina un kit multiespecies de Linco Research. Los análisis fueron realizados en el laboratorio del CENID Microbiología INIFAP Palo Alto, Cuajimalpa, Ciudad de México.

6.3 Evaluación de las características de la canal

6.3.1 Matanza y faena de los cerdos

El estudio fue aprobado por el Comité de Bioética y se realizó en la Unidad de Docencia e Investigación en Producción Animal del Departamento de Nutrición Animal de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México. Todos los procedimientos del estudio que involucraron el manejo de los cerdos se llevaron a cabo dentro de los lineamientos aprobados por técnicas oficiales locales para el cuidado de los animales en México (NOM-051-ZOO-1995: cuidado humanitario de los animales durante la movilización; NOM-033-ZOO-1995: sacrificio humanitario de animales silvestres y domésticos).

Al concluir la engorda, post evaluación de la respuesta productiva, fases de crecimiento y finalización, los cerdos, después de un período de ayuno de 12 horas fueron pesados para registrar el peso final. Posteriormente fueron transportados un total de 36 cerdos, $PV=104.0\pm0.5$ kg, al taller de carnes de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la Universidad Nacional Autónoma de México, ubicada en el Municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México; donde permanecieron en reposo por 12 h. El peso vivo fue registrado nuevamente inmediatamente antes de proceder a la matanza y faena de los cerdos.

La matanza de los cerdos se realizó por métodos humanitarios (NOM-033-ZOO-1995). Después del aturdimiento eléctrico, las canales fueron desangradas y escaldadas en agua a 65°C. El peso de la canal caliente (PCC) fue obtenido inmediatamente después de haber terminado la evisceración. La canal se mantuvo a temperatura de refrigeración durante 24 horas para su maduración, posteriormente fue pesada para obtener el valor del peso de la canal fría (PCF). Dentro de los 30 minutos post matanza, se hizo un corte transversal en la canal, a nivel de la 10ª y 12ª costillas, se obtuvo una porción de *Longissimus thoracis*, y se midió el área de ojo de chuleta por planimetría. El espesor de la grasa dorsal (GD) fue medido en la línea media de la media canal derecha, a nivel de la 5ª, 10ª y 12ª costillas, con apoyo de una regla metálica. La medición de la grasa abdominal interna se realizó separando manualmente la grasa de los órganos abdominales y registrando su peso (kg).

Los cerdos fueron sometidos a una revisión ante mortem para verificar su estado de salud, no observándose síntomas de morbilidad. Se siguieron todas las normas y procedimientos de un taller de carnes para la transformación de la materia prima en productos elaborados, que comprende el proceso de preparación de la canal y vísceras usadas en la producción de carne de cerdo (NOM-009-Z00-1994).

El peso de la canal caliente (PCC) fue obtenido inmediatamente después de haber terminado la evisceración. La canal se mantuvo a temperatura ambiente durante 12 horas para su maduración; posteriormente fue pesada para obtener el valor del peso de la canal fría (PCF). Las variables a evaluar durante esta fase del experimento fueron las siguientes:

1. **Peso vivo a la matanza.** Expresado en kilogramos.
2. **Peso de la canal caliente (PCC).** Obtenido inmediatamente después de concluir la evisceración.
3. **Peso de la canal fría (PCF).** Obtenido después de mantener la canal a temperatura de refrigeración (4-6° C) por 24 horas.
4. **Rendimiento comercial de la canal (RCC).** Se obtiene al dividir el peso de la canal fría/peso vivo al sacrificio x 100.
5. **Depósito de grasa dorsal (DGD).** A la altura de la 10^a y 12^a costilla se realizó una incisión para medir el espesor de la grasa dorsal con una regla graduada colocada en forma perpendicular a la superficie externa de la canal a 6 cm de distancia de la apófisis dorsal de la vértebra.
6. **Área del ojo de chuleta (*Longissimus thoracis*) (AOCH).** Fue medida en la 6^a, 10^a y 12^a costillas, usando una plantilla cuadrículada propuesta por la Ames, Iowa Cooperative Extensión Service, Iowa State University of Science and Technology, November, 1998. As-235. Tras realizar una incisión a nivel de la sexta, décima y duodécima costillas, se colocó la plantilla sobre la chuleta, cada 20 puntos equivalen a una pulgada cuadrada; se calcula la raíz cuadrada y el valor resultante se multiplica por 2.54, que son los centímetros que comprende una pulgada lineal; finalmente el resultado se elevó al cuadrado para obtener los cm².

6.4 Diseño experimental, modelo y análisis estadístico

6.4.1 Diseño experimental

Se usó un Diseño Experimental Completamente al Azar con arreglo factorial 3x2x2 de tratamientos (Steel *et al.*, 1997), de acuerdo con el siguiente modelo estadístico:

Modelo estadístico: $Y_{ijkl} = \mu + G_i + S_j + Cr_k + G_i * S_j + G_i * Cr_k + S_j * Cr_k + G_i * S_j * Cr_k + E_{ijkl}$

Donde:

Y_{ij} =Variable de respuesta

μ =Media general

G_i =Efecto del i-ésimo genótipo

S_j =Efecto del j-ésimo sexo

Cr_k =Efecto del k-ésimo nivel de genótipo*cromo

$G_i * S_j$ =Efecto de la interacción genotipo*sexo

$G_i * Cr_k$ =Efecto de la interacción genotipo*cromo

$S_j * Cr_k$ =Efecto de la interacción sexo*cromo

$G_i * S_j * Cr_k$ =Efecto de la interacción genotipo*sexo*cromo

E_{ijkl} =Error experimental aleatorio

6.4.2 Análisis estadístico

Los datos fueron analizados bajo el modelo lineal general mediante el procedimiento GLM de SAS (2002).

Para estudiar los cambios a través del tiempo de las variables de la respuesta productiva, del contenido de los metabolitos y de las hormonas en plasma, la información se analizó como medidas repetidas en el tiempo con proc mixed SAS (2002).

Para evaluar las diferencias ($P \leq 0.05$) entre tratamientos, se compararon las medias con la prueba de Tukey (Steel *et al.*, 1997).

7. RESULTADOS

7.1 Respuesta productiva

Los resultados de la respuesta productiva en términos de peso vivo final (PVF), consumo de materia seca (CMS); ganancia de peso (GDP) y conversión alimenticia (CA) se presentan en el Cuadro 12. Se observaron efectos ($P \leq 0.05$) de genotipo, sexo y suministro de Cr en las variables PVF y GDPT, así como de genotipo ($P \leq 0.04$) en el CMST; en general, los G2 y G3, las hembras y el grupo de cerdos con Cr ganaron más peso, pero el G1 consumió más alimento. Las variables GDP, CMS y CA fueron diferentes ($P \leq 0.05$, $P \leq 0.04$ y $P \leq 0.03$, respectivamente), entre los genotipos porcinos evaluados, los G2 y G3 ganaron más peso por día y tuvieron mejor CA. La GDP también fue diferente ($P \leq 0.04$) entre machos y hembras, éstas mostraron mayor GDP. Con respecto al suministro de Cr en la dieta, se observó que mejoró la GDP ($P \leq 0.04$) y la CA ($P \leq 0.05$) de los cerdos. El efecto positivo del Cr promovió que los cerdos tuvieran 4.95% mayor GDP, 4.90% mas GDPT y 3.84% más peso final, pero en la variable de respuesta productiva en donde tuvo más impacto el Cr fue en la conversión alimenticia, ya que disminuyó 7.56% (Cuadro 12); esto indica un ahorro importante en alimento con mejor eficiencia alimenticia de los cerdos en engorda en la etapa de crecimiento y finalización.

7.2 Características de la canal

En el Cuadro 13 se observan los resultados relacionados con las variables de PVF y las características de la canal. Debido a que el PVF fue diferente ($P \leq 0.05$) entre genotipos, sexos y suministro de Cr, esta variable fue considerada como covariable y se procedió a realizar el correspondiente análisis de covarianza. Hubo diferencias por efecto del genotipo porcino en las variables PCC ($P \leq 0.05$), PCF ($P \leq 0.03$), merma ($P \leq 0.05$) y RC ($P \leq 0.05$), en general las canales de los G1 y G2 tuvieron mayor peso, pero su rendimiento comercial fue ligeramente menor al de las canales del G3; también se observaron diferencias entre machos y hembras en las variables PCC ($P \leq 0.03$) y PCF ($P \leq 0.05$), en donde las canales de las cerdas fueron más pesadas, pero el rendimiento comercial de las canales fue similar entre sexos; además, el suministro de Cr en la dieta influyó en los valores de las variables PCC ($P \leq 0.02$), PCF ($P \leq 0.01$) y RC ($P \leq 0.04$), en este caso el Cr en la dieta aumentó significativamente el peso de las canales caliente y fría y mejoró el rendimiento comercial de las canales. El efecto positivo del suministro de Cr en la dieta se

tradujo en mayores pesos de las canales, 6.84% en PCC, 7.0% en PCF, con un 3.05% más en el rendimiento comercial de la canal.

Cuadro 12. Efecto del genotipo, sexo y suministro de Cr Orgánico en la respuesta productiva de cerdos en engorda.

Variable	Genotipo ¹			Sexo		Cr, mg kg ⁻¹ MS		EEM ²	Efectos (Pr ≤) ³		
	G1	G2	G3	Macho	Hembra	0.0	0.250		Gen	Sex	Cr
PVI, kg ⁴	20.60	21.10	20.30	20.8	20.5	20.7	20.6	1.152	ns	ns	ns
PVF, kg	98.59 ^c	104.70 ^b	108.72 ^a	104.70 ^b	108.72 ^a	104.72 ^b	108.74 ^a	9.521	0.05	0.05	0.05
GDPT, kg	77.99 ^c	83.60 ^b	88.42 ^a	83.90 ^b	88.22 ^a	84.02 ^b	88.14 ^a	9.982	0.05	0.05	0.05
CMST, kg	203.56 ^a	193.81 ^c	197.25 ^b	197.20 ^a	198.45 ^a	200.01 ^a	194.04 ^a	10.563	0.04	0.51	0.50
GDP, kg d ⁻¹	0.619 ^c	0.663 ^b	0.702 ^a	0.666 ^b	0.700 ^a	0.667 ^b	0.700 ^a	0.065	0.05	0.04	0.04
CMS, kg d ⁻¹	1.615 ^a	1.538 ^c	1.565 ^b	1.565 ^a	1.575 ^a	1.587 ^a	1.540 ^a	0.165	0.04	0.43	0.38
CA, kg	2.61 ^a	2.32 ^b	2.23 ^b	2.35 ^a	2.25 ^a	2.38 ^a	2.20 ^b	0.247	0.03	0.45	0.05

¹G1=Pelón Mexicano×Yorkshire, G2=Asiático×Pelón Mexicano y G3=Asiático×Yorkshire.

²Error Estándar de la Media.

³NS= No significativo.

⁴PVI: peso vivo Inicial; PVF: peso vivo final; CMS: consumo de materia seca; GDP: ganancia diaria de peso; GDPT: ganancia de peso total; CMS: consumo de materia seca; CA: conversión alimenticia (CMS/GDP).

Respecto al depósito de grasa subcutánea o de cobertura en sus diferentes mediciones, y la grasa interna, los valores medios no fueron diferentes ($P>0.05$) entre los distintos genotipos porcinos evaluados; en contraste hubo diferencias entre machos y hembras en el espesor de la grasa dorsal medida a nivel de la 5^a ($P\leq 0.01$), 10^a ($P\leq 0.04$) y 12^a ($P\leq 0.05$) costilla, en donde las cerdas acumularon más grasa dorsal subcutánea. Con respecto al efecto del Cr, se observó efecto del Cr ($P\leq 0.03$), aunque solamente a nivel de la 12^a C, en donde redujo 13.88% el depósito de la grasa dorsal en la canal de los cerdos.

No se observaron efectos de genotipo, sexo o suministro de Cr en las variables grasa interna, área de ojo de chuleta en la 10^a o 12^a costillas ($P>0.05$).

Cuadro 13. Efecto del genotipo, sexo y suministro de Cr Orgánico en las características de la canal de cerdos en engorda.

Variable	Genotipo ¹			Sexo		Cr, mg kg ⁻¹ MS		EEM ²	Efectos (Pr ≤)		
	G1	G2	G3	Macho	Hembra	0.0	0.250		Gen	Sex	Cr
PVS, kg ³	98.59 ^c	104.70 ^b	108.72 ^a	104.70 ^b	108.72 ^a	104.72 ^b	108.74 ^a	5.598	0.05	0.05	0.05
PCC, kg	78.77 ^b	80.96 ^{ab}	83.87 ^a	80.74 ^b	84.67 ^a	80.45 ^b	85.95 ^a	1.850	0.05	0.03	0.02
PCF, kg	74.76 ^b	77.40 ^a	79.82 ^a	77.26 ^b	80.35 ^a	76.82 ^b	82.20 ^a	1.465	0.03	0.05	0.01
Merma, kg	4.01 ^a	3.56 ^b	4.05 ^c	3.48	4.32	3.63	3.75	0.241	0.05	0.50	0.54
RC, %	75.82 ^a	73.92 ^b	73.41 ^b	73.79 ^a	73.90 ^a	73.35 ^b	75.59 ^a	2.567	0.05	0.42	0.04
GD5 ^a C, cm	4.6 ^a	4.9 ^a	4.5 ^a	4.1 ^b	5.2 ^a	4.7 ^a	4.6 ^a	0.187	0.78	0.01	0.79
GD10 ^a C, cm	3.8 ^a	3.7 ^a	3.8 ^a	3.3 ^b	4.2 ^a	3.8 ^a	3.7 ^a	0.201	0.97	0.04	0.15
GD12 ^a C, cm	3.4 ^a	3.1 ^a	3.5 ^a	3.0 ^b	3.6 ^a	3.6 ^a	3.1 ^b	0.192	0.57	0.05	0.03
GInterna, kg	1.4 ^a	1.4 ^a	1.6 ^a	1.4 ^a	1.5 ^a	1.6 ^a	1.4 ^a	0.106	0.75	0.69	0.34
ACH10 ^a C, cm ²	62.0 ^a	60.0 ^a	61.0 ^a	63.0 ^a	60.0 ^a	62.0 ^a	59.0 ^a	3.512	0.61	0.27	0.20
ACH12 ^a C, cm ²	62.0 ^a	62.0 ^a	63.0 ^a	64.0 ^a	61.0 ^a	63.0 ^a	61.0 ^a	2.890	0.94	0.57	0.15

¹G1=Pelón Mexicano×Yorkshire, G2=Asiático×Pelón Mexicano y G3=Asiático×Yorkshire.

²Error Estándar de la Media.

³PVS= Peso vivo a sacrificio; PCC= Peso canal caliente; PCF= Peso canal fría; RC= Rendimiento comercial (PVS/PCF*100); GD5^aC= Grasa dorsal 5^aC; GD10^aC= Grasa dorsal 10^aC; GD12^aC= Grasa dorsal 12^aC; Grasa abdominal interna; ACH10^aC= Área ojo de chuleta 10^a costilla; ACH12^aC= Área ojo de chuleta 12^a costilla.

7.3 Ensayo metabólico

7.3.1 Metabolitos en plasma

Los efectos de genotipo, sexo y suministro de Cr orgánico en la dieta sobre las concentraciones plasmáticas de glucosa, creatinina, colesterol, triglicéridos y urea durante las semanas 3, 6, 9, 12, 15 y 18 se muestran el Cuadro 14.

Se encontró efecto de la semana ($P \leq 0.01$) y del cromo ($P \leq 0.02$) en las concentraciones de glucosa en plasma, conforme avanzaron las semanas del estudio, en los cerdos que consumieron el Cr en la dieta, bajaron los niveles de glucosa en plasma, en promedio, durante el estudio, el Cr redujo 9.44% (de 86.87 a 78.67 mg dL⁻¹) el contenido plasmático de glucosa (Figura 2).

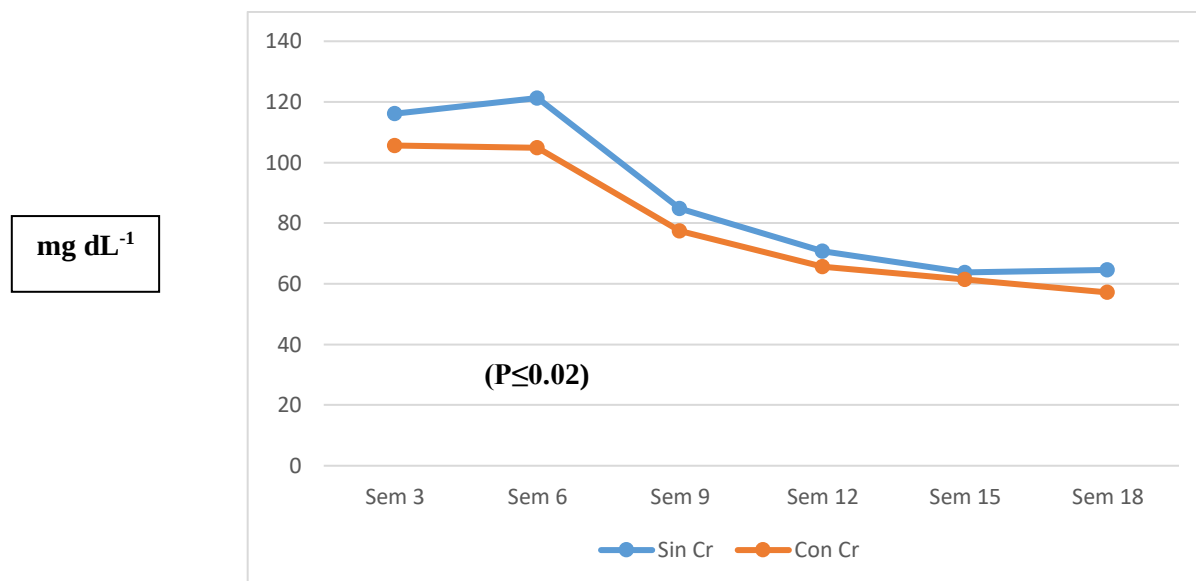


Figura 2. Efecto del suministro de Cr orgánico (0.250 mg kg⁻¹) en la dieta sobre la concentración de glucosa en plasma de cerdos en engorda.

El contenido de creatinina en plasma fue diferente entre las semanas de muestreo ($P \leq 0.01$), además también hubo efecto de la interacción del genotipo con la semana ($P \leq 0.01$). El valor medio del contenido de creatinina fue similar entre genotipos ($P > 0.05$), el efecto de la interacción se muestra en la Figura 3, en la cual se observa que el G1 tuvo los valores más altos a través del tiempo (semanas), excepto en la semana 12 en la que el G2 tuvo el valor más alto que los otros dos genotipos, bajando su contenido en las semanas 15 y 18 con respecto al G1.

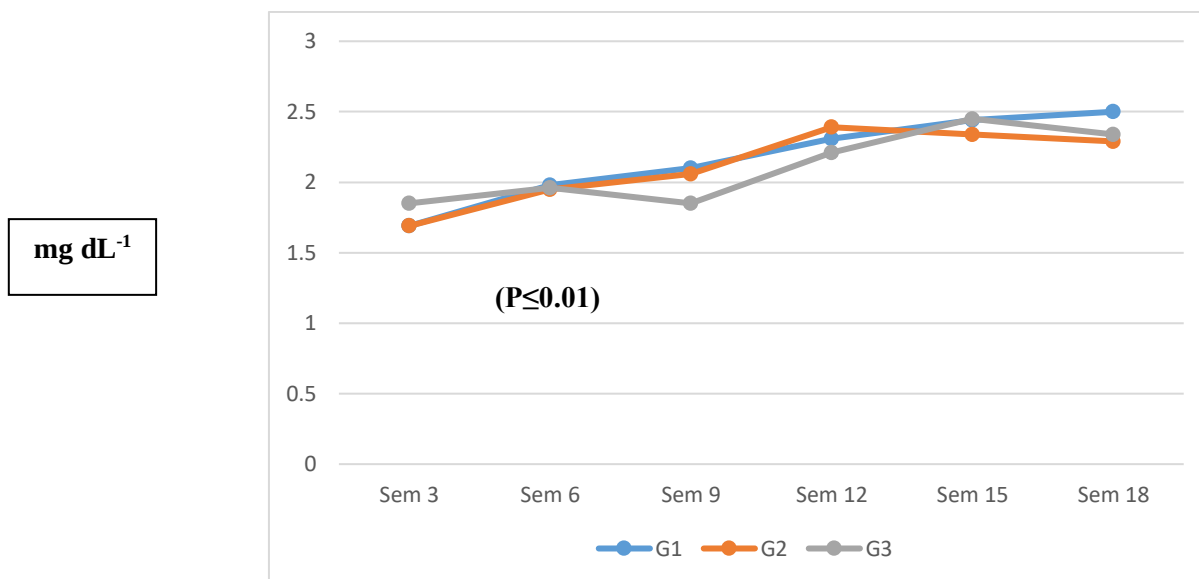


Figura 3. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el genotipo porcino en la concentración de creatinina en plasma.

Respecto al contenido de colesterol en plasma, hubo efecto de semana ($P \leq 0.01$), de genotipo ($P \leq 0.05$), de sexo ($P \leq 0.04$) y de la interacción de la semana con genotipo ($P \leq 0.02$); es decir al aumentar el período de la engorda (semanas) aumento el contenido de colesterol, el valor medio de los tres genotipos fue en el siguiente orden $G1=108.72$, $G2=104.71$ y $G3=98.59$ mg dL⁻¹, pero de la semana 3 a la semana 18 el G2 mostró el mayor aumento (32.84 mg dL⁻¹), en segundo lugar el G3 (21.92 mg dL⁻¹) y en tercero el G2 (14.09 mg dL⁻¹). Las hembras mostraron mayor contenido de colesterol que los machos (100.94 vs 107.07 mg dL⁻¹), que representa 5.73% más. El efecto de la interacción de la semana con el genotipo se puede observar en la Figura 4, en la cual se muestra que el G3 tuvo los valores más altos a través del tiempo (semanas), excepto en la semana 9 en la que el G2 tuvo el valor más alto que los otros dos genotipos, bajando su contenido en las semanas 15 y 18 con respecto al G3.

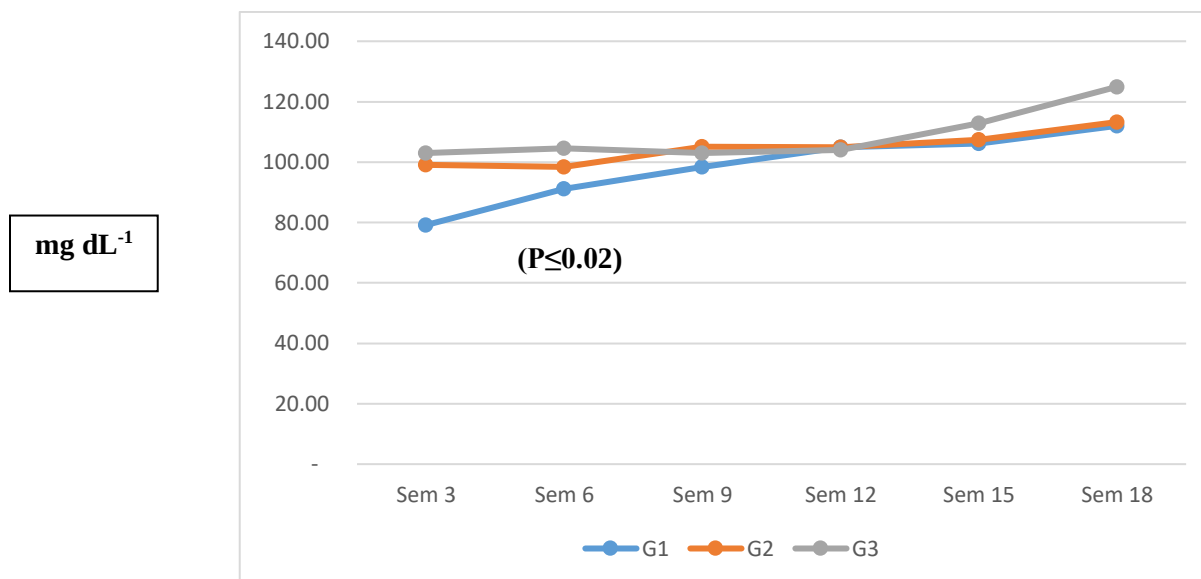


Figura 4. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el genotipo porcino en la concentración de colesterol en plasma.

La concentración plasmática de los triglicéridos fue diferente entre semanas de muestreo ($P \leq 0.01$), en general aumentó su contenido a medida que aumentó el período de engorda; también hubo efecto de las interacciones de la semana con el genotipo ($P \leq 0.02$) y de la semana con el sexo ($P \leq 0.05$) en el contenido de triglicéridos. Los efectos de estas interacciones se muestran en las Figuras 5 y 6. La interacción semana con genotipo se debe, sobre todo, a la tendencia descendiente que tuvo el G3 de las semanas 3 a la semanas 6, 9 y 12 con respecto a los otros genotipos, para posteriormente aumentar su contenido en las semanas 15 y 18. En tanto que el efecto de la interacción semana con el sexo se debe a que en las hembras descendió el contenido de los triglicéridos en la semana 12 y después aumentó en la semana 15, pero terminó por abajo del contenido de triglicéridos de los machos en la semana 18.

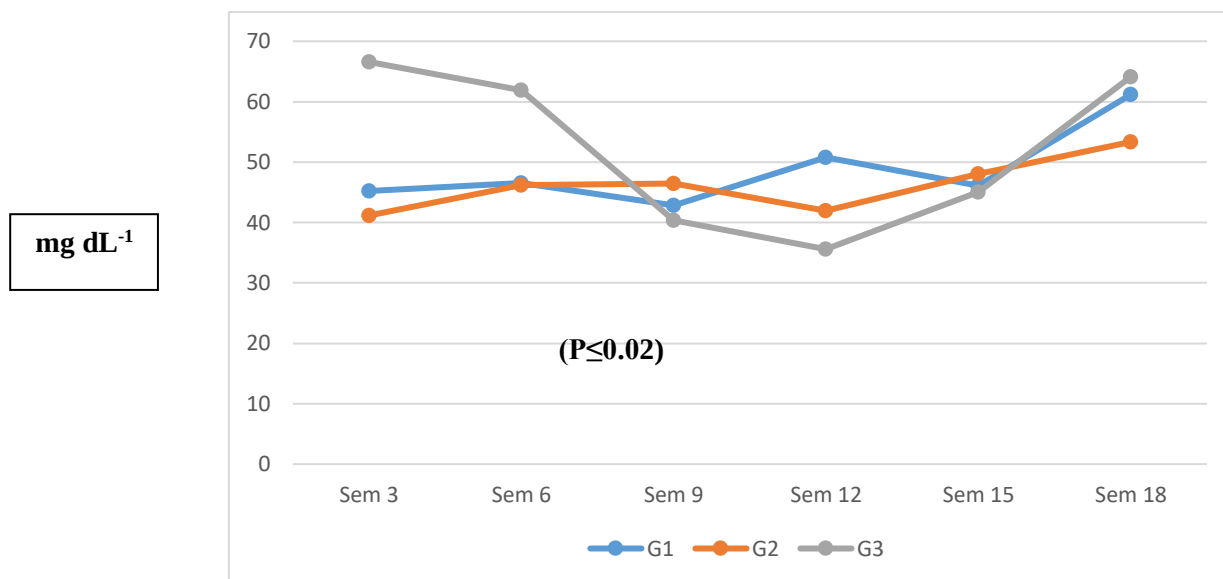


Figura 5. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el genotipo porcino en la concentración de triglicéridos en plasma.

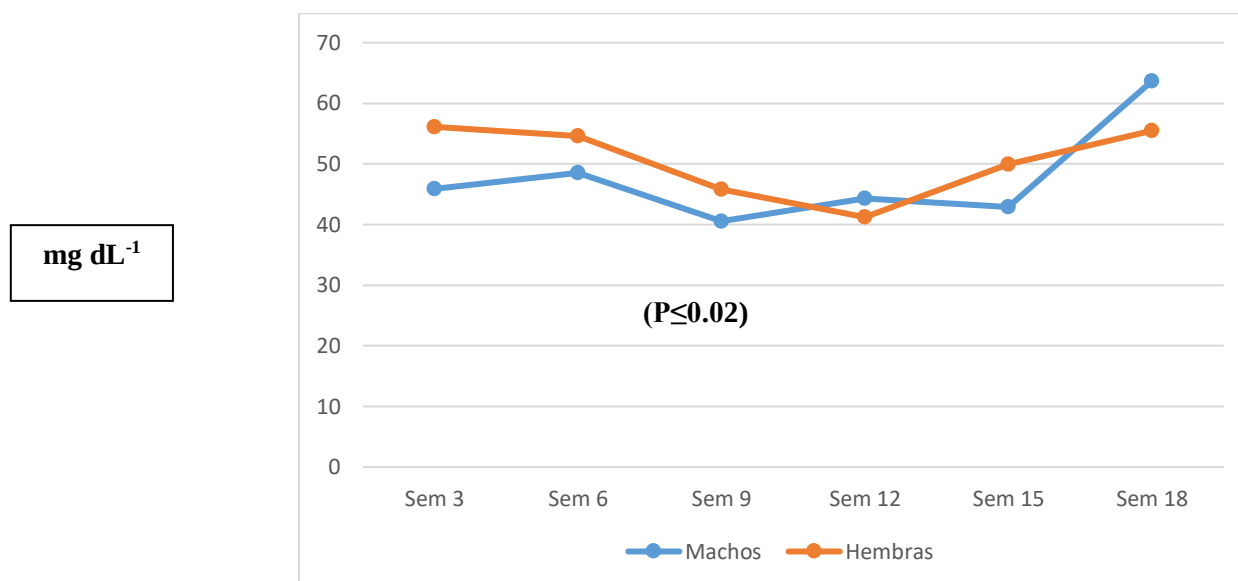


Figura 6. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el sexo de los cerdos en la concentración de triglicéridos en plasma.

En relación con la concentración de urea en plasma, hubo efecto de la semana de muestreo ($P \leq 0.01$) y del genotipo ($P \leq 0.05$), así como de las interacciones de la semana con el genotipo

($P \leq 0.02$) y de la semana con el sexo ($P \leq 0.05$). Las concentraciones de urea tendieron a bajar hasta la semana 12 para posteriormente aumentar en las semanas 15 y 18 en los tres genotipos porcinos. Cabe destacar que los cerdos del G1 tuvieron menores niveles de urea que los otros dos genotipos porcinos.

Los efectos de las interacciones se muestran en las Figuras 7 y 8. La interacción semana con genotipo se debe, sobre todo, a que en la semana 12 el G2 aumentó su contenido de urea por arriba de los otros dos genotipos, pero en la semana 15 descendió y en la semana 18 volvió a aumentar. En tanto que el efecto de la interacción semana con el sexo se debe a que en los machos descendió el contenido de la urea en la semana 9 y después aumentó en la semana 12, y terminó por arriba del contenido de urea de las hembras en la semana 18.

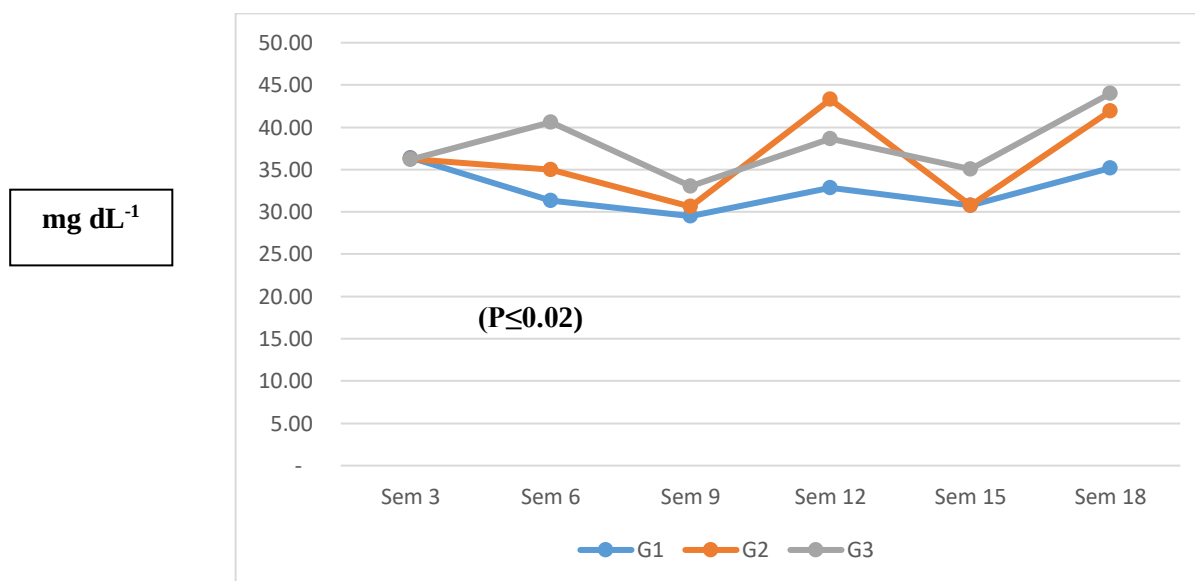


Figura 7. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el genotipo de los cerdos en la concentración de urea en plasma.

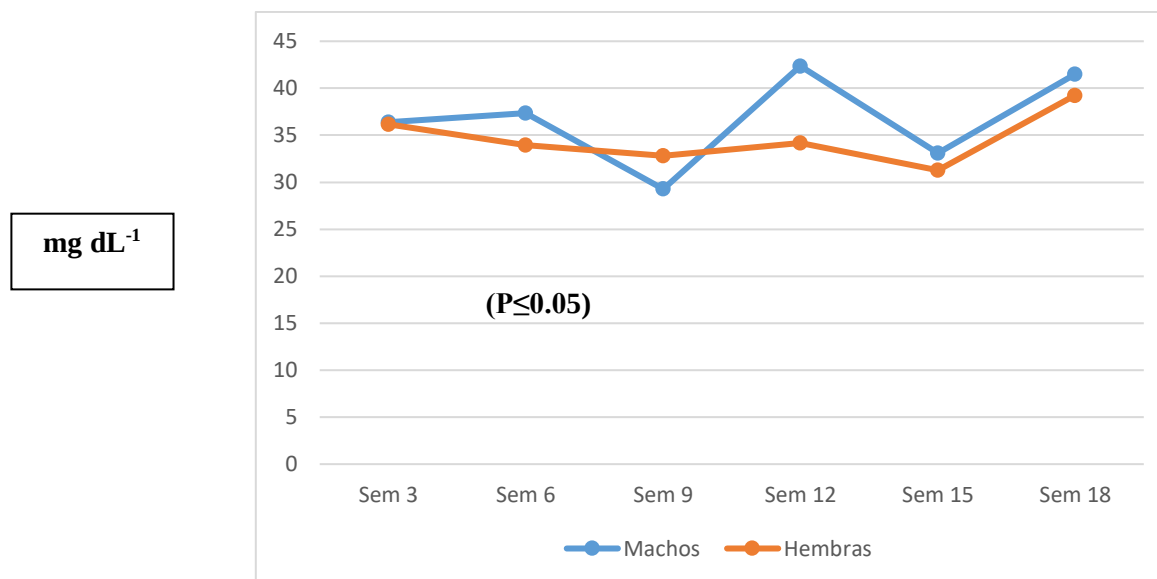


Figura 8. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el sexo de los cerdos en la concentración de urea en plasma.

Cuadro 14. Efecto de genotipo, sexo y Cr orgánico en el contenido (mg dL⁻¹) de metabolitos en sangre de cerdos durante las semanas 3, 6, 9, 12, 15 y 18 de la engorda.

Variable	Genotipo ¹			Sexo		Cr, mg kg ⁻¹ MS	
	G1	G2	G3	Macho	Hembra	0.0	0.250
Glucosa ^{£, ¥}							
Semana 3	109.75	105.58	117.17	104.06	117.61	116.06	105.61
Semana 6	110.83	98.33	129.92	109.00	117.06	121.28	104.78
Semana 9	84.58	82.00	77.00	77.27	85.11	84.88	77.50
Semana 12	60.50	68.33	75.66	69.44	66.88	70.66	65.66
Semana 15	61.16	63.83	62.66	60.05	65.05	63.77	61.33
Semana 18	59.33	57.58	65.75	61.72	60.05	64.61	57.16
Promedio	81.02	79.27	88.02	80.25	85.29	86.87	78.67
EEM ²	6.10			5.07		5.02	
Creatinina ^{£, π}							
Semana 3	1.69	1.69	1.85	1.74	1.75	1.77	1.72
Semana 6	1.98	1.95	1.96	1.96	1.97	2.06	1.87

Semana 9	2.10	2.06	1.85	1.98	2.03	2.05	1.96
Semana 12	2.31	2.39	2.21	2.30	2.31	2.33	2.28
Semana 15	2.44	2.34	2.45	2.42	2.40	2.40	2.42
Semana 18	2.50	2.29	2.34	2.42	2.33	2.38	2.37
Promedio	2.17	2.12	2.11	2.14	2.13	2.16	2.10
EEM²		0.06		0.05		0.05	

Colesterol ^{£, λ, €, π}							
Semana 3	79.16	99.16	103.00	90.05	97.50	92.72	94.83
Semana 6	91.08	98.41	104.50	93.44	102.56	100.06	95.94
Semana 9	98.41	105.17	103.00	97.16	107.22	99.94	104.44
Semana 12	104.83	104.83	104.00	102.61	106.50	103.94	105.17
Semana 15	106.08	107.42	112.92	108.22	109.39	108.44	109.17
Semana 18	112.00	113.25	124.92	114.17	119.28	117.50	115.94
Promedio	98.59	104.71	108.72	100.94	107.07	103.77	104.25
EEM²		3.97		3.40		3.50	

Triglicéridos ^{£, π, ũ}							
Semana 3	45.25	41.16	66.58	45.88	56.11	56.00	46.00
Semana 6	46.58	46.16	61.91	48.50	54.61	56.27	46.83
Semana 9	42.83	46.41	40.33	40.55	45.83	42.22	44.16
Semana 12	50.75	41.91	35.58	44.27	41.22	44.05	41.44
Semana 15	46.08	48.08	45.08	42.88	49.94	47.22	45.61
Semana 18	61.16	53.33	64.13	63.66	55.44	62.16	56.94
Promedio	48.77	46.18	52.27	47.62	50.52	51.32	46.83
EEM²		4.78		4.06		4.09	

Urea ^{£, λ, π, ũ}							
Semana 3	36.41	36.25	36.16	36.38	36.16	35.77	36.77
Semana 6	31.33	35.00	40.62	37.33	33.97	33.55	37.75
Semana 9	29.50	30.62	33.04	29.27	32.83	30.22	31.88
Semana 12	32.83	43.29	38.66	42.36	34.16	39.33	37.19
Semana 15	30.75	30.75	35.04	33.08	31.27	32.30	32.05
Semana 18	35.20	41.91	44.00	41.50	39.25	38.86	41.88

Promedio	32.67	36.30	37.92	36.65	34.61	35.00	36.25
EEM²		2.22		1.86		1.90	

¹G1=Pelón Mexicano×Yorkshire, G2=Asiático×Pelón Mexicano y G3=Asiático×Yorkshire.

²Error Estándar de la Media.

[£]Efecto de semana ($P \leq 0.01$); ^λEfecto de genotipo ($P \leq 0.05$); [€]Efecto de sexo ($P \leq 0.04$); [¥]Efecto de cromó ($P \leq 0.02$); ^πEfecto de semana con genotipo ($P \leq 0.02$); ^υEfecto de semana con sexo ($P \leq 0.05$).

7.3.2 Hormonas en plasma

Los efectos de genotipo, sexo y suministro de Cr orgánico en la dieta sobre las concentraciones plasmáticas de las hormonas insulina, cortisol y leptina durante las semanas 3, 6, 9, 12, 15 y 18 se muestran el Cuadro 15.

Se observó efecto de la semana de muestreo ($P \leq 0.01$) en las concentraciones de insulina en plasma, conforme avanzaron las semanas del estudio aumentaron los niveles de insulina en plasma, pero no hubo diferencias ($P > 0.05$) entre los genotipos porcinos, entre machos y hembras y entre los cerdos sin y con cromó orgánico en la dieta.

En relación con el cortisol en plasma, hubo efecto de la semana de muestreo ($P \leq 0.01$) en las concentraciones de cortisol en plasma, en general, conforme avanzaron las semanas del estudio aumentaron los niveles de cortisol en plasma, pero no hubo diferencias ($P > 0.05$) entre los genotipos porcinos, entre machos y hembras y entre los cerdos sin y con cromó orgánico en la dieta. En contraste se observó efecto de la interacción de los factores semana de muestreo con el genotipo porcino ($P \leq 0.05$). El efecto de esta interacción puede observarse en la Figura 9. El grupo de cerdos del G3 mostró los menores niveles de cortisol durante las primeras 12 semanas, pero al final aumentó y superó ligeramente a los cerdos del G2, en contraste los cerdos de este G2 aumentaron sus niveles de cortisol de la semana 3 a la 9, pero de la semana 9 a la 18 bajaron notablemente. Por otro lado, los cerdos del G1 aumentaron su nivel de cortisol de la semana 3 a la 6, después bajaron hasta la semana 12 notablemente, pero al final de la semana 12 a la 18 fue el grupo con mayor contenido de cortisol en plasma.

Con respecto a la hormona leptina en plasma, también hubo efecto de la semana de muestreo ($P \leq 0.01$) en las concentraciones, en general, conforme avanzaron las semanas del estudio

aumentaron los niveles de leptina en plasma, pero no hubo diferencias ($P>0.05$) entre los genotipos porcinos, entre machos y hembras y entre los cerdos sin y con crono orgánico en la dieta.

Cuadro 15. Efecto del genotipo, sexo y Cr orgánico en la concentración de hormonas en sangre de cerdos durante las semanas 3, 6, 9, 12, 15 y 18 de la engorda.

Variable	Genotipo ¹			Sexo		Cr, mg kg ⁻¹ MS	
	G1	G2	G3	Macho	Hembra	0.0	0.250
Insulina ($\mu\text{L U mL}^{-1}$)[£]							
Semana 3	1.06	1.11	2.98	0.75	2.68	1.63	1.80
Semana 6	6.12	4.80	5.35	5.08	5.76	5.44	5.40
Semana 9	2.72	3.42	4.80	2.57	4.72	3.31	3.98
Semana 12	4.27	2.23	2.35	3.51	2.39	3.49	2.41
Semana 15	1.28	0.70	1.63	0.83	1.57	1.03	1.37
Semana 18	6.54	4.66	5.53	3.35	6.55	4.40	5.49
Promedio	3.35	2.82	3.77	2.68	3.94	3.22	3.41
EEM²		1.32			1.05		1.07
Cortisol ($\mu\text{g dL}^{-1}$)^{£, π}							
Semana 3	6.54	4.44	6.48	6.83	4.81	5.82	5.82
Semana 6	10.10	8.46	6.86	8.64	8.50	8.58	8.57
Semana 9	6.17	10.36	4.96	6.26	8.07	6.79	7.53
Semana 12	4.16	5.36	2.97	3.78	4.54	4.00	4.32
Semana 15	4.60	4.94	3.97	5.33	3.70	4.64	4.44
Semana 18	7.50	4.58	4.82	6.76	4.51	5.74	5.53
Promedio	6.51	6.41	5.01	6.27	5.69	5.93	6.03
EEM²		1.10			0.89		0.94
Leptina (ng mL^{-1})[£]							
Semana 3	2.54	2.12	3.08	2.21	2.95	2.46	2.69
Semana 6	2.12	2.20	3.13	2.34	2.63	2.32	2.65
Semana 9	2.55	2.28	3.56	3.84	3.02	2.98	3.87
Semana 12	3.22	3.06	3.78	2.31	3.49	3.20	3.51

Semana 15	4.48	5.79	4.18	3.68	2.63	2.16	4.14
Semana 18	4.51	4.52	5.10	5.06	4.36	4.77	4.64
Promedio	3.24	3.32	3.80	3.24	3.18	2.98	3.58
EEM²	3.35		2.72		2.72		

¹G1=Pelón Mexicano×Yorkshire, G2=Asiático×Pelón Mexicano y G3=Asiático×Yorkshire.

²Error Estándar de la Media.

³Efecto de semana ($P \leq 0.01$); ⁴Efecto de semana con genotipo ($P \leq 0.05$).

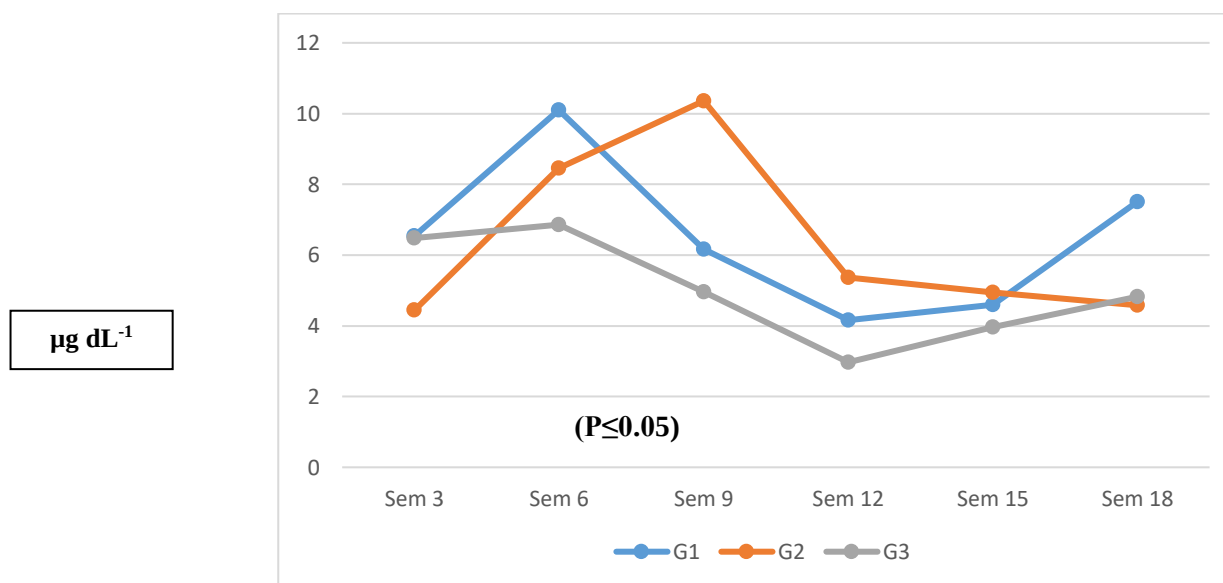


Figura 9. Efecto de la interacción de la semana de muestreo con el genotipo de los cerdos en la concentración de cortisol en plasma.

8. DISCUSIÓN

8.1 Respuesta productiva

El efecto del suministro de Cr orgánico en la dieta a partir de levadura alta en Cr metionina en el comportamiento productivo de cerdos en engorda observado en la presente investigación, coincide con lo encontrado en cerdos en las etapas de crecimiento y finalización por otros autores. Sales y Jancík (2011) a través del análisis de la información disponible demostraron que el Cr dietético complementado en los cerdos de engorda ejerce diferentes efectos sobre la eficiencia del crecimiento, características de la canal y calidad de la carne durante los diferentes períodos de la engorda, consignando que la suplementación con Cr en la dieta de cerdos en engorda estuvo correlacionada positivamente con ganancia de peso y conversión alimenticia. Asimismo, Gebhardt *et al.* (2019) indicaron efectos positivos del suministro dietético de Cr orgánico (0.200 mg de Cr kg⁻¹ MS) en consumo de alimento y conversión alimenticia de cerdos en engorda en crecimiento y finalización. Recientemente, los estudios de metaanálisis de información publicada han permitido confirmar la influencia del tipo de suplementación con Cr sobre el rendimiento del crecimiento y características de la canal de cerdos en diferentes etapas de la engorda, con resultados científicamente válidos (He *et al.*, 2023).

En relación con lo indicado por Abdourahman y Edwards (2008), la complementación de Cr orgánico en la dieta de cerdos no produce un aumento rápido en la ingestión diaria de alimento, tanto de los lechones destetados como de los cerdos en etapas de crecimiento y finalización, por lo tanto, no se deposita demasiado tejido adiposo a la vez que se mantiene el consumo voluntario de alimento ligeramente alto. Esto se debe principalmente al hecho de que el Cr puede mejorar la tolerancia del organismo del cerdo a la glucosa, estimular su absorción por los tejidos y acelerar su tasa de disminución de este glúcido en la sangre; este proceso metabólico, finalmente, puede promover un aumento del consumo de alimento.

Según el metaanálisis realizado por He *et al.* (2023), el Cr orgánico complementario influye en el consumo voluntario de alimento de lechones en la etapa de destete, así como en los cerdos en crecimiento y finalización, utilizando el modelo de efectos aleatorios para su cálculo, indicaron que el consumo aumentó de forma significativa. Estos autores también encontraron que de las diversas formas de Cr orgánico, la fuente de levadura de Cr tuvo el mayor impacto en el consumo

de alimento en los lechones destetados, en contraste, la fuente de picolinato de Cr tuvo más impacto en el consumo de cerdos en engorde en el crecimiento y finalización. En la presente investigación, se observaron efectos significativos de genotipo en el consumo total de alimento, en donde el G1 consumió más alimento que los otros dos genotipos, pero no hubo efecto del Cr en el consumo de alimento, ni diferencia entre machos y hembras en la misma variable productiva.

La variable GDP es un parámetro esencial influenciado por factores como el genotipo y la dieta, entre otros, (Lu *et al.*, 2015). Desde los primeros estudios, con resultados consistentes, se observó que la suplementación con Cr orgánico de las dietas de cerdos mejora la GDP de lechones destetados y de cerdos en crecimiento y finalización (Linderman *et al.*, 2004). En general se ha aceptado que este efecto del Cr se debe a un nivel mayor de ARNm de la hormona del crecimiento en el suero sanguíneo, aceptándose que el Cr promueve una mayor secreción de esta hormona (Lukaski, 1999). Otro aspecto importante sobre el efecto del Cr en la GDP se debe a la función que este desempeña como componente activo del factor de tolerancia a la glucosa, primero potencializando la acción de la insulina, después promoviendo la unión a sus receptores, lo cual mejora la sensibilidad celular a la glucosa y acelera la conversión de la hormona tiroxina (T₄) en triyodotironina (T₃) (Varady and Hellerstein, 2007). También se ha demostrado que el Cr aumenta el contenido del factor de crecimiento I, similar a la insulina I, que desempeña una función clave en la tasa de crecimiento de los cerdos y en el metabolismo y utilización de nutrientes (Bin-Jumah *et al.* 2020).

De acuerdo con el estudio de metaanálisis llevado a cabo por He *et al.* (2023), la complementación de Cr orgánico en la dieta mejora la GDP de cerdos en engorda durante las etapas de inicio, crecimiento y finalización, pero las fuentes de Cr orgánico tienen efectos diferentes en la GDP de los lechones destetados con el siguiente orden de grado de influencia: nicotinato de Cr > picolinato de Cr > Cr de levadura; y para cerdos en crecimiento y finalización, el orden de grado de influencia en la GDP fue: picolinato de Cr > metionina de Cr > propionato de Cr > levadura de Cr. En la presente investigación, los genotipos porcinos G2 y G3 ganaron más peso por día, las hembras tuvieron mayor GDP que los machos, y el suministro de Cr en la dieta, a partir de la fuente Cr metionina, aumentó 5% más la GDP de los cerdos.

La relación del consumo voluntario de alimento con la ganancia de peso es una variable importante para medir la cantidad del alimento consumido que es transformado en ganancia de peso del cerdo. En el presente estudio, la conversión alimenticia fue diferente entre los genotipos de cerdos estudiados, los genotipos G2 y G3 tuvieron mejor CA. El suministro de Cr en la dieta también mejoró la CA de los cerdos, en esta importante variable de la respuesta productiva es donde mayor impacto tuvo el efecto del Cr, el cual propició un ahorro importante de alimento, con una mejor eficiencia alimenticia de los cerdos en engorda en las etapas de crecimiento y finalización. Lo anterior coincide con los resultados obtenidos en el estudio de Xu *et al.* (2017), en el que el Cr suministrado en la dieta de cerdos en engorda mejoró significativamente la conversión alimenticia, con ahorro importante de alimento por kg de ganancia de peso en lechones destetados. El efecto del Cr en la CA está relacionado con una de sus funciones principales, al facilitar la unión de la insulina a sus receptores en la membrana celular (Al-Qatati *et al.*, 2012). Las células sensibles a la insulina, a su vez, capturan más glucosa, en consecuencia hay una mayor cantidad de energía, la cual es destinada para aumentar la ganancia de tejido magro, con menor depósito de tejido adiposo en la canal, por lo tanto, como la acumulación de grasa es menos eficiente que la del tejido muscular (Spacek *et al.*, 2007), la suplementación dietética de Cr en los cerdos en engorda mejora la conversión y eficiencia alimenticias y, por lo tanto, contribuye en la reducción de los costos por concepto de alimentación (Iskra *et al.*, 2016). De acuerdo con He *et al.* (2023), bajo condiciones de alta heterogeneidad de los cerdos, la complementación de Cr orgánico tiene impacto significativo en el índice CA de lechones destetados, con mejora sustantiva en el nivel de producción; sin embargo, tiene efectos menos notables en la CA de los cerdos en las etapas de crecimiento y finalización. Sobre el efecto de diferentes fuentes de Cr orgánico en la CA de lechones destetados, el nicotinato de Cr tiene mayor impacto en reducir la CA, y el picolinato de Cr fue más eficaz en reducir la CA de cerdos en crecimiento y finalización. La reducción del índice de CA puede deberse a un menor consumo de alimento o al aumento de la producción de carne. Por lo tanto, queda demostrado que agregar Cr al alimento puede mejorar la eficiencia productiva, la conversión alimenticia y la remuneración y, por lo tanto, aumentar los beneficios económicos.

8.2 Evaluación de la calidad de las canales

Los resultados del efecto positivo del Cr en el peso de las canales calientes y frías, espesor de grasa dorsal, y rendimiento comercial de las canales coinciden con los resultados obtenidos en otros estudios. Sales y Jancík (2011) sintetizaron y cuantificaron, mediante metaanálisis de 31 estudios, el efecto de la suplementación dietética con Cr sobre el rendimiento del crecimiento y las características de la canal de cerdos en engorda. En análisis de la información incluyó diversas fuentes y varios niveles de Cr, incluidos el quelato de Cr metionina, el nano compuesto de Cr, nicotinato de Cr, propionato de Cr, tripicolinato de Cr y levadura de Cr. Los resultados del análisis indicaron que la inclusión de Cr en las dietas de cerdos en engorde, producen canales con menor espesor de grasa dorsal, mayor porcentaje de carne magra y aumento del área del músculo del lomo, en comparación con los cerdos sin suplementación de Cr.

Recientemente, en un estudio de metaanálisis realizado por (He *et al.*, 2023) los resultados numéricos mostraron que los índices de rendimiento de la canal de cerdos en engorda en crecimiento y finalización mejoraron después de suplementar Cr a la dieta, pero sin ser estadísticamente significativos; también se observa que el Cr reduce el espesor de la grasa dorsal de cerdos en crecimiento-finalización, pero sin diferencia significativa. La fuente de Cr que influyó en el rendimiento de la canal fue la levadura rica en Cr y para espesor de grasa dorsal fue el picolinato de Cr. En el mismo estudio se muestran resultados positivos, con significancia, en la proporción magra de la canal, así como en el área del músculo del lomo, lo anterior indica que el Cr orgánico mejora la proporción magra de la canal y el área del ojo de la chuleta de los cerdos en engorda en las fases de crecimiento y finalización. La fuente de Cr que tuvo mayor impacto en estas variables fue el picolinato de Cr. Este efecto se puede deberse a que el Cr promueve tanto la lipólisis como la síntesis de proteínas, reduciendo el contenido de colesterol en la sangre, en este proceso metabólico la energía liberada por la hidrólisis de las grasas es usada para formar proteínas, mejorando la relación grasa:magra de la canal. Además, de acuerdo con Linderman *et al.* (1996) y Kornegay *et al.* (1997), el efecto positivo del Cr ($0.2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ MS}$) proveniente de picolinato de Cr, en el área del ojo de la chuleta, pueden deberse a que el Cr mejora la eficiencia de uso del N de la dieta porque promueve una mayor absorción, retención de N y digestibilidad *in vivo* de la MS de cerdos en engorda en las fases de crecimiento y finalización, pero sus efectos en la reducción de la grasa dorsal pueden variar. Los resultados anteriores se corresponden con los resultados de los estudios iniciales realizados por (Page *et al.*, 1993; Mooney y Cromwell,

1995; Linderman *et al.*, 1995; Mooney y Cromwell, 1996), así como con los resultados de estudios más recientes realizados por (Xiao *et al.*, 2012; Tian *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2017).

El análisis de la literatura, a través de los metaanálisis realizados por diferentes autores y en diferentes años, sobre el efecto del Cr en la calidad de la canal, aún muestra inconsistencias, pero de acuerdo con el análisis de correlación entre la concentración dietética de Cr orgánico con el rendimiento del crecimiento y la calidad de la canal de los cerdos, las dosis óptimas de suplementación con Cr las dietas de lechones destetados y cerdos en crecimiento y finalización son las siguientes. De acuerdo con las variables productivas de rendimiento del crecimiento de los lechones destetados, la dosis óptima de nicotinato de Cr es de 0.125 a 0.150 mg kg⁻¹ de alimento; en contraste, la dosis óptima de picolinato de Cr para suplementar cerdos de engorda en crecimiento y finalización es de 0.250 a 0.300 mg kg⁻¹ de alimento (He *et al.*, 2023).

8.3 Ensayo metabólico (metabolitos y hormonas en plasma)

El nivel de glucosa se redujo conforme avanzó el período de engorda y fue modificado reduciendo su contenido por efecto del Cr suministrado en la dieta a los cerdos. Al respecto, resultados de varios estudios realizados con cerdos en engorda coinciden con los del presente estudio (Liarn *et al.*, 1993; Page *et al.*, 1993a; Jonhston *et al.*, 1999). Esta disminución puede ser resultado de la función del Cr como parte de la molécula de cromodulina, la cual facilita el ingreso de la glucosa a la célula por su contribución en la señalización de la insulina al estabilizar la subunidad del receptor de insulina (Mertz, 1993). La capacidad del Cr adicionado como Cr metionina para aumentar la tasa de retiro de la glucosa en sangre, ha sido ampliamente observada en pruebas de reto, tanto en los seres humanos como en animales de laboratorio (Anderson, 1989; Mertz, 1993). Los resultados del presente estudio coinciden con los resultados obtenidos por Matthews *et al.* (2001) en cerdos de engorda en etapa de crecimiento y finalización, observando que durante la prueba de desafío a la insulina, aumentó la desaparición de la glucosa por efecto del Cr (0.2 mg kg⁻¹ MS), proveniente de propionato de Cr, además, la vida media de la glucosa fue reducida en los cerdos suplementados con picolinato o propionato de Cr, pero la cinética de la insulina no fue afectada por las fuentes de Cr. Estos autores también encontraron que la cinética de la glucosa, en la prueba de desafío de la insulina, aumentó la sensibilidad de la insulina por efecto de ambas fuentes de Cr orgánico, indicando que sus resultados coinciden con lo informado

por Amoikon *et al.* (1995). En un estudio sobre suplementación de picolinato de Cr en cerdos de engorda, Rentería y Cuarón (1998) indicaron que la concentración sanguínea posprandial no mostro diferencia dinámica por efecto del Cr, pero si favoreció la función de la insulina. En el presente trabajo la concentración plasmática de insulina aumento durante el período de engorda, pero sin efecto de la suplementación con Cr. La ausencia de efecto del Cr sobre la insulina puede indicar que el Cr mejora la unión de la insulina o el número de receptores de la insulina en adipocitos y eritrocitos del cerdo, de forma suficiente para influir en la cinética de la glucosa (Berrio *et al.*, 1995; Matthews *et al.*, 2001).

El Cr potencializa la acción de la insulina mejorando la unión de esta con los receptores de las células diana, así como su señalización postreceptor. Por lo tanto, la insulina aumenta la síntesis de proteínas y la eficiencia de transporte de aminoácidos, a la vez que reduce la tasa de degradación de proteínas, con aumento del uso de carbohidratos y lípidos (Debski *et al.*, 2004). Asimismo, se ha comprobado que la insulina reduce la glucosa circulante al estimular su uso, por lo tanto, aumenta la síntesis de glucógeno y reduce la gluconeogénesis (Vernon y Sasaki, 1991). En consecuencia, la energía liberada en estos procesos puede ser debido al efecto del Cr sobre el crecimiento y características de la canal de los cerdos. De acuerdo con los estudios de Bunting *et al.* (1994) y Domínguez-Vara *et al.* (2009), el efecto positivo de la suplementación con Cr se puede atribuir a la influencia que este tiene en la distribución de la energía entre los tejidos adiposo y muscular. Los resultados del presente estudio sugieren que la eficiencia del crecimiento, el peso, rendimiento y grasa dorsal depositada en la canal de los cerdos estuvieron influenciados por el suministro de Cr metionina en la dieta.

El Cr influye en el metabolismo lipídico, los lípidos de la sangre con frecuencia bajan su contenido cuando la dieta se suplementa con Cr (Mertz, 1993; Abraham *et al.*, 1992). En el presente estudio el contenido plasmático de colesterol y triglicéridos aumento durante la engorda de los cerdos, con diferencias entre los genotipos, y entre machos y hembras. Se observó que el Cr no redujo el nivel de colesterol, pero si redujo numéricamente el nivel de triglicéridos en promedio 9.75 %. Resultados similares a los del presente estudio fueron observados por Matthews *et al.* (2001) quienes indicaron que el Cr redujo los niveles de ácidos grasos no esterificados en

cerdos de engorda, asimismo, Ward *et al.* (1997) indicaron que el contenido de ácidos grasos no esterificados fue reducido al suplementar picolinato de Cr.

El cortisol también participa en el metabolismo de los nutrientes, aumenta la gluconeogénesis en hígado usando como sustratos los aminoácidos de tejidos extrahepáticos, por lo tanto, reduce la síntesis de proteínas y causa debilitamiento muscular y depresión del sistema inmune. Además, con respecto al metabolismo de los lípidos, el cortisol promueve la salida de ácidos grasos del tejido adiposo y aumenta la concentración de ácidos grasos libres en plasma y su oxidación celular para producción de energía (Guyton, 1988). En alcance a que un objetivo nutricional del Cr orgánico es mejorar la calidad de la canal aumentando la proporción de masa magra y reduciendo la grasa, se espera que el Cr reduzca el nivel de cortisol en el organismo y a su vez promueva un mayor depósito de proteína, o sea mayor masa muscular. Los resultados del presente estudio muestran que el Cr no tuvo influencia en la concentración de colesterol en plasma, y tampoco aumentó el área del ojo de la chuleta, es decir la proporción de masa muscular de la canal, solamente se observaron diferencias en el nivel de cortisol entre las semanas de muestreo y efecto de la semana con el genotipo de los cerdos. La reducción del cortisol causada por el Cr parece importante en la reproducción y el sistema inmune, sobre todo en animales estresados (Chang y Mowat, 1992). Los glucocorticoides (cortisol) inhiben la producción de anticuerpos, la producción del factor de crecimiento de las células T y del factor activador de los linfocitos (Munck *et al.*, 1984; Khansari *et al.*, 1990).

En otros estudios realizados en monogástricos, Lien *et al.* (1999) indicaron que en pollos de engorda disminuyeron los triglicéridos en plasma al dar 1.6 mg de Cr kg⁻¹ MS, Toghyani *et al.* (2008), indicaron una reducción de la concentración de triglicéridos en plasma con 1.5 mg de Cr⁻¹ kg MS de nicotinato de Cr en aves bajo el estrés; resultados similares fueron reportados por Noori *et al.* (2012) al suplementar 0.2, 0.4 o 0.8 mg de Cr kg⁻¹ MS, de Cr metionina en la dieta de pollos de engorda. Rentería y Cuarón (1998) indicaron que la concentración sanguínea posprandial de colesterol no mostro diferencia dinámica por efecto del Cr, pero cuando analizaron los tiempos de muestreo de forma independiente el Cr redujo los niveles de colesterol en cerdos de engorda.

En rumiantes pecuarios los resultados han sido los siguientes. Domínguez *et al.* (2009) indicaron una respuesta cuadrática en la concentración de triglicéridos en ovinos al suplementar 0.25 y 0.35 mg Cr kg⁻¹ MS a partir de levadura de Cr. Así mismo, Kitchalong *et al.* (1995) encontraron que, en ovinos Suffolk, la dosis de 0.25 ppm Cr (PicCr) redujo el colesterol plasmático, el cual disminuyó 27% en la 2ª semana del estudio, Uyanik (2001) reportaron que con 0.2 y 0.4 ppm de Cr disminuyó el nivel de triglicéridos en ovinos, y Yan *et al.* (2008) indicaron una reducción del nivel de triglicéridos en ovinos suplementados con Cr (LevCr) en dosis de 400 y 800 ppb. La disminución de triglicéridos por efecto del Cr puede indicar que el Cr mejora la capacidad de transporte hepático de triglicéridos, y en consecuencia promover su catabolismo debido al aumento de la actividad de la lipasa lipoproteica (LPL) en plasma (Yan *et al.*, 2008).

Por otro lado, la falta de efecto del Cr, observado en varios de los muestreos realizados, coincide con lo apreciado en otros estudios con Cr adicional suministrado en dietas de ovinos y bovinos en engorda. DePew *et al.* (1996) reportaron que 0.5 mg de Cr kg⁻¹ MS no modificaron los triglicéridos o colesterol en ovinos, similares resultados fueron reportados por Forbes *et al.* (1998) con 0.37 mg de Cr kg⁻¹ MS; Emami *et al.* (2012) indicaron que 0.15 mg de Cr kg⁻¹ MS en la dieta de cabritos, no modificó la concentración de triglicéridos en plasma; lo anterior también coincide con lo observado al dar levadura de Cr a terneros y novillos en crecimiento donde los ácidos grasos no esterificados circulantes no fueron afectados por el Cr (Chang y Mowat, 1992; Bunting *et al.*, 1994). Asimismo, la concentración de triglicéridos no fue modificada por la inclusión de 0.2 mg de Cr kg⁻¹ MS en la dieta de cerdos en finalización (Peres *et al.*, 2014).

La determinación del contenido de urea en sangre se usa como indicador del metabolismo de las proteínas, este metabolito se origina a partir del catabolismo de los aminoácidos (Colin-Schoellen *et al.*, 1998). La concentración de urea en plasma en la presente investigación estuvo influenciada por la semana de muestreo durante la engorda y por el genotipo porcino, además hubo efecto de las interacciones de la semana con genotipo y de la semana con sexo, pero el Cr no afectó los niveles plasmáticos de la urea. Lo anterior coincide con lo informado por Matthews *et al.* (2001) donde el Cr orgánico no afectó los niveles de urea en plasma (0.2 mg kg⁻¹ MS); de forma similar, Money y Cromwell (1997) indicaron que la suplementación dietética con Cr

orgánico (0.2 o 0.4 mg kg⁻¹ MS) de picolinato de Cr no influyó en los niveles de urea en cerdos en crecimiento, o cerdos en crecimiento-finalización. La hipótesis planteada al complementar Cr en la dieta es que este reduzca los niveles de urea en plasma, lo cual estaría asociado a una mejor eficiencia de uso del nitrógeno absorbido de la dieta para síntesis de proteína y crecimiento de masa muscular, según los resultados de los estudios de Page *et al.* (1992; 1993), Lindermann *et al.* (1995b) y Kornegay *et al.* (1997). Se asume que estas diferencias se deben a una síntesis proteica más intensiva y una menor cantidad de nitrógeno residual que se produce en el ciclo hepático de la urea. Esto puede estar relacionado con la influencia del Cr en los procesos metabólicos como la incorporación de aminoácidos a proteínas para aumentar la eficiencia de uso de la proteína por la célula y el organismo, aumentando la retención y depósito de proteína en tejidos y, por lo tanto, la masa muscular (Mertz, 1987). No obstante, las mediciones de estos metabolitos nitrogenados en plasma podrían no tener la sensibilidad necesaria para predecir cambios en el metabolismo del nitrógeno por efecto de la suplementación con Cr (Ingraham y Kappel, 1988).

De acuerdo con el análisis realizado por Linderman (1996), quién calculó el N retenido en la canal de cerdos usando datos de Page *et al.* (1991) y Lindermann *et al.* (1995), en 15 de 16 comparaciones aumentó el N retenido en la canal, en 13 comparaciones hubo un ahorro calculado en la excreción de N, en las tres comparaciones donde no hubo ahorro de N excretado, el consumo de alimento fue mayor en los cerdos que recibieron Cr. Según Kornegay *et al.* (1997), los efectos positivos de los tratamientos en el aprovechamiento del N, digestibilidad de la MS y PC y características de la canal, serán una función de la suficiencia del nitrógeno y de la energía de la dieta relativas a la capacidad genética del animal para depositar masa magra. Si el consumo de proteína y energía es adecuado y el depósito de masa magra es maximizado, una mejor digestibilidad, probablemente cause una canal más gorda, porque la energía adicional no es requerida para depositar músculo y se almacenará como tejido adiposo. Si solamente el nitrógeno es subóptimo, puede mejorar el depósito de carne magra, pero esto será en conjunto con un mayor depósito de grasa dorsal porque no se requiere la energía extra. Asimismo, cuando el consumo de energía es limitante, podría observarse un aumento de la musculatura total y de la grasa dorsal debido a la mejor digestibilidad.

En relación a leptina, de acuerdo con Zhang *et al.* (1994) y Bidwell *et al.* (1997), esta hormona es considerada el producto de la expresión del gen de la obesidad, es de naturaleza peptídica pleiotrófica, la cual participa en la regulación del equilibrio energético y la composición corporal. El gen de la obesidad se expresa principalmente en el tejido adiposo del organismo, por lo tanto, la hormona leptina es considerada una señal derivada periféricamente, que se secreta a la sangre, se transporta activamente a través de la misma y cruza la barrera cerebral por un sistema saturable de alta afinidad (Halaas *et al.*, 1995; Banks *et al.*, 1996). La leptina se une a sus receptores en el sistema nervioso central (Lynn *et al.*, 1996; Malik y Young, 1996) y activa las neuronas a nivel del hipotálamo ventrobasal y tallo del encéfalo (Elmqvist *et al.*, 1997). El efecto integrado de la administración de leptina a ratones obesos, es una reducción del consumo de alimento, un aumento del gasto energético, una normalización del peso corporal y grado de adiposidad (Halaas *et al.*, 1995).

Bidwell *et al.* (1997) observaron que la abundancia del ARNm de la obesidad es mayor en los cerdos con más masa de tejido adiposo; asimismo Yen *et al.* (1997) indicaron que la expresión del gen de la obesidad y las concentraciones plasmáticas de leptina son mayores en cerdos seleccionados por un mayor depósito de grasa. La expresión del gen de la obesidad y las concentraciones plasmáticas circulantes de leptina también se correlacionan positivamente con la grasa corporal en modelos de roedores y humanos obesos (Maffei *et al.*, 1995).

En un estudio realizado por Robert *et al.* (1998), se observaron diferencias en los niveles de ARNm de leptina, mostrando que los cerdos gordos tienen un nivel más alto de ARNm de leptina vs cerdos magros. De acuerdo con estos autores, sus hallazgos indican que la expresión de la leptina porcina puede estar asociada con la acumulación de grasa subcutánea en cerdos.

En el presente estudio las concentraciones plasmáticas de la hormona leptina fueron mayores conforme avanzaron las semanas del estudio, sin embargo, no se observaron diferencias por efecto del genotipo porcino, del sexo o del Cr orgánico suministrado en la dieta. Cabe mencionar que las diferencias en el depósito de grasa dorsal observadas entre machos y hembras, en donde estas últimas depositaron mayor tejido adiposo, no se reflejaron en un mayor nivel de leptina en plasma en las cerdas; por otro lado, la reducción de la grasa dorsal a nivel de la 12ª costilla de la canal

porcina, por efecto del Cr suministrado en la dieta, no se reflejó en una menor concentración de la misma leptina en plasma.

9. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, se concluye lo siguiente:

- La respuesta productiva, en términos de GDP, CMS y CA, fue diferente entre genotipos, los G2 y G3 tuvieron mayor GDP y mejor CA; la GDP fue mayor en las hembras, en tanto que el Cr mejoró la GDP y CA de los cerdos.
- Las canales de los G1 y G2 tuvieron mayores pesos caliente y frío, las hembras tuvieron mayores valores de PCC, PCF y grasa dorsal, pero el rendimiento fue similar entre sexos; el Cr aumentó el peso de las canales en caliente y frío, y su rendimiento, y redujo la grasa dorsal de los cerdos a nivel de la 12^a costilla.
- Hubo efecto de la semana de muestreo en el contenido plasmático de glucosa, creatinina, colesterol, triglicéridos y urea; el Cr redujo la glucosa en plasma. El colesterol fue distinto entre semanas, genotipos y sexos, también hubo efecto de la interacción semana con genotipo. Los triglicéridos fueron afectados por las interacciones semana con genotipo y semana con sexo. Hubo efecto de semana, de genotipo y de las interacciones semana con genotipo y semana con sexo en el contenido de urea en plasma.
- Se observó efecto de la semana de muestreo en las concentraciones de insulina, cortisol y leptina en plasma, conforme avanzaron las semanas del estudio aumentaron sus niveles en plasma, pero no hubo diferencias entre genotipos, entre machos y hembras, y entre los cerdos sin y con cromo orgánico en la dieta. Hubo efecto de la interacción semana de muestreo con genotipo en el contenido de cortisol.

10. LITERATURA CITADA

- Abdourahman, A., and Edwards, J.G. (2008). Chromium supplementation improves glucose tolerance in diabetic Goto-Kakizaki rats. *IUBMB. Life*. 8:541-548.
- Abraham, A.S., Brooks, B.A., and Eylath, U. (1992). The effects of chromium supplementation on serum glucose and lipids in patients with and without non-insulin-dependent diabetes. *Metabolism*. 41:768-771.
- Alvi, A.S. (1980). The influence of sex status on meat quality characteristics in sheep. *Fleischwirtschaft*. 60:2037.
- Al-Qatati, A., Winter, P.W., Wolf-Ringwall, A.L., Chatterjee, P.B., Van Orden, A.K., Crans, D.C., Roess, D.A., and Barisas, B.G. (2012). Insulin receptors and downstream substrates associate with membrane microdomains after treatment with insulin or chromium (III) picolinate. *Cell Biochem. Biophys*. 3:441-450.
- Amatya, J.L., Haldart, S., and Ghosh, T.K. (2004). Effects of chromium supplementation from inorganic and organic sources on nutrient utilization, mineral metabolism and meat quality in broiler chickens exposed to natural heat stress. *Anim. Sci*. 79:241-253.
- Amoikon, E.K., Fernandez, J.M., Southern, L.L., Thompson, D.L. Jr., Ward, T.L., and Olcot, B.M. (1995). Effect of chromium tripicolinate on growth, glucose tolerance, insulin sensitivity, plasma metabolites, and growth hormone in pigs. *J. Anim. Sci*. 73:1123-1130.
- Anderson, R.A. (1987). Chromium. In: W. Mertz. *Trace elements in human and animal nutrition*. 5a Ed. Academic Press, Inc. San Diego, CA. pp. 225-244.
- Anderson, R.A. (1989). Essentiality of chromium in humans. *Sci. Total Environ*. 86:75-81.
- Anderson R.A., and Kozlowski A.S. (1985). Chromium intake, absorption and excretion of subjects consuming self-selected diets. *Am. J. of Clin. Nutr*. 41:571-577.
- Anderson, R.A., Bryden, N.A., Polansky, M.M., and Gautschi, K. (1996). Dietary chromium effects on tissue chromium concentrations and chromium absorption in rats. *J. of Trace Elem. in Exp. Med*. 9:11-25.
- Anderson, R.A. (1997). Nutritional factors influencing the glucose/insulin system: Chromium. *J. Am. Coll. Nutr*. 16:404-410.
- Anderson R.A. (1998). Effects of chromium on body composition and weight loss. *Nutr Rev*. 56:266-270.

- Ani, M., and Moshtaghie, A.A. (1992). The effect of chromium on parameters related to iron metabolism. *Biol. Trace Elem. Res.* 32:57-64.
- A.O.A.C. (1997). *Official Methods of Analysis*. 16th ed. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA, USA.
- Arvizu, R.R., Domínguez, I.A., Rubio, M.S., Bórquez, J.L., González, M., and Jaramillo, G. (2011). Effects of genotype, level of supplementation and organic chromium on growth performance, carcass, and meat traits grazing lambs. *Meat Sci.* 88:404-408.
- Banks, W.A., Kastin, A.J., Huang, W., Jaspan, J.B., and Maness, L.M. (1996). Leptin enters the brain by a saturable system independent of insulin. *Peptides.* 17:305-311.
- Berrio, L.F., Southern, L.L., Fernandez, J.M., Thompson, D.L. Jr., and Ward, T.L. (1995). Effect of dietary chromium tripicolinate of insulin binding in insolate pigs fat cells and erythrocyte ghosts. *FASEB J.* 9:A449.
- Bidwell, C.A., Ji, S., Frank, G.R., Cornelius, S.G., Willis, G.M., and Spurlock, M.E. (1997). Cloning and expression of the porcine *obese* gene. *Anim. Biotechnol.* 8:191-206.
- Bin-Jumah, M., Abd El-Hack, M.E., Abdelnour, S.A., Hendy, Y.A., Ghanem, H.A., Alsafy, S.A., Khafaga, A.F., Noreldin, A.E., Shaheen, H., and Samak, D. (2020). Potential use of chromium to combat thermal stress in animals: A review. *Sci. Total Environ.* 10:135996.
- Body, D.R. (1988). The lipid composition of adipose tissue. *Prog. Lipid Res.* 27:39-60.
- Boleman, S.L., Boleman, S.J., Bidner, T.D. Southern, L.L., ward, T.L., Pontif, J. E. and Pije, M.M. (1995). Effect of chromium picolinate on growth, body composition, and tissue accretion in pigs. *J. of Anim. Sci.* 73:20033-20042.
- Bonet, M., and Kopp, J. (1984). Dosage du collagene dans les tissus conjonctifs, la viande et les produits. *Cah. Techn. INRA.* 5:19-30.
- Bučko, O., Lehotayová, A., Petrák, J., Vavrišínová, K., Šimko, M., Juráček, M. (2012). Effect of organic chromium to carcass composition and chemical composition of adductor muscle in Large White breed. *Res. in Pig Breeding.* 6:5-9.
- Bunting, L.D., Fernandez, J.M., Thompson, D.L., and Sourthen Jr, L.L. (1994). Influence of chromium picolinate on glucose usage and metabolic criteria in growing Holstein calves *J. of Anim. Sci.* 72:1591-1599.

- Burton, J.L., Mallard, B.A., and Mowat, D.N. (1993). Effects of supplemental chromium on immune responses of periparturient and early lactation dairy cows. *J. Anim. Sci.* 71:1532-1539.
- Cano, E., Peña, B.T.F., Martos, P.J., Domenech, G.V., Alcalde, A.M.J., García, M.A., Herrera, G.M., Rodero, S.E., and Acero, R.C. (2003). Calidad de la canal y de la carne en corderos ligeros de raza Segureña. *Arch. de Zoot.* 52:315-326.
- Cañeque, V., y Sañudo, C. (2001). Metodología para el estudio de la calidad de la canal y de la carne en ruminantes. Ed. Ministerio de Ciencia y Tecnología Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria, España. pp. 30-40.
- Cefalu, W.T., and Hu, F.B. (2004). Role of chromium in human health and diabetes. *Diabetes Care.* 27:2741-2751.
- Consejo Mexicano de la Carne. (2022). Compendio Estadístico 2022. Gerencia de Estudios Económicos y Comercio. www.comecarne.org (08 de julio 2022).
- Chang, X., Mowat, D.N., and Spiers, G.A. (1992). Carcass characteristics and tissue-mineral contents of steers fed supplemental chromium. *Can. J. of Anim. Sci.* 72:663-669.
- Chang, X., and Mowat, D.N. (1992). Supplemental chromium for stresses and growing feeder calves. *J. of Anim. Sci.* 70:559-565.
- Chang, X., Mowat, D.N., and Mallard, B.A. (1994). Supplemental organic and inorganic chromium with niacin for stressed feeder calves. *J. Anim. Sci.* 72 (Suppl.1):132.
- Champe, P.C., and Harvey, R.A. (2004). Metabolic effects of insulin and glucagon. In: *Lippincott's Illustrated Reviews: Biochemistry*. 3rd edition, Baltimore, USA. p.305-318.
- Chrystall, B.B., Devine, C.E., Snodgrass, M., and Ellery, S. (1982) Tenderness of exercise-stressed lambs. *N. Z. J. Agric. Res.* v25:331.
- Colin-Schoellen, O., Jurjanz, S., and Laurent, F. (1998). Nitrogen supply and fermentescible nitrogen deficit in total mixed ratio for dairy cows: Influence on milk yield and composition. *Rencontre Recherche Ruminants* 5:222.
- Dattilo, A.M., and Miguel, S.G. (2003). Chromium in health and disease. *Nutrition Today.* 38:121-133.
- Davis, C.M., and Vincent J.B. (1997). Isolation and characterization of a biologically active chromium oligopeptide from bovine liver. *Arch. of Biochemistry and Biophysics.* 339: 335-343.

- DePew, C.L., Bunting, L.D., Thompson Jr., D.L., and Gran, D.T. (1996). Chromium picolinate does not alter intake or lipid metabolism in lambs fed standar or high-fat diets. *J. of Dairy Sci.* 79(Suppl.1). 140. (Abstr.).
- Debski, B., Zalewski, W., Gralak, M.A., and Kosla, T. (2004). Chromium-yeast supplementation of chicken broilers in an industrial farming system. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 18:47-51.
- Díaz, D. Ch. M.T. (2001). Características de la canal y de la carne de corderos lechales Manchegos. Correlaciones y ecuaciones de predicción. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España.
- Domínguez, V.I.A., González, M.S.S., Pinos, R.J.M., Bórquez, G.J.L., Bárcena, G.R., Mendoza, M. M.G., Zapata, L.E. and Landois, P.L.L. (2009). Effects of feeding selenium-yeast and chromium-yeast to finishing lambs on growth, carcass characteristics, and blood hormones and metabolites. *Anim. Feed Sci. and Tech.* 152:42-49.
- Dransfield, E., Nute, G.R., Hogg, B.W., and Walters, B.R. (1990). Carcass and eating quality of ram, castrated ram and ewe lambs. *Anim. Prod.* 50:291-299.
- Dreyer, J.H., Naude, R.T., Henning, J.W.N., and Rossouw, E. (1977) The influence breed, castration and age on muscle fibre type and diameter in Friesland and Afrikaner cattle. *S. Afr. J. Anim. Sci.* 7:171-180.
- Ducros, V. (1992). Chromium metabolism. *Biol. Trace Elem. Res.* 32:65-77.
- Elmqvist, J.K., Ahima, R.S., Maratos-Flier, E., Flier, J.S., and Saper, C.S. (1997). Leptin activates neurons in ventrobasal hypothalamus and brainstem. *Endocrinology.* 138:839-842.
- Enser, M., Hallett, K., Hewelt, B., Fursey, G.A., and Wood, J.D. (1996). Fatty acid content and composition of English beef, lamb and pork at retail. *Meat Sci.* 42:443-456.
- Emami, A., Zali, A., Ganjhanlou, M., and Afjani, A.A. (2012). Nutrient digestibility, carcass characteristics and plasma metabolites in goat's kids fed diets supplemented with chromium methionine. *Online J. Anim. Feed Res.* 2:127-132.
- Evans, G.W. 1989. The effect of Chromium Picolinate on insulin controlled parameters in humans. *Int. J. Biosocial. Me. Res.* 11:163.
- Evans, G.W., and Bowman, T.D. (1992). Chromium picolinate increases membrane fluidity and rate of insulin internalization. *J. of Inorg. Biochem.* 48:243-250.

- Evans, G.W., and Pauchnik, D.J. (1993). Composition and biological activity of Chromium pyridine carboxylate complexes. *J. Inorg. Biochem.* 49:177.
- FAO. (2013). Producción y sanidad animal. Carne y productos cárnicos. Recuperado de http://www.fao.org/ag/againfo/hemes/fr/meat/backgr_composition.html.
- FAO. (2013). Perspectivas alimentarias (resumen de mercados). Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/018/al999s.pdf>
- Fick, K.A., McDowell, L.R., Miles, P.H., Wilkinson, N.S., Funk, D.J., Conrad, J.H., and Valdivia, R. (1979). Métodos de análisis de minerales para tejidos de plantas y animales. Universidad de Florida. Gainesville, FL. USA. 135p.
- Forbes, C.D., Fernandez, J.M., Bunting, L.D., Southern, L.L., Thompson, D.L. Jr., Gentry, L.R., and Chalupa, A.M. (1998). Growth and metabolic characteristics of Suffolk and Gulf Coast Native yearling ewes supplemented with chromium tripicolinate. *Small Rum. Res.* 28:149-160.
- Frank, A., Anke, M., and Danielsson, R. (2000). Experimental copper and chromium deficiency and additional molybdenum supplementation in goats. Feed consumption and weight development. *Sci. Total Environ.* 249:133-142.
- Galián, J.M. (2007). Características de la canal y calidad de la carne, composición mineral y lipídica del cerdo Chato Murciano y su cruce con Ibérico. Efecto del sistema de manejo. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. España.
- García, J.A., Nuñez, F.A., Rodríguez, F.A., Priet, C., Molina, N., Domínguez, L. (1998). Calidad de la canal y de la carne de borregos Pelibuey castrados. *Tec. Pec. México.* 36:225-232.
- Garrido, M.D., Bañón, S. y Álvarez, D. 2005. Medida del pH. En: Estandarización de las metodologías para evaluar la calidad del producto (animal vivo, canal, carne y grasa) Ed. Cañeque, V., y Sañudo, C. pp. 206-215. INIA.
- Gebhardt, J.T., Woodworth, J.C., Tokach, M.D., Derouchey, J.M., Goodband, R.D., Loughmiller, J.A., de Souza, A.L.P., Rincker, M.J., and Dritz, S.S. (2019). Determining the influence of chromium propionate and *Yucca schidigera* on growth performance and carcass composition of pigs housed in a commercial environment. *Transl. Anim. Sci.* 3: 1275-1285.
- Giese, J. (1995). Measuring physical properties of foods. *Food Technol.* 49:54-63.

- Gil, M., Serra, X., Gispert, M., Oliver, M.A., Sañudo, C., Panea, B., Olleta, J.L., Campo, M., Olivám, M., Osor, K., García-Cachán, M.D., Cruz-Sagredo, R., Izquierdo, M., Espejo, M., Martín, and Piedrafita, J. (2001). The effect of bread production systems on the myosin heavy chain I, the biochemical characteristics and the colour variables of *longissimus thoracis* from seven Spanish beef cattle breeds. *Meat Sci.* 5:181-184.
- Guerreo, L.I., Ponce, A.E., y Pérez, M.L. (2002). Curso práctico de tecnología de carnes y pescado. Universidad Metropolitana. Unidad Iztapalapa. D.F. México. p.171.
- Guyton, A.C. (1988). Insulina, glucagon y diabetes sacarina. *In*: Guyton, A. C. (ed.). Tratado de Fisiología Médica. Interamericana. México, D.F. pp.1132-1147.
- Grijalva, H.M.I., Ballesteros, V.M.N., y Cabrera, P.R.M. (2001). Contenido de cromo en alimentos y estimación de su ingestión dietaria en el Noroeste de México. *Arch. Lat. de Nutrición.* 51:105-110.
- Halaas, J.L., Gajiwala, K.S., Maffei, M., Cohen, S.L., Chait, B.T., Rabinowitz, D., Lallone, R.L., Burley, S.K., and Friedman, J.M. (1995). Weight-reducing effects of the plasma protein encoded by the obese gene. *Science.* 269:543-546.
- Hamm, R. (1986). Functional properties of the myofibrillar system and their measurements. *En*: Muscle as food. (Bechtel, P.J.), Academic Press, Orlando. pp. 135-199.
- Hayirli, A., Bremmer, D.R., Bertics, S.J., Socha, M.T., and Grummer, R.R. (2001). Effect of chromium supplementation on production and metabolic parameters in periparturient dairy cows. *J. Dairy Sci.* 84:1218-1230.
- He, T., Wei, C., Lin, X., Wang, B., and Yin, G. (2023). Meta-Analysis of the Effects of Organic Chromium Supplementation on the Growth Performance and Carcass Quality of Weaned and Growing-Finishing Pigs. *Animals* 13:2-6.
- Heinze, P.H., Smitt, M.C., Naude, R.T., and Boccadr, R.L. (1986). Influence of breed and age on collagen content and solubility of some ovine and goat muscle. *In* 32nd European Meeting of meat research workers proceeding. Hent, Belgium.
- Herring, H.K., Cassens, R.G., Suess, G.G., Brungardt, V.H., and Briskey, E.J. (1967). Tenderness and associated characteristics of stretched and contracted bovine muscles. *J. Food Sci.* 32:317.
- Hill, F. (1966). The solubility of intramuscular collagen in meat animals of various ages. *J. Food Sci.* 31:161-166.

- Hoffmann, K. (1987). Definition and measurement of meat quality. Proc. 36th ICoMST. La Habana, Cuba. pp. 941-954.
- Holownia, K., Chinnan, M.S., Reynolds, A.E., and Koehler, P.E. (2003). Evaluation on induced color changes in chicken breast during simulation of pink color defects. Poultry Sci. 82:1049-1059.
- Honikel, K.O. (1997). Reference methods supported by OECD and their use in Mediterranean meat products. Food Chemistry. 9:573-582.
- Honikel, K.O. (1998). Reference Methods for the assessment of physical characteristics of meat. Meat Sci. 49:447-457.
- Horst, E.A., Kvidera, S.K., Mayorga, E.J., Shouse, C.S., Al-Qaisi, M., Dickson, M.J., Ydstie, J., Ramirez, H.A., Keating, A.F., and Dickson, D.J. (2018). Effect of chromium on bioenergetics and leukocyte dynamics following immunoactivation in lactating Holstein cows. J. Dairy Sci. 101:5515-5530.
- Hung, A.T., Leury, B.J., Sabin, M.A., Collins, C.L., and Dunshea, F.R. (2014). Dietary nano-chromium tripicolinate increases feed intake and decreases plasma cortisol in finisher gilts during summer. Trop. Anim. Health Prod. 46:1483-1489.
- Ingraham, R.H., and Kappel, L.C. (1988). Metabolic profile testing. Vet. Clin. of North Am. Food Anim. Prac. 4:391.
- Iskra, R., Vlizlo, V., and Fedoruk, R. (2016). Role of chromium (III) in the nutrition of pigs and cattle. Agric. Sci. Pract. 2:56-62.
- Jason, K.A., and Yansey, J.W.S. (2013). Water-holding capacity of meat. In: Kert. (2013) Ed. The science of meat quality. Wiley-Blackwell. Iowa, USA.
- Jeebhoy, K.N., Chu, R.C., Marliss, E.B., Greenberg, G.R., and Bruce-Robertson, A. (1977). Chromium deficiency, glucose intolerance and neuropathy reversed by chromium supplementation in a patient receiving longterm total parenteral nutrition. Am. J. Clin. Nutr. 30:351-358.
- Jonhston, S.L., Mevissen, I.M.J., Southern, L.L., Matthews, J.O., Fernandez, J.M., and Owen, K.Q. (1999). Effect of L-carnitine and (or) chromium nicotinate on glucose tolerance and insulin sensitivity in growing pigs. J. Anim, Sci. 77(Suppl. 1):59 (Abstr.).
- Juturu, V., and Komorowski, J.R. (2002). Chromium: a systematic overview and metaanalysis. Diabetes. 51: A488.

- Khansari, D.N., Murgo, A.J., and Faith, R.E. (1990). Effects of stress on the immune system. *Inmunol. Today* 11:170-175.
- Kim, B.G., Lindemann, M.D., and Cromwell, G.L. (2009). The effects of dietary chromium (III) picolinate on growth performance, blood measurements, and respiratory rate in pigs kept in high and low ambient temperature. *J. Anim. Sci.* 87:1695-1704.
- Kitchalong, L., Fernandez, J.M., Bunting, L.D., Southern, L.L., and Bidner, T.D. (1995). Influence of chromium tripicolinate on glucose metabolism and nutrient partitioning in growing lambs. *J. of Anim. Sci.* 73:2694-2705.
- Kreider, R.B. (1999). Dietary supplements and the promotion of muscle growth with resistance exercise. *Sports Medicine.* 27:97-110.
- Kramer, A. (1994). Use of color measurements in quality control of food. *Food Technol.* 48:63-71.
- Koohmaraie, M. (1992). Muscle proteinases and meat aging. In 38th International Congress of Meat Science and Technology. Clermont-Ferrand. France. Proc. 1:61.
- Kornegay, E.T., Wang, Z., Wood, C.M., and Lindemann, M.D. (1997). Supplemental chromium picolinate influences nitrogen balance, dry matter digestibility, and carcass traits in growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 72:1319-1323.
- Lambertini, L., Vignola, G., Beone, G.M., Zaghini, G., and Formigoni, A. (2004). Effects of chromium yeast supplementation on growth performance and meat quality in rabbits. *World Rabbit Sci.* 12:33-47.
- Langwinsky, D., and Patino, H.O. (2002). A Nutrição de ruminantes e os complexos orgânicos de minerais. Tortuga. p. 52.
- Lawrie, R.A. (1998). Ciencia de la carne. Ed. Acribia S.A. Zaragoza. España. pp. 77-79.
- Liarn, T.F., Chen, S.Y., and Wu, C.P. 1993. The effect of various levels of chromium picolinate on growth performances and serum traits of pigs. *J. Chin. Soc. Anim. Sci.* 22:349-357.
- Lien, T.F., Horng, Y.M., and Yang, K.H. (1999). Performance, serum characteristics, carcass traits and lipid metabolism of broilers as affected by supplementation of chromium picolinate. *Br. Poult. Sci.* 40:357-363.
- Linschneer, W.G., and Vergroesen, A.J. (1988). Lipid digestion and metabolism. In: Modern Nutrition in Health and Disease. V. Young y M. Shills (Eds). Lea and Fediger, Philadelphia, USA.

- Lindemann, M.D., Carter, S.D., Chiba, L.I., Dove, C.R., LeMieux, F.M., and Southern, L.L. (2004). A regional evaluation of chromium tripicolinate supplementation of diets fed to reproducing sows. *J. Anim. Sci.* 10:2972-2977.
- Lindemann, M.D., Wood, C.M., Harper, A.F., Kornegay, E.T., and Anderson, R.A. (1995b). Dietary chromium picolinate additions improve gain: feed and carcass characteristics in growing-finishing pigs and increase litter size in reproducing sows. *J. Anim. Sci.* 73:457-465.
- Linderman, M.D. (1996). Chromium picolinate for the enhancement of muscle development and nutrient management. In: E.T. Kornegay (Ed.). *Nutrient management of food animals to enhance and protect environment*. CRC Press. Boca Ratón FL, USA. Pp. 303-314.
- Lister, D. (1980). Hormones, metabolism and growth. *Reprod. Nutr. Develop.* 20:225-233.
- Lu, Y.Y., He, R.G., Liang, L.H., Li, S.L., Chen, Y.L., and Zhuo, Q. (2015). Effects of different levels of methionine chromium on growth performance, apparent digestibility, serum biochemical indexes and hormone levels of growing pigs. *Feed Ind.* 14:46-50.
- Lukaski, H.C., Bolonchuc, W.W., Siders, W.A., and Milne, D.B. (1996). Chromium supplementation and resistance training: effects on body composition, strength and trace element status of men. *Am. J. of Clin. Nutr.* 63:954-965.
- Lukaski, H.C. (1999). Chromium as a supplement. *Ann. Rev. of Nutr.* 19:279-302.
- Lynn, R.B., Cao, G.Y., Considine, R.V., Hyde, T.M., and Caro, J.F. (1996). Autoradiographic localization of leptin binding in the choroid plexus of *ob/obdb/db* mice. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 219:884-889.
- Maffei, M., Halaas, J., Ravussin, E., Pratley, R., Lee, G., Zhang, Y., Fei, H., Kim, S., Lallone, R., and Ranganathan, S. (1995). Leptin levels in human and rodents: measurement of plasma leptin and *ob* RNA in obese and weight-reduced subjects. *Nat. Med.* 11:1155-1161.
- Malik, K.F., and Young, W.S. III. (1996). Localization of binding sites in the central nervous system for leptin (OB protein) in normal, obese (*ob/ob*), and diabetic (*db/db*) C57BL/6J mice. *Endocrinology.* 137:1497-1500.
- Matthews, J.O., Southern, L.L., Fernandez, J.M., Pontif, J.E., Bidner, T.D., and Odgaard, R.L. (2001). Effect of chromium picolinate and chromium propionate on glucose and insulin

kinetics of growing barrows and on growth and carcass traits of growing-finishing barrows. *J. Anim. Sci.* 8:2172-2178.

Mayorga, E.J., Kvidera, S.K., Seibert, J.T., Horst, E.A., Abuajamieh, M.M., Al-Qaisi, M., Lei, E., Ross, J.W., Johnson, C.D., Kremer, B., |Ochoa, L., Rhoads, R.P., and Baumgard, L.H. (2019). Effects of dietary chromium propionate on growth performance, metabolism, and immune biomarkers in heat-stressed finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 97:1185-1197.

McDowell, L.R. (1992). *Minerals in Animal and Human Nutrition*. Academic Press Inc. Harcourt Brace Jovanovich Publishers, San Diego, CA.

Mertz, W. (1987). *Trace Elements in Human and Animal Nutrition*. 5^a. Vol. 1, Academic Press. Inc., USA. Pp. 225-243.

Mertz, W. (1993). Chromium in human nutrition: A review. *Journal of Nutrition*. 123:626-633.

Miller, L.F., Judge, M.D., Diekeman, M.A., R.E., H., and Aarbele, E.D. (1989). Relationships among intramuscular collagen, serum hydroxyproline and serum testosterone in growing rams and wethers. *J. Anim. Sci.* 67:698.

Moonsie-Shageer, S., and Mowat, D.N. (1993). Effect of level of supplemental chromium on performance, serum constituents, and immune status of stressed feeder calves *J. Anim. Sci.* 71:232-238.

Mousaie, A., Valizadeh, R., Naserian, A.A., Heidarpour, M., Mehrjerdi, H.K. (2014). Impacts of feeding selenium-methionine and chromium-methionine on performance, serum components, antioxidant status, and physiological responses to transportation stress of Baluchi ewe lambs. *Biol. Trace Elem. Res.* 162:113-23.

Mooney, K.W., and Cromwell, G.L. (1995). Effect of dietary chromium picolinate supplementation on growth, carcass characteristics, and accretion rates on carcass tissues in growing-finishing swine. *J. Anim. Sci.* 73:3351-3362.

Mooney, K.W., and Cromwell, G.L. (1996). Effect of chromium picolinate on performance and tissue accretion in pigs with different lean gain potential. *J. Anim. Sci.* 74(Suppl 1.):65 Abstr.

Mooney, K.W., and Cromwell, G.L. (1997). Efficacy of chromium picolinate and chromium chloride as potential carcass modifiers in swine. *J. Anim. Sci.* 75:2661-2671.

- Moreno, C.L., Domínguez, V.I., Borquez, G.J.L., Sanchez, T.J., Pinos, R.J., Mariezcurrena, B.A., Morales, A.E., Salem, A.F. (2015). Effects of organic chromium supplementation to finishing lamb diet on growth performance, carcass characteristics and meat quality. *J. of Integr. Agric.* Doi: 10.1016/S2095-3119(14)60835-2.
- Mowat, D., Chang, N.X., and Yang, W.Z. (1993). Chelated chromium for stressed feeder calves. *Can. J. Anim. Sci.* 73:49.
- Mowat, D.N. (1997). Organic chromium in animal nutrition. Chromium Books. Guelph. Canadá.
- Munck, A., Guyre, P.A., and Holbrook, N.J. (1984). Physiological functions of glucocorticoids in stress and their relation to pharmacological actions. *Endocrinol. Rev.* 5:25-37.
- Murray, A.C. (1989) Factors affecting beef colour at time of grading. *Can. J. Anim. Sci.*, 69, 347-355.
- Nielsen, F.H. (1984). Ultratrace elements in nutrition. *Ann. Rev. Nutr.* 4:21-41.
- Noori, K., Farhoomand, P., and Ebrahimzadeh, S.K. (2012). Effects of the chromium methionine supplementation on performance, serum metabolites and carcass traits in broiler chickens. *J. Anim. Sci. Adv.* 2:230-235.
- Norman, J.L., Berg, E.P., Hetmann, H., and Lorenzen, C.L. (2003). Pork loin relative to sensory and instrumental tenderness and consumer acceptance. *Meat Sci.* 65:927-933.
- NOM-009-ZOO-1994. Proceso sanitario de la carne.
- NOM-051-ZOO-1995. Cuidado humanitario de los animales durante la movilización.
- NOM-033-ZOO-1995. Sacrificio humanitario de los animales domésticos y silvestres.
- NRC. (1998). Nutrient Requirements of Swine: 10th Revised Edition, Subcommittee on Swine Nutrition, Committee on Animal Nutrition, National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C., USA.
- Offenchaber, E.G. (1994). Promotion of chromium absorption by ascorbic acid. *Trace Eleven Electrolytes.* 11:178.
- Offer, G., and Knight, P. (1998). The structural basis of water-holding in meat; Part 2: Drip Losses. En: *Developments in Meat Science 4*, ed. R. Lawrie, p. 173-241. Elsevier, Oxford.
- Ohh, S.J., and Lee, J.Y. (2005). Dietary chromium-methionine chelate supplementation and animal performance. *Asian-Australas J. Anim. Sci.* 18:898-907. <https://doi.org/10.5713/ajas.2005.898>.

- Okada, S., Tanimaya, M., and Ohba, H. (1982). Mode of enhancement in ribonucleic acid synthesis directed by chromium (III) bound deoxyribonucleic acid. *Journal of Inorganic Biochemistry*. 17:41-49.
- Okada, S., Susuki, M., and Ohba, H. (1983). Enhancement of ribonucleic acid synthesis by chromium (III) in mouse liver. *J. of Inorg. Biochem.* 19:95-103.
- Okada S., Tsukada H., and Tezuka M. (1989). Effect of chromium (III) on nuclear RNA-synthesis. *Biol. Trace Elem. Res.* 21:35-39.
- Olivas, J.A., Díaz, T.L.M., Munguia, X.J. Molina, B.R.M., y Hernández, Ch. J.F. (2017). Indicadores de calidad en carne de cerdo de diferentes centros comerciales de Ciudad Obregón, Sonora. *Nacameh*. 11:50-51.
- Oliver, M.A., Gispert, M., Tibau, J., and Diestre A. (1991). The measurement of light scattering and electrical conductivity for the prediction of pig meat at various times postmortem. *Meat Sci.* 29:141-151.
- Ondřej, B., Vavříšínová, K., Petrák, J., Debrecéni, O., and Hellová, D. (2013). The analysis of pork quality affected by diet containing organic chromium. *Acta Fytotechnica et Zootechnia*. 16:19-24.
- Palhari, C. (2014). Desempenho e Qualidade de Carcaça de Garrotes Nelore e F1 Rubia Galega x Nelore Suplementados com Cromo Picolinato. Mestre em Zootecnia. Universidade Federal de Mato Grosso. Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Programa de Pós-graduação em Zootecnia.
- Page, T. G., Ward, T.L., Southern, L.L., and Thompson, D.L. (1991). Effect of chromium picolinate on grown hormone, cholesterol, insulin and other components in serum of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 69:357-365.
- Page, T.G., Bolemann, M.M., Pike, M.M., Ward, T.L., Bolemann, S.J., Southern, L.L., Bidner, T.D., and Pontif, J.E. (1992). Effect of chromium picolinate on carcass traits and aging on pork quality. *J. Anim. Sci.* 70 (Suppl. 1): p. 218 (Abstr).
- Page, T.G., Southern, L. L., Ward, D. L., and Thompson, Jr. (1993). Effect of chromium picolinate on growth and serum and carcass traits of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 71:656-662.

- Page, T.G., Southern, L.L., Pontif, J.E., and Ward, T.L. (1993a). Effect of chromium tripicolinate or chromium chloride on growth, carcass traits and plasma metabolites of growing-finishing pigs. In: 15th Int. Congr. Nutr. Adelaide Australia. p.199 (Abstr.).
- Pearson, A.M. (1966). Desiderability of beef, its characteristics and their measurement. *J. Anim. Sci.* 25:843-854.
- Pearson, A.M., Love, J.D., and Shorland, F.B. (1977). Warmed-over flavor in meat, poultry and fish. *Adv. Food Res.* 23:1.
- Pearson, A.M., and Young, R.B. (1989). Composition and Structure Cap I. and Skeletal Muscle fiber types. Cap. 9. In: *Muscle and meat Biochem.* Academic Press, London. pp. 235-265.
- Pechova, A., and Pavlata, L. (2007). Chromium as an essential nutrient: a review. *Veterinari Medicina*, 52:1-8.
- Pechova, A., Illek, J., Sindelar, M., and Pavlata, L. (2002). Effects of chromium supplementation on growth rate and metabolism in fattening bulls. *Acta Veterinaria Brno.* 71: 535-541.
- Peres, L.M., Bridil, A.M., da Silva, C.A., Andreo, N., Barata, C.C.P. and Dário, G.G.N. (2014). Effect of supplementing finishing pigs with different sources of chromium on performance and meat quality. *Revista Brasileira de Zootecnia.* 43:369-375.
- Perez-Alvarez, J.A., Fernandez-Lopez, J., Sayas-Barberá, M.E., y Cartagenagracia, R. (1998). Caracterización de los parámetros de color de diferentes materias primas usadas en la industria cárnica. *Eurocarne.* 63:115-122.
- Pla, M., Guerreiro, L., Guardia, D., Oliver, M.A., and Blasco, A. (1998). Carcass characteristics and meat quality of rabbit line selected for different objectives: I. Between lines comparison. *Liv. Prod. Sci.* 54:115-123.
- Purchas, R.W. (1990) An assessment of the role of pH differences in determining the relative tenderness of meat from bulls and steers. *Meat Sci.* 27:129-140.
- Ramírez, T.J.A. (2004). Características bioquímicas del músculo, calidad de la carne y de la grasa de conejos seleccionados por velocidad de crecimiento. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. España.
- Ranken, M.D. (2003). Manual de la industria de carne. Mundi-Prensa. Madrid, España. p.16-54.
- Reagan, J.O., Carpenter, Z.L., and Smith, G.E. (1976). Age-related traits affecting the tenderness of the bovine longissimus muscle. *J. Anim. Sci.* 43:1198.

- Rentería, F.J.A., y Cuarón, I.J.A. (1998). Picolinato de cromo en la dieta de cerdos. *Tec. Pecu. Mex.* 36:121-139.
- Robert, C., Palin, M.F., Coulombe, N., Roberge, C., Silversides, F.G., Benkel, B.F., McKay, R. M., and Pelletier, G. (1998). Backfat thickness in pigs is positively associated with leptin mRNA levels. *Can. J. Anim. Sci.* 78:473-482.
- Rodríguez, G.H., Susin, I., Vaz, AP., Quirino, C.M., Shibata, F.U., and Contreras, C.J.C. (2008). Polpa cítrica el rações para cordeiros em confinamiento: características da carçaca e qualidade da carne. *R. Bras. Zootec.* 37:1869-1875.
- Roginski, E.F., and Mertz, W. (1969). Effects of chromium (III) supplementation on glucose and amino acid metabolism in rats fed a low protein diet. *J. Nutr.* 97:525-530.
- Rubio, M.S., Delgado, E.J., Iturbe, F.A., Méndez, R.D., Cassís, L., Rosiles, R. (2005). Composición y calidad de la carne nacional e importada en el mercado formal de México. In: II encuentro. Participación de la mujer en la Ciencia. León, Guanajuato.
- Sales, J., and Jancík, F. (2011). Effects of dietary chromium supplementation on performance, carcass characteristics, and meat quality of growing-finishing swine: A meta-analysis. *J. Anim. Sci.* 89:4054-4067.
- Santos, S.J., Bessa, R.J.N., and Santos, S.F. (2002). Effect of genotype, feeding system and slaughter on the quality lambs II: Fatty acid composition of meat. *Liv. Prod. Sci.* 77:187-194.
- Sañudo, C., Santaolalia, P., Maria, G., Osorio, M., and Sierra, I. (1996). Influence of carcass weight on instrumental and sensory lamb meat quality in intensive productions systems. *Meat Sci.* 42:195-202.
- Sañudo, C. (1991). La calidad organoléptica de la carne con especial referencia a la especie ovina. Factores que la determinan, métodos de medida y causas de variación. Facultad de Veterinaria. Universidad de Zaragoza.
- Schrauzer, G.N., Shrestha, K.P., Molenaar, T.B., and Mead, S. (1986). Effects of chromium supplementation on feed energy utilization and the trace element composition in the liver and heart of glucose-exposed young mice. *Biol. Trace Elem. Res.* 9:79-87.
- Schwarz, K., and Mertz, Z. (1957). Chromium (III) and glucose tolerance factor. *Arch. Biochem. Biophys.* 85:292-295.

- Shackelford, S.D., Puerse, D.E., Smith, G.C., Griffin, C.L., Stiffler, D.M., and Savell, J.W. (1992). Lean color characteristics of bullock and steer beef. *J. Anim. Sci.* 70:465-469.
- Shackelford, S.D., Koomaraie, M., Whipple, G., Wheeler, M., Miller, M.F., Crouse, J.D., and Reagan, J.O. (1991). Predictors of beef tenderness: development and verification. *J. Food Sci.* 56:1130.
- SAS. (2002). User's Guide. Statistics, Statistical Version 9. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Sayas, M.E. (1997) Contribuciones al proceso tecnológico de elaboración del jamón curado: aspectos físicos, fisicoquímicos y ultraestructurales en los procesos de curado tradicional y rápido. Tesis Doctoral. Valencia. Universidad Politécnica de Valencia.
- Seibert, J.T., Abuajamieh, M., Sanz-Fernandez, m.v, Johnson, J.S., Kvidera, S.K., Horst, E.A., Mayorga, E.J., Lei, S., Patience, J.F., Ross, J.W., Rhoads, R.P., Johnson, R.C., Lonergan, S.M., Perfield, J.W., and Baumgard, L.H. (2018). Effects of heat stress and insulin sensitizers on pig adipose tissue. *J. Anim. Sci.* 96:510-520.
- Seaborn, C.D., and Soteker, B.J. (1989). Effects of starch, sucrose, fructose and glucose on chromium absorption and tissue concentration in obese and lean mice. *Journal of Nutrition.* 119:1444-1451.
- Sierra, X., Gil, F., Perez-Enciso, M., Oliver, M.A., Vazquez, J.M., Gispert, M., Díaz, I., Moreno, F., Latorre, R., and Noguera, J.L. (1998). A comparison of carcass, meat quality and histochemical characteristics of Iberian (Guadyerbas line) and Landrace pigs. *Liv. Prod. Sci.* 56:215-223.
- Sierra, I., Sañudo, C., Olleta, J.L., y Forcada, F. (1998). Apport a l'étude comparative de la qualité de la carcasse et de la viande chez des agneaux légers. Problèmes concernant l'importation de carcasses. In 3rd World Congress of Sheep and Beef Cattle Breeding. pp. 513-515, Paris. Francia.
- Sierra, S.V. (2010). Evolución post-mortem de parámetros indicativos de calidad en carne de vacuno: efecto de la raza y el gen de la hipertrofia muscular. Tesis de Doctorado. Universidad de Oviedo. Departamento de morfología y biología celular. Area de sistemas de producción animal del servicio regional de investigación y desarrollo agroalimentario (SERIDA).
- Smith, D.R. (1993). Lipid composition of red meat and factors that influence risk for coronary heart disease. *Rev. Fac. Agron.* 10:35-41.

- Smulders, F.J.M., Marsch, B.B., Swartz, D.R., Rusell, R.L., and Hoenecke, M.E. (1990). Beef tenderness and sarcomere length. *Meat Sci.* 28:349.
- Solomon, M.B., Lynch, G.P., and Lough, D.S. (1992). Influence of dietary palm oil supplementation on serum lipid metabolites, carcass characteristics, and lipid composition of carcass tissues of growing ram and ewe lambs. *J. Anim. Sci.* 70:2746-275.
- Soltan, M.A., Almujaalli, A.M., Mandour, M.A. and El-Shinway Abeer M. (2012) Effect of dietary chromium supplementation on growth performance, rumen fermentation, characteristics and some blood serum units of fattening dairy calves under heat stress. *Pakistan J. of Nutr.* 11:751-756.
- Spacek, T., Santorová, J., Zacharovová, K., Berková, Z., Hlavatá, L., Saudek, F., and Jezek, P. (2007). Glucose-stimulated insulin secretion of insulinoma INS-1E cells is associated with elevation of both respiration and mitochondrial membrane potential. *Int. J. Biochem. Cell Biol.* 40:1522-1535.
- Spears, J.W., Lloyd, K.E., and Krafka, K. (2017). Chromium concentrations in ruminant feed ingredients. *J. Dairy Sci.* 100:3584-90.
- Stahlhut, H.S., Whisnant, C.S., and Spears J.W. (2006). Effect of chromium supplementation and copper status on performance and reproduction of beef cows. *Anim. Feed Sci. and Tech.* 128:266-275.
- Steel, D.R.G., Torrier, J.H., and Dickey, D.A. (1997). *Bioestadística: Principios y Procedimientos*. 2^a ed. McGraw-Hill. México, D.F., pp. 622.
- Sun, Y.J., Ramírez, J., Woski, S.A., and Vincent, J.B. (2000). The binding of trivalent chromium to low-molecular-weight chromium-binding substance (LMWCr) and the transfer of chromium from transferrin and chromium picolinate to LMWCr. *J. of Biol. Inorg. Chem.* 5:129-136.
- Subiyatno, A., Mowat, D.N., and Yang, W.Z. (1996). Metabolite and hormonal responses to glucose or propionate infusions in periparturient dairy cows supplemented with chromium. *J. of Dairy Sic.* 78:1436-1445.
- Thompson, E.H., Allen, C.E., and Meade, R.J. (1973). Influence of copper on stearic acid desaturation and fatty acid composition in the pig. *J. Anim. Sci.* 36:868-873.

- Tian, Y.Y., Zhang, L.Y., Dong, B., Cao, J., Xue, J.X., and Gong, L.M. (2014). Effects of chromium methionine supplementation on growth performance, serum metabolites, endocrine parameters, antioxidant status, and immune traits in growing pigs. *Biol. Trace Elem. Res.* 1:134-141.
- Tian, Y.Y., Gong, L.M., Xue, J.X., Cao, J., and Zhang, L.Y. (2015). Effects of graded levels of chromium methionine on performance, carcass traits, meat quality, fatty acid profiles of fat, tissue chromium concentrations, and antioxidant status in growing-finishing pigs. *Biol. Trace Elem. Res.* 168:110-121.
- Toghyani, M., Khodami, A., and Ali, G.A. (2008). Effect of organic and inorganic chromium supplementation on meat quality of heat-stressed broiler chicks. *Am. J. of Anim. and Vet. Sci.* 3:62-67.
- Torres, R.J.C. (2013). Pruebas de crecimiento y calidad de la carne de ovinos Hampshire-Suffolk y Pelibuey. Tesis de Maestría. Colegio de Post-graduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.
- Touraille, C. (1978). Evolution de la composition corporelle du poulet en fonction de l'âge, et conséquences sur la qualité. INRA: La composition corporelle des volailles. 59-70.
- Tshabalala, P.A., Strydom, P.E., Webb, E.C., and Kocka, H.L.D. (2003). Meat quality of designated South African indigenous goat and sheep breeds. *Meat Sci.* 65:563-570.
- Uyanik, F. (2001). The effect of dietary chromium supplementation on some blood parameters in sheep. *Biol. Trace Elem. Res.* 84:93-101.
- Van Heugten, E., and Sepears, J.W. (1997). Immune response and growth of stresses weaning pig fed diets supplemented with organic or inorganic forms of chromium. *J. Anim. Sci.* 75:409-416.
- Van Hoof, J. (1981). Objectives methods for texture evaluation of poultry meat. In *Proc. XI EUR. Symp. on the Quality of Poultry Meat*. Appeldoorn, the Netherlands. 165-179.
- Varady, K.A., and Hellerstein, M.K. (2007). Alternate-day fasting and chronic disease prevention: A review of human and animal trials. *Am. J. Clin. Nutr.* 1:7-13. [CrossRef].
- Velásco, S., Cañeque, V., Pérez, C., Lauzurica, S., Díaz, M.T., Huidobro, F., and González, J. (2001). Fatty acid composition of adipose depot of suckling lamns raised under different production system. *Meat Sci.* 59:325-333.

- Vernon, R.G., and Sasaki, S. (1991). Control of responsiveness of tissues to hormones. In: Tsuda, T., Y. Sasaki. and R. Kawashima. (eds.). *Physiological Aspects of Digestion and Metabolism in Ruminants*. Proc. 7th Int. Symp. Rumin. Physiol. Agost. 28-Sept. 1. 1989. Japan. Academic Press, San Diego, CA. pp:155-182.
- Vincent, J.B. (1999). Mechanism of chromium action: lowmolecular- weight chromium-binding substance. *J. Am. Coll. Nutr.* 18:6-12.
- Vincent, J.B. (2000). The biochemistry of chromium. *Journal of Nutrition.* 130:715-718.
- Ward, T.L., Southern, L.L., and Bidner, T.D. (1997). Interactive effects of dietary chromium tripicolinate and crude protein in growing-finishing pigs provided iadequate and adequate pen space. *J. Anim. Sci.* 75:1001-1008.
- Warris, P.D., Brown, S.N., and Adams, S.J.M. (1990). Variation in heam pigment concentration and color in meat from British pigs. *Meat Sci.*, 28, 321-329.
- Wada, K., Shirai, K., and Kawamura, A. (1980) Properties of collagens from pigskins of different ages. *J. Am. Leather Chem. Assoc.* 75:90.
- Wood, J.D., Nute, G.R., Richardson, R.I., Whittington, F.M., Southwood, O., Plastow, G., Mansbridge, R., Da Costa, N., and Chang, K.C. (2004). Effects of breed, diet and 16 muscles on fat deposition and eating quality in pigs. *Meat Sci.* 67:651-667.
- Xiao, J.W., Wang, Y., Deng, F.Q., Liao, Y.H., and Zhu, G.H. (2012). Effects of different organic chromium sources on production performance and carcass quality of growing finishing pigs. *Feed Rev.* 363:42-44.
- Xu, X., Liu, L., Long, S.F., Piao, X.S., Ward, T.L., and Ji, F. (2017). Effects of chromium methionine supplementation with different sources of zinc on growth performance, carcass traits, meat quality, serum metabolites, endocrine parameters, and the antioxidant status in growing-finishing pigs. *Biol. Trace Elem. Res.* 1:70-78.
- Yan, X., Zhang, W., Cheng, J., Wang, R., Kleemann, D. O., Zhu, X., and Jia, Z. (2008). Effects of chromium yeast on performance, insulin activity and lipid metabolism in lambs fed different dietary protein levels. *Asian Aust. J. of Anim. Sci.* 21:853-860.
- Yen, X., Morrison, C., and Ramsay, T.G. (1997). Porcine leptin sequence and expression in lean and obese pigs. *FASEB J.* 11: A415.

Zhang, Y., Proenca, R., Maffei, M., Barone, M., Leopold, L., and Friedman, J.M. (1994).
Positional cloning of the mouse obese gene and its human homologue. *Nature*. 372:425-432.

11. ANEXOS

Anexo 1. Artículo científico publicado en la revista internacional indizada Canadian Journal of Animal Science.



OPEN ACCESS | Research Article

Organic chromium supplementation in the diet of three porcine genotypes with different growth potential: effects on growth, metabolites, hormones, and carcass traits

J. Falcón-Martínez , I.A. Domínguez-Vara , N. Pescador-Salas , D. Trujillo-Gutiérrez , J.L. Bórquez-Gastelum , J.E. Sánchez-Torres , E. Morales-Almaraz , J. Mondragón-Ancelmo , M.A. Rodríguez-Gaxiola , G. Velázquez-Garduño , G. Grigioni , and F. Grageola-Núñez 

^{*}Departamento de Nutrición Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México, Campus Universitario "El Cerrillo", Toluca, Estado de México CP 50090, México; [†]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal, Ajuchitlán, Querétaro, Colón CP 76280, México; [‡]Centro Universitario Temascaltepec, Universidad Autónoma del Estado de México, Temascaltepec, Estado de México CP 51300, México; [§]Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa CP 8000, México; ^{||}Universidad Tecnológica del Valle de Toluca, Unidad Académica Capulhuac, Santa María Atarasquillo, Estado de México CP 52700, México; [¶]Instituto de Tecnología de Alimentos, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA - Instituto de Ciencia y Tecnología de Sistemas Alimentarios Sustentables INTA CONICET, Buenos Aires C1425FQB, Argentina; ^{‡‡}Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Nayarit, Ciudad de la Cultura "Amado Nervo", Compostela, Nayarit CP 63155, México

Corresponding author: I.A. Domínguez-Vara (email: igy92@hotmail.com)

Abstract

Chromium (Cr) potentiates insulin, influences the weight gain composition and carcass through changes in metabolites and hormones. The aim was to analyze the performance, carcasses, metabolites, and hormones of three porcine genotypes, G1 = Mexican Hairless × Yorkshire, G2 = Asian × Mexican Hairless, and G3 = Asian × Yorkshire, males and females with dietary Cr-L methionine (Cr-Met) (0.250 mg kg⁻¹ DM). The experimental design was completely randomized factorial (3-genotypes × 2-sex × 2-Cr levels). The fattening with 84 pigs, live weight (LW) = 20.65 ± 0.68 kg, lasted 126 days, and were slaughtered. Thirty-six pigs were sampled to analyze metabolites and hormones in blood. The G1 ingested more (P = 0.04) total and daily dry matter (DMTI, DDMI). G2 and G3, and Cr-Met improved daily weight gain (DWG) and feed conversion (FC) (P = 0.05). Cr-Met reduced glucose (P = 0.05). Genotype, sex, and Cr-Met did not affect hormone levels (P > 0.05). G3 and Cr-Met increased HCW and CCW; Cr-Met reduced back fat (P = 0.05). We concluded that G2 and G3 had better DWG and FC; Cr-Met improved DWG and FC. Cholesterol was different between genotypes and sexes; Cr-Met reduced the glucose level. The levels of hormones were similar. The HCW and CCW of G2 and G3, sows and Cr-Met were higher; Cr-Met reduced the BF12thR.

Key words: fattening pigs, Cr-L methionine, carcass quality, *longissimus thoracis*, metabolism

1. Introduction

Studies to improve the meat production efficiency of live-stock species suggest that metabolic modifiers are an option to improve the growth performance, carcass traits, and meat quality (Arvizu et al. 2011). Cr is a trace mineral vital for humans and animals in the metabolism of carbohydrates, lipids, and proteins (Mertz 1993); its most important function is to increase insulin adhesion to the surface of the cell membrane for the entry of glucose, fatty acids, and amino acids into the cell (Vincent 2000).

In adipose tissue, cortisol stimulates the efflux of fatty acids, therefore increasing the content of free fatty acids in plasma and their oxidation to produce energy (Guyton 1988). In fattening pigs, one objective of dietary Cr is to produce lean carcasses; in this sense, Cr is expected to promote greater deposition of protein and muscle tissue.

The hormone leptin participates in the regulation of energy balance and body composition; it is considered the product of the expression of the obesity gene, which is expressed mainly in adipose tissue (Zhang et al. 1994; Bidwell et al. 1997). Likewise, Yen et al. (1997) found that obesity gene expression and plasma leptin concentrations are higher in pigs selected for greater fat deposition. In studies of Robert et al. (1998), there were differences in leptin mRNA levels, showing that fat pigs have a higher level of leptin mRNA versus lean pigs. These findings indicate that, in pigs, leptin expression may be associated with subcutaneous fat accumulation.

Can. J. Anim. Sci. 105: 1–14 (2025) | [dx.doi.org/10.1139/cjas-2024-0088](https://doi.org/10.1139/cjas-2024-0088)

1