



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MEXICO

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**“EFECTO DE LA SUPLEMENTACIÓN DE PROTEINATO DE COBRE EN
LAS CARACTERÍSTICAS HISTOQUÍMICAS Y DE LA CANAL DE
CERDOS PELÓN MEXICANO Y LANDRACE X DUROC”**

T E S I S

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

PRESENTA:

MARÍA BEATRÍZ MELIZA COLÍN ÁLVAREZ

**DR. IGNACIO A. DOMÍNGUEZ VARA
DIRECTOR DE TESIS**

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México; octubre de 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**“EFECTO DE LA SUPLEMENTACIÓN DE PROTEINATO DE COBRE EN
LAS CARACTERÍSTICAS HISTOQUÍMICAS Y DE LA CANAL DE
CERDOS PELÓN MEXICANO Y LANDRACE X DUROC”**

T E S I S

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

PRESENTA:

MARÍA BEATRÍZ MELIZA COLÍN ÁLVAREZ

**DR. IGNACIO A. DOMÍNGUEZ VARA
DIRECTOR DE TESIS**

**DR. ROBERTO MONTES DE OCA JIMÉNEZ
ASESOR**

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México; octubre de 2021.

RESUMEN

En la presente investigación, dos experimentos fueron realizados para evaluar los efectos del cobre, de proteínato de Cu, adicionado en la dieta, sobre la respuesta productiva, características de la canal, calidad de la carne y tipo de fibras musculares en cerdos comerciales F1 Landrace X Duroc y cerdos Pelón Mexicano en etapa de finalización. En el primer experimento el objetivo fue evaluar el efecto de incluir 0, 75, 150 y 225 mg Cu kg⁻¹ MS, de proteínato de cobre (P-Cu), en el alimento sobre el crecimiento, las características de la canal y la calidad de carne de cerdos para abasto F1 Landrace X Duroc. Se emplearon 24 porcinos (12 hembras y 12 machos), peso inicial 60.3±0.55 kg, alimentados con dieta basal (DB) durante 46 días, distribuidos en un diseño completamente aleatorizado, factorial 4x2 (niveles de P-Cu y sexo): T1=DB (0 mg de P-Cu kg⁻¹ MS), T2=DB+75 mg de P-Cu, T3=DB+150 mg de P-Cu y T4=DB+225 mg de P-Cu. La dosis de 225 mg de P-Cu aumentó la ganancia de peso (GDP) y la eficiencia alimenticia (EFA) ($P<0.05$). El P-Cu aumentó el área de chuleta (ACH) en hembras y redujo la grasa dorsal (GD) en machos ($P<0.05$). El P-Cu aumentó (12.6%) el rendimiento de cortes primarios (RCP) ($P<0.05$). En los tratamientos 3 y 4 se redujo la pérdida de agua 58.5 y 82.2% ($P<0.05$). El P-Cu afectó ($P<0.01$) el pH final y el índice a* ($P<0.05$) del músculo *Longissimus thoracis*. En conclusión, el P-Cu mejoró la GDP, la EFA, el ACH y el RCP, y redujo la GD en la canal. El segundo experimento tuvo como objetivo evaluar 0, 75, 150 y 225 mg Cu kg⁻¹ MS, proteínato de Cu, en la dieta de cerdos Pelón Mexicano (CPM) sobre el crecimiento, características de la canal, calidad de la carne y composición de fibras musculares. Se usaron 24 cerdos, 6/tratamiento, en un diseño completamente al azar. El Cu aumentó ($P<0.05$) la ganancia de peso (GDP) pero redujo ($P<0.05$) el consumo (CMS) y la conversión alimenticia (CA). El Cu aumentó ($P<0.05$) el pH y peso de la canal (PC), redujo ($P<0.05$) la grasa dorsal (GD), la pérdida por goteo (PG) y la temperatura (T). El Cu afectó ($P<0.05$) los índices de coloración b* a 48 h, y el índice h* a 24 y 48 h. El Cu afectó ($P<0.05$) el número, composición y área relativa de las fibras tipo I y BII. El Cu mejoró el crecimiento y PC, redujo la GD, la PG y T, y modificó la composición de fibras tipo I y IIB.

Palabras claves: Cobre, cerdos, canales, calidad carne, engorda, fibras musculares, histoquímica.

ABSTRACT

In the present investigation, two experiments were carried out to evaluate the effects of copper, Cu proteinate, added in the diet, on the productive response, carcass characteristics, meat quality and type of muscle fibers in commercial F1 Landrace X Duroc pigs and Mexican Hairless pigs in finishing stage. In the first experiment, the objective was to evaluate the effect of including 0, 75, 150 and 225 mg Cu kg⁻¹ DM, of copper proteinate (P-Cu), supply in the food on growth, carcass characteristics and quality of meat of F1 Landrace X Duroc pigs. 24 pigs were used (12 females and 12 males), initial weight 60.3±0.55 kg, a basal diet (BD) was fed for 46 days, distributed in a completely randomized design, 4x2 factorial (P-Cu levels and sex): T1 = BD (0 mg of P-Cu kg⁻¹ DM), T2=BD+75 mg of P-Cu, T3=BD+150 mg of P-Cu and T4=BD+225 mg of P-Cu. The 225 mg dose of P-Cu increased daily weight gain (DWG) and feed efficiency (FE) (P<0.05). P-Cu increased chop area (CHA) in females and reduced back fat (BF) in males (P<0.05). P-Cu increased (12.6%) the yield of primary cuts (YPC) (P<0.05). In treatments 3 and 4, water loss was reduced by 58.5 and 82.2% (P<0.05). The P-Cu affected (P<0.01) the final pH and the index a* (P<0.05) of the *Longissimus thoracis* muscle. In conclusion, P-Cu improved DWG, FE, CHA and YPC, and reduced BF in the carcass. The second experiment aimed to evaluate 0, 75, 150 and 225 mg Cu kg⁻¹ DM, Cu proteinate, in the diet of Mexican Hairless (MHP) pigs on growth, carcass characteristics, meat quality and composition of muscle fibers. 24 pigs, 6/treatment, were used in a completely randomized design. Cu increased (P<0.05) daily weight gain (DWG) but reduced (P<0.05) feed intake (FI) and feed conversion (FC). Cu increased (P<0.05) the pH and weight of the carcass (CW), reduced (P<0.05) the back fat (BF), the drip loss (DL) and the temperature (T). Cu affected (P<0.05) the b* index at 48 h, and the h* index at 24 and 48 h. Cu affected (P<0.05) the number, composition and relative area of type I and BII fibers. Cu improved growth and CW, reduced BF, DL and T, and modified the composition of type I and IIB fibers.

Key words: Copper, pigs, carcass traits, meat quality, fattening, muscle fibers, histochemistry.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT	iv
DEDICATORIA.....	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTOS	¡Error! Marcador no definido.
CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Literatura Citada.....	12
2. CAPÍTULO II. REVISION DE LITERATURA	16
2.1 Los minerales	16
2.1.1 Generalidades.....	16
2.1.2 El cobre (Cu). Aspectos generales	16
2.1.3 Esencialidad del cobre	17
2.1.5 Absorción y transporte.....	18
2.1.6 Excreción	19
2.2 Toxicidad del cobre e interacciones con otros minerales.....	20
2.3 Fuentes de cobre y biodisponibilidad.....	22
2.4 Niveles de Cu en tejidos.....	27
2.5 Concentración máxima tolerable.....	27
2.6 Cobre y salud humana.....	30
2.7 Valor nutrimental del cobre en la producción animal.....	30
2.8 Requerimientos de cobre.....	31
2.9 Digestibilidad del cobre	32
2.10 Biodisponibilidad del cobre	33
2.11 Efecto del cobre en las características de la canal y calidad de carne de cerdos.....	35

2.12 Composición química de la carne	37
2.13 Calidad de la carne	38
2.14 Parámetros fisicoquímicos que determinan la calidad de la carne	39
2.14.1 pH muscular	39
2.14.2 Capacidad de retención de agua.....	40
2.14.3 Color	42
2.14.4 Textura	44
2.15 Colágeno.....	47
2.16 Lípidos de la carne y grasa	50
2.17 Ácidos grasos	51
2.18 Fibras musculares y su relación con la calidad de la carne	52
2.19 Morfología de la fibra muscular	53
2.20 Relación entre el pH y las fibras musculares	54
2.21 Relación entre la grasa intramuscular y las fibras musculares	55
2.22 Relación entre el color de la carne y las fibras musculares.....	56
2.23 Relación de la calidad sensorial de la carne y las fibras musculares.....	56
2.24 Literatura citada.....	57
3. CAPÍTULO III. ARTÍCULO CIENTÍFICO 1. EFECTO DE LA INCLUSIÓN DE PROTEINATO DE COBRE EN LA DIETA SOBRE EL COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO, CARACTERÍSTICAS DE LA CANAL Y CALIDAD DE LA CARNE DE CERDOS EN FINALIZACIÓN.....	75
3.1 RESUMEN.....	75
3.2 SUMMARY	75
3.3 INTRODUCCIÓN	76
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS	76
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	79
3.6 CONCLUSIÓN	83
3.7 LITERATURA CITADA.....	89

4. CAPÍTULO IV. ARTÍCULO CIENTÍFICO 2. EFECTO DEL PROTEINATO DE COBRE EN EL CRECIMIENTO, CARACTERÍSTICAS DE LA CANAL, CALIDAD DE LA CARNE Y COMPOSICIÓN DEL TIPO DE FIBRAS DEL <i>LONGISSIMUS THORACIS</i> DE CERDOS PELÓN MEXICANO.	93
4.1 RESUMEN.....	93
4.2 INTRODUCCIÓN	93
4.3 MATERIALES Y MÉTODOS	95
4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	98
4.5 CONCLUSIÓN.....	101
4.6 LITERATURA CITADA.....	102
5. CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN GENERAL.....	113
6. CAPÍTULO VI. ANEXOS.....	114
6.1 Anexo 1. Memorias en congresos: LI Reunión Nacional de Investigación Pecuaria 2015. Toluca, Estado de México.....	114
6.2 Anexo 2. Artículo científico publicado en la revista: Tropical and Subtropical Agroecosystems	115
6.3 Anexo 3. Artículo científico enviado a la revista: Canadian Journal Animal Science	118

ÍNDICE DE CUADROS

(Capítulo II)

Cuadro 1. Contenido de Cu en ingredientes alimenticios usados en dietas para cerdos.....	26
Cuadro 2. Concentraciones de Cu en tejidos y fluidos de animales (mg/kg) complementados con Cu inorgánico (CuSO ₄) en la dieta.....	28
Cuadro 3. Biodisponibilidad relativa de fuentes orgánica e inorgánicas de Cu para cerdos.	34
Cuadro 4. Contenido nutricional de la carne de cerdo.	37
Cuadro 5. Características de las carnes PSE y DFD.	40
Cuadro 6. Parámetros de color de diferentes músculos y especies pecuarias.	44
Cuadro 7. Valores medios de la variable esfuerzo al corte en músculos <i>Longissimus thoracis</i> y <i>dorsi</i> de cerdos y ovinos en engorda.....	47
Cuadro 8. Contenido medio de ácidos grasos en <i>Longissimus dorsi</i> de ovinos y cerdos.	52
Cuadro 9. Relación entre el tipo de fibras musculares y la calidad de la carne.	57

ÍNDICE DE FIGURAS

(Capítulo IV)

Figura 1. Fotografías (10x) que muestran los tres tipos de fibras musculares (I, IIA y IIB) en corte transversal del *Longissimus thoracis*, tinción con la técnica de ATPasa miosinica ácida, de cerdos Pelón Mexicano en finalización suplementados con 0 a), 75 b), 150 c) y 225 d) mg de Cu kg⁻¹ MS, como proteinato de cobre, en la dieta.....114

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El cobre (Cu) es un elemento esencial para muchos procesos fisiológicos del organismo, entre otras, interviene en la regeneración de células dañadas por radicales libres, actúa en la síntesis de hemoglobina, elastina, mielina y colágeno. En general, concentraciones de 5 a 25 mg de Cu kg⁻¹ MS en la dieta cubren los requerimientos de cerdos para estos procesos (NRC, 2012). Sin embargo, cuando se suministran cantidades mayores (100 a 250 mg de Cu kg⁻¹ MS) este micromineral mejora el crecimiento de los cerdos (Cromwell *et al.*, 1989; Dove, 1993; Hill *et al.*, 2000; Hill y Spears, 2001), reduce la grasa en la canal y aumenta el contenido de ácidos grasos insaturados en la carne (Amer y Elliot, 1973; Pettigrew y Esnaola, 2001); no obstante, la respuesta disminuye con la edad y con el suministro durante períodos prolongados de tiempo (Hastad *et al.*, 2001). Por otro lado, la absorción del Cu en el intestino es baja y varía dependiendo de la fuente (inorgánico u orgánico), el Cu inorgánico se absorbe poco, de 0.5 a 4.0% (Wapnir, 1998); mientras que el Cu orgánico tiene una mayor absorción y retención tisular. En este sentido, el proteínato de cobre, es un quelato orgánico que resulta de la unión de una sal de cobre soluble con aminoácidos, lo hace más biodisponible y bioactivo, reduciendo su eliminación hacia el ambiente (Murray *et al.*, 1997; Sciavon *et al.*, 2000).

En la oxidación de lípidos influyen factores relacionados con la dieta, por ejemplo, el grado de insaturación de los lípidos ingeridos y el contenido de antioxidantes y pro oxidantes (Buckley, Morrissey, y Gray, 1995). El Cu como micronutriente esencial, participa en múltiples funciones bioquímicas (Davis y Mertz, 1987); como ion metálico, cataliza la peroxidación de lípidos (Apte & Morrissey, 1987), y es cofactor de la enzima citocromo oxidasa en la cadena respiratoria productora de ATP (Lim y Paik, 2006). Varios estudios han abordado como mejorar, a través de la dieta, la calidad de la carne, los perfiles de antioxidantes y de ácidos grasos (AG), en músculo y grasa de cerdos, para hacerla más saludable (Mahan, Clint, y Richert, 1999). Se ha demostrado que la adición de dosis altas de Cu en la dieta de cerdos (>200 mg kg⁻¹ MS) aumenta los AG insaturados (Amer y Elliot, 1973). Castell *et al.* (1975) aumentaron el Cu de 125 a 200 mg kg⁻¹ MS y mejoraron el crecimiento de cerdos y también aumentaron los AG insaturados.

El cerdo Pelón Mexicano (CPM) es una raza local, derivó de cerdos mediterráneos que originaron las variedades célticas e ibéricas; la raza conserva rasgos genéticos (*loci* S0355, S0215

y SW632) del cerdo Ibérico Español (Canul et al., 2005), se caracteriza por su lento crecimiento, pobre conversión alimenticia, abundante grasa subcutánea y poca masa muscular; actualmente está en riesgo de extinción (FAO, 2000; Méndez et al., 2002); su carne tiene excelente sabor, asociado al tipo de grasa dorsal depositada (72.2% de AG insaturados), y es apta para elaborar embutidos tipo ibérico (Montiel, López, & Méndez, 1997; Lemus et al., 2002). El músculo esquelético tiene diferentes tipos de fibras; según sus características histoquímicas, se clasifican en tres tipos: i) fibras lentas-oxidativas o tipo I (β -rojas), ii) rápidas oxidativas-glucolíticas o tipo IIA (α -rojas), y iii) rápidas-glucolíticas o tipo IIB (α -blancas). La clasificación representa a los dos extremos del perfil metabólico (tipo I y IIB) y al metabolismo energético intermedio (tipo IIA) (Brooke & Kaiser, 1970a). Dos factores que influyen en la calidad de la carne de cerdo, y que están relacionados con las alteraciones en el metabolismo postmortem del músculo, son la composición fibrilar y el tamaño de los miositos, esto determina el curso bioquímico del músculo, influyendo así en la transformación del músculo en carne (Fiedler et al., 2003; Chang et al. 2003; Ryu & Kim, 2006). Por lo tanto, los cambios en el grado o frecuencia de la glicolisis pueden producir un pH muscular desfavorable; la rápida disminución del pH puede llegar a un pH último bajo que resulta en desnaturalización de la proteína con menores parámetros de calidad (Henckel et al., 2000; Hammelman et al., 2003). Un factor determinante de las vías bioquímicas del músculo es la composición del tipo de fibras; las cuales resultan de la expresión coordinada de los distintos conjuntos de proteínas estructurales y enzimas metabólicas (Schiaffino & Reggiani, 1996; Chang et al., 2003). Por lo tanto, la variación del tipo de fibra muscular puede explicar, en parte, la variación en algunas características de la calidad de la carne (Essen-Gustavsson et al., 1994). La selección del cerdo por su tasa de crecimiento, tejido magro y masa muscular, produjo cambios en los tipos de fibras, en el número y tamaño, aumentando las de tipo IIB (Weiler et al., 1995; Rehfeldt et al., 1999).

Son pocos los estudios que han evaluado el efecto de dosis altas de Cu orgánico sobre la respuesta en el crecimiento y la calidad de la carne de cerdos para abasto y cerdos no mejorados, y menos aún, aquellos dirigidos a evaluar el efecto del Cu en el tipo de fibras del músculo *Longissimus thoracis*. El objetivo del presente estudio fue evaluar la eficiencia del crecimiento, características de la canal, calidad de la carne y composición del tipo de fibras del músculo *Longissimus thoracis*, usando como modelo biológico cerdos comerciales, F1 Landrace X Duroc,

y cerdos adipogénicos, Pelón Mexicano, en finalización, suplementados con Cu orgánico (proteinato de Cu) en la dieta.

1.1 Literatura Citada

- Amer, M.A., and Elliot, J.I. 1973. Influence of supplemental dietary copper and vitamin E on the oxidative stability of porcine depot fat. *Journal of Animal Science*. 1973. 37:87-90.
- Apte, S. and Morrissey, P.A. 1987. Effect of haemoglobin and ferritin on lipid oxidation in raw and cooked muscle system. *Food Chemistry*. 25: 127-124.
- Brooke, M.H., and Kaiser, K.K. 1970a. Muscle fiber types: how many and what kind?. *Archives of Neurology*. 23:369-379.
- Buckley, D.J., Morrissey, P.A., and Gray, J.L. 1995. Influence of dietary vitamin E on the oxidative stability and quality of pig meat. *Journal of Animal Science*. 73:3122-3130.
- Canul, S.M., Sierra, V.A., Martínez. M.A., Ortiz, J.O., Delgado, J.V., Vega-Pla, J.L., & Pérez, G.F. 2005. Genetic characterization of the Mexican hair-less pig by means of molecular markers. *Archivos de Zootecnia*. 54:206-207.
- Castell, A.G., Allen, R.D., Beames, R.M., Bell, J.M., Belzile, R., Bowland, J.P., Elliot, J.I., Ihnat, M., Larmond, E., Mallard, T.M., Spurr, D.T., Stothers, S.C., Wilton, S.B., & Young, L.G. 1975. Copper supplementation of Canadian diets for growing-finishing pigs. *Canadian Journal Animal Science*. 55:113-134.
- Cromwell, G.L., Stahly, T.S., and Monegue, H.J. 1989. Effects of source and level of copper on performance and liver copper stores in weanling pigs. *Journal of Animal Science*. 67:2996-3002.
- Chang, K.C., Da Costa, N., Blackley, R., Southwood, O., Evans, G., Plastow, G., Wood, J.D., and Richardson, R.I. 2003. Relationships of myosin heavy chain fibre types to meat quality traits in traditional and modern pigs. *Meat Science*. 64:93-103.
- Davis, K.G., & Mertz, W. 1987. Copper. *In*: W. Mertz (Ed.). *Trace Elements in Human and Animal Nutrition* (5th Ed). Academic Press, New York. Pp. 301-364.
- Dove, C.R. 1993. The effect of adding copper and various fat sources to the diets of weanling swine on growth performance and serum fatty acid profiles. *Journal of Animal Science*.

71:2187-2192.

- Essen-Gustavsson, B., Karlsson, A., Lundstrom, K., & Enfalt, A.C. 1994. Intramuscular fat and muscle fibre lipid contents in halo-thane-gene-free pigs fed high or low protein diets and its relation to meat quality. *Meat Science*. 38:269-277.
- FAO. (2000). Peligra la diversidad genética de los animales de granja. <<http://www.fao.org/ag/esp/revista/0011sp2.htm>.
- Fiedler, I., Nürnberg, K., Hardge, T., Nürnber, G., and Ender, K. 2003. Phenotypic variations of muscle fiber and intramuscular fat traits in *Longissimus* muscle of F2 population DurocxBerlin miniature pig and relationships to meat quality. *Meat Science*. 63:131-139.
- Hammelman, J.E., Bowker, B.C., Grant, A.I., Forrest, J.C., Schinckel, A.P. and Gerrard, D.E. 2003. Early postmortem electrical stimulation stimulates PSE pork development. *Meat Science*, 63:69-77.
- Hastad, C.W., Dritz, S.S., Nelssen, J.L., Tokach, M.D., and Goodband, R.D. 2001. Evaluation of different copper sources as a growth promoter in swine finishing diets. *Kansas Agric. Exp. Sta.*
- Henckel, P., Karlsson, A., Oksbjerg, N., & Petersen, J. 2000. Control of post mortem pH decrease in pigs muscles: Experimental design and testing of animal models. *Meat Science*, 55, 131-138.
- Honikel, K.O. (1997). Reference methods supported by OECD and their use in Mediterranean meat products. *Food Chemistry*. 9:573-582.
- Hill, G.M., and Spears, J.W. 2001. Trace and ultratrace elements in swine nutrition. In: Lewis AJ, Southern LL, Eds. *Swine Nutrition*. 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press. 1:229-261.
- Hill, G.M., Cromwell, G.L., Crenshaw, T.D., Dove, C.R., Ewan, R.C., Knabe, D.A., Lewis, A.J., Libal, G.W., Mahan, D.C., Shurson, G.C., Southern, L.L., and Veum, T.L. 2000. Growth promotion effects and plasma changes from feeding high dietary concentrations of zinc and copper to weanling pigs. *Journal of Animal Science*. 78:1010-1018.
- Lemus, F.C., Mejía, A.A., Meza, C.L., y Salazar, G.G. 2002. Perfil de ácidos grasos de la grasa dorsal en las cruza de CPM con razas comerciales. *Memorias de la VI Reunión de Investigación Científica*, Nayarit, México.
- Lim, K.S., and Paik, I.K. 2006. Effects of dietary supplementation of copper chelates in the form

- of methionine, chitosan and yeast in laying hens. *Asian-Australasian Journal Animal Science*. 19:1174-1178.
- Mahan, D.C., Clint, T.R., and Richert, B. 1999. Effects of dietary levels of selenium-enriched yeast and sodium selenite as selenium sources fed to growing-finishing pigs on performance, tissue selenium, serum glutathione peroxidase activity, carcass characteristics, and loin quality. *Journal of Animal Science*. 77:2172-2179.
- Méndez, D., Becerril, M., Rubio, M.S., and Delgado, E. 2002. Características de la canal del cerdo Pelón Mexicano procedente de Mizantla, Veracruz, México. *Revista Veterinaria México*. 33:27-37.
- Montiel, R.A., López, P.M., & Méndez, M.D. 1997. Composición de la canal del Cerdo Pelón Mexicano. *Memorias XXXIII Reunión Nacional de Investigación Pecuaria*. Veracruz, México. p.183.
- Murray, R., Mayes, P., Granner, D., and Rodwell, V. 1997. *Bioquímica de Harper*. Ed. Manual moderno. México. pp.65-76.
- NRC. 2012. *Nutrient Requirements of Swine: Eleven Revised Edition*, Subcommittee on Swine Nutrition, Committee on Animal Nutrition, National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C., USA. 400p.
- Pettigrew, J.E., and Esnaola, M.A. 2001. Swine nutrition and pork quality: A review. *Journal of Animal Science*. 2001. 79(E-Suppl.): E316-E342.
- Rehfeldt, C., Stickland, N., Fiedler, I., and Wegner, J. 1999. Environmental and genetic factors as sources of variation in skeletal muscle fiber number. *Basic Applied Myology*. 9:235-253.
- Ryu, Y., and Kim, B. 2006. Comparison of histochemical characteristics in various pork groups categorized by postmortem metabolic rate and pork quality. *Journal of Animal Science*. 84: 894-901.
- Schiaffino, S., and Reggiani, C. 1996. Molecular diversity of myofibrillar proteins: Gene regulation and functional significance. *Physiology Review*. 76:371-423.
- Schiavon, S., Bailoni, L., Ramanzin, M., Vincenzi, R., Simonetto, A., and Bittante, G. 2000. Effect of proteinate or sulphate mineral sources on trace elements in blood and liver of piglets. *Animal Science*. 71:131-139.

Wapnir, R. 1998. Copper absorption and bioavailability. *American Journal Clinic Nutrition*. 67:1054S-60.

Weiler, U., Appell, H.J., Kermser, M., Hofaker, S., and Claus, R. 1995. Consequences of selection on muscle composition. A comparative study on Gracilis muscle in wild and domestic pigs. *Anatomica, Histologica, Embryologica*. 24:77-80.

2. CAPÍTULO II. REVISION DE LITERATURA

2.1 Los minerales

2.1.1 Generalidades

Los minerales se encuentran de forma natural en el suelo, por lo tanto, la composición y concentración de minerales en las plantas varía según el tipo de suelo de la zona o región. El perfil mineral de una clase particular de suelo puede influir en su contenido en los forrajes y alimentos (McDowell, 1992). Otros factores que afectan las concentraciones de minerales de plantas son la variedad, tipo de suelo en que esta crecen, etapa de madurez y condiciones climáticas durante el crecimiento. Algunos de los minerales que necesitan los animales provienen de los ingredientes de los piensos vegetales y la cantidad de la suplementación mineral. Las necesidades nutricionales de un animal están influenciadas por el estado mineral de los alimentos forrajeros y vegetales que consume el animal. Los minerales se pueden reciclar y devolver al suelo en la hojarasca de plantas muertas y excrementos de animales. El flujo neto de minerales y el estado del suelo varían en cada ciclo debido a las condiciones climáticas, condiciones, madurez y tipo de la planta, la cantidad de heces y orina que el animal excreta (Underwood y Suttle, 1999).

2.1.2 El cobre (Cu). Aspectos generales

El cobre (Cu) es uno de los metales más antiguos que conoce el humano. Ocurre de forma natural, en pequeña medida como el metal libre, pero la mayor parte del Cu se presenta como compuestos en el +1 (cuproso) o +2 estado de oxidación (cúprico). Los compuestos cuprosos son generalmente incoloros, se oxidan rápidamente a la forma cúprica en solución acuosa. Los compuestos cúpricos son azules o verdes en color, +2 es el estado de oxidación más importante del Cu. El Cu tiene una alta conductividad eléctrica y térmica, es altamente resistente a la corrosión. Estas propiedades lo hacen uno de los metales industriales más importantes (NRC, 2005).

El Cu se encuentra principalmente como óxido, sulfuro o carbonato. minerales con calcocita (Cu_2S), calcopirita (CuFeS_2), malaquita (CuCO_3 (CuOH_2)) y cuprita (Cu_2O) como las

fuentes más importantes. Chile es el principal productor de Cu del mundo, seguido de Estados Unidos, en éste último se extrajeron 1.12 millones de toneladas de Cu y 860.000 toneladas se importaron para su procesamiento en 2003 (U.S. Geological Survey, USGS, 2004). Los compuestos de Cu también se utilizan como fungicidas, fertilizantes, suplementos nutricionales para humanos y animales, y como algicidas en embalses y arroyos (NRC, 2005).

2.1.3 Esencialidad del cobre

En el año 1928, se informó que el Cu era esencial para el crecimiento y formación de la hemoglobina en ratas (Underwood y Suttle, 1999). Ratas con padecimientos de anemia fueron alimentadas con dietas complementadas con cenizas de animales o vegetales y pudieron recuperarse de la enfermedad. Posteriormente se identificó que las cenizas contenían sulfuro de Cu, lo cual condujo a otras investigaciones para demostrar que el Cu es esencial para prevenir la anemia microcítica hipocrómica, y además necesario para funciones normales de mantenimiento y crecimiento (Hart *et al.*, 1928 citado por Diwa, 2019). Investigaciones posteriores indicaron que el Cu era un componente esencial de una serie de enzimas que incluyen citocromo oxidasa, lisil oxidasa, superóxido dismutasa, tiroasinas, ceruloplasmina y dopamina β -monooxigenasa (Linder, 2002). El Cu es componente de varias metaloenzimas como ceruloplasmina (ferroxidasa I), citocromo C oxidasa, lisil oxidasa, superóxido dismutasa citosólica de Cu-Zn (SOD 1), superóxido dismutasa 3 de Cu-Zn extracelular (SOD 3), monoamino oxidasa y tirosinasa. Por lo tanto, el Cu es importante en las reacciones de oxidación-reducción, transporte de oxígeno y electrones, y protección contra el estrés oxidativo (Manto, 2014). El Cu, además, participa en reacciones metabólicas que incluyen respiración, pigmentación tisular, formación de hemoglobina y desarrollo del tejido conectivo (Gaetke y Chow, 2003).

Las enzimas dependientes de Cu funcionan en el metabolismo energético, la maduración y la estabilidad del colágeno y elastina, pigmentación, el sistema de defensa antioxidante y metabolismo del hierro, así como otros procesos biológicos. La deficiencia de Cu puede provocar trastornos cardiovasculares (insuficiencia cardíaca o ruptura de la aorta), despigmentación y queratinización deteriorada del cabello y la lana, anemia, disminución del crecimiento, ataxia neonatal, anomalías óseas y deterioro de la respuesta inmune. Los signos de deficiencia varían según la especie animal y la gravedad de la deficiencia. La deficiencia de Cu es un problema

práctico en rumiantes en muchas áreas del mundo. La mayoría de las deficiencias de cobre en el ganado se deben a la presencia de antagonistas (molibdeno, azufre y hierro) en alimentos que perjudican, en gran medida, el metabolismo del Cu (Underwood y Suttle, 1999).

2.1.4 Metabolismo del cobre

El cerdo requiere Cu para la síntesis de la hemoglobina y para la síntesis y activación de varias enzimas oxidativas necesarias para el metabolismo normal (Miller *et al.*, 1979). La deficiencia de Cu produce arqueamiento de las extremidades (ataxia enzootica en ovinos), baja movilización de Fe, hematopoyesis anormal, pobre queratinización y escasa síntesis de colágeno, elastina, y mielina. Los signos de una deficiencia de Cu incluyen fracturas espontáneas, desorden vascular y cardiaco, despigmentación (NRC, 2012).

2.1.5 Absorción y transporte

Hay diferencias importantes en el metabolismo del Cu entre las especies pecuarias no rumiantes y rumiantes. Estudios en humanos y ratas indican que el Cu se absorbe bien (~ 30 a 75 %) en no rumiantes. La absorción de Cu se produce principalmente en el intestino delgado. El Cu dietario absorbido es afectado por el nivel de Cu dietario, siendo mayor cuando la ingesta de Cu es marginal o baja en relación con los requerimientos. En la mucosa intestinal, una parte del Cu se une a la metalotioneína o proteínas similares (Linder, 2002). La unión a la metalotioneína evita la transferencia de Cu a la serosa intestinal, y el Cu unido a la metalotioneína se puede perder en las heces durante la renovación normal de las células intestinales. La metalotioneína tiene una mayor afinidad por el Cu que por el Zn, y un alto contenido de Zn en la dieta puede reducir la absorción de Cu al inducir la síntesis de metalotioneína (Harris, 1997). En rumiantes, con rumen funcional, la absorción de Cu es baja (< 1.0 a 10 %) en relación con los no rumiantes. La baja absorción de Cu en rumiantes se debe, en gran parte, a las interacciones complejas que ocurren entre Cu, S y Mo en el entorno ruminal. La absorción de Cu es mucho mayor (~ 75 %) en rumiantes jóvenes, antes del establecimiento de una microflora ruminal (Underwood y Suttle, 1999).

El Cu que es absorbido en la sangre portal se une a la albúmina y transcupreína para su transporte, principalmente hacia el hígado (Linder, 2002), en este órgano, el Cu puede excretarse

a través de la bilis, almacenarse, o usarse para síntesis de ceruloplasmina u otras Cu-metaloenzimas. La excreción biliar es el mecanismo principal responsable de la homeostasis del Cu en el organismo. El Cu excretado en bilis está presente en formas que se reabsorben poco en el intestino delgado. Concentraciones de Cu en hígado (15 a 30 mg Cu/kg MS) están bien regulados en la mayoría de los no rumiantes; sin embargo, la excreción biliar de Cu se satura cuando hay altas concentraciones de de Cu en la dieta y, luego, se produce su acumulación en el hígado. Trastornos genéticos, asociados con alteraciones biliares, excreción de cobre, ocurren en humanos (enfermedad de Wilson) y ciertas razas de perros (Hyun y Filippich, 2004) que resultan en concentraciones elevadas de Cu en hígado. En rumiantes, concentraciones hepáticas normal (100 a 400 mg Cu/kg MS) son considerablemente más altas que en cerdos y pollos (Underwood, 1977). De hecho, las concentraciones de Cu que normalmente se encuentran en el hígado de la mayoría de los animales no rumiantes, sería indicativo de deficiencia de Cu en los rumiantes.

2.1.6 Excreción

La excreción biliar de Cu es mucho menos eficaz en la regulación de las concentraciones de Cu en el hígado en rumiantes. Esto es particularmente cierto en las ovejas, donde al aumentar el Cu dietético no parece aumentar la excreción biliar de Cu (Saylor y Leach, 1980).

El hígado es el principal órgano de almacenamiento de Cu; el Cu almacenado está unido, en gran medida, a la metalotioneína, en la mayoría de las especies. Cuando el animal ingiere alto contenido de Cu en la dieta, la unión a la metalotioneína parece ser un importante mecanismo de desintoxicación celular en algunas especies animales (Bremner, 1987). En ovejas, una proporción mucho menor de Cu del hígado está unido a la metalotioneína, por lo tanto, las ovejas tienen capacidad limitada para aumentar la síntesis de metalotioneína en respuesta al aumento de Cu en el hígado (Saylor *et al.*, 1980).

El Cu no excretado en bilis, se almacena o usa para las enzimas Cu dependientes en hígado, quedando unido, en gran parte, a la ceruloplasmina, una oxidasa y proteína de fase aguda. En la mayoría de especies (excepto aves), la ceruloplasmina es la forma principal en que está el Cu en plasma, por lo tanto, se cree que es la principal proteína en que se transporta Cu hacia los tejidos extrahepáticos. La ceruloplasmina reconoce receptores en la membrana plasmática de

tejidos y puede liberar el Cu en las células (Harris, 1997), lo cual si ocurre en exceso puede ser muy tóxico para las células; las proteínas citosólicas, denominadas, así como “chaperones de Cu”, unen iones de Cu y los entregan a proteínas que requieren cobre, sin liberar iones de Cu libres. Las concentraciones de Cu tisular son más altas en hígado, seguido por el riñón y el cerebro (Pena *et al.*, 1999).

2.2 Toxicidad del cobre e interacciones con otros minerales

El Cu puede ser tóxico cuando niveles en la dieta en exceso de 250 ppm son alimentados por períodos largo de tiempo (NRC, 1980). Los signos de toxicidad por Cu incluyen bajos niveles de hemoglobina e ictericia, resultado de acumulación excesiva de Cu en hígado y otros órganos vitales. La deficiencia de Zn y Fe, o exceso de Ca en la dieta pueden acentuar la toxicidad de Cu (Prince *et al.*, 1984); el nivel máximo tolerable de Cu en cerdos indicado por el NRC es de 250 ppm en la dieta (NRC, 2005).

Las interacciones entre cobre, azufre y molibdeno son muy importantes en la nutrición de los rumiantes. El Mo en la dieta de rumiantes frecuentemente está en el rango de 1 a 5 mg Mo/kg MS, en contraste, el S total varía de 0.1 a 0.3 %. Las concentraciones de Mo y S en el extremo superior de este rango reducen en gran medida la biodisponibilidad del Cu y aumentan el riesgo de su deficiencia. Por el contrario, las concentraciones bajas de Mo y S en la dieta aumentan el riesgo de toxicosis por Cu, especialmente en ovinos (NRC, 2005).

El compuesto sulfuro, derivado de la reducción y degradación del sulfato, proveniente de los aminoácidos azufrados, por microorganismos ruminales, reduce la absorción de Cu mediante la formación de sulfuro de Cu insoluble (Suttle, 1991). Aumentos de S en la dieta, de 0.1 a 0.4 % MS, reduce la biodisponibilidad del Cu de 30 a 56 % en ovejas hipocupremicas alimentadas con dietas bajas en Mo (Suttle, 1974). En rumen, el compuesto sulfuro, también puede interactuar con el molibdato y formar diversos tiomolibdatos insolubles (Suttle, 1991). Los compuestos tri y tetratiomolibdatos reducen la absorción de Cu al formar complejos insolubles con Cu, lo cuales no liberan Cu incluso en condiciones ácidas. Cuando el S y Mo de la dieta son altos, compuestos di- y tritiomolibdatos pueden ser absorbidos y afectar el metabolismo sistémico del Cu (Gooneratne *et al.*, 1989), con efectos como aumento de excreción biliar de Cu de las reservas

hepáticas, eliminación de Cu de metaloenzimas, y fuerte unión del Cu a la albúmina plasmática; lo anterior resulta en un transporte reducido de Cu disponible para procesos bioquímicos. El Mo y suplementos de S se han usado para prevenir y tratar la toxicosis por Cu en ovinos (Howell y Gooneratne, 1987).

En las especies pecuarias no rumiantes, las interacciones entre Cu y Mo son mínimas, solamente ocurren cuando la dieta contiene concentraciones muy altas de Mo (Mills y Bremner, 1980). El Cobre interactúa con los aminoácidos en los animales no rumiantes. Los requerimientos de aminoácidos azufrados para crecimiento máximo son mayores en pollitos alimentados con niveles farmacológicos de Cu (Wang *et al.*, 1987). Aumentando el contenido de metionina o cisteína en la dieta por arriba de los requerimientos para crecimiento corrige la reducción del crecimiento en pollitos alimentados con exceso de Cu (500 mg Cu/kg MS) (Robbins y Baker, 1980).

Diversas investigaciones han indicado que un alto contenido de Zn en la dieta puede reducir la absorción de Cu en pacientes con enfermedad de Wilson (WHO, 1998). Un alto contenido de Zn en la dieta (220 o 420 mg Zn/kg MS) es eficaz para prevenir la toxicosis por Cu al reducir su acumulación en hígado en corderos alimentados con dietas altas en cobre (Bremner *et al.*, 1976). Un alto contenido de Fe en la dieta también puede reducir la absorción de Cu en no rumiantes (Yu *et al.*, 1994), y reducir el nivel de Cu en bovinos y ovinos (Spears, 2003).

La toxicidad crónica del Cu está relacionada con el Cu iónico que causa daño oxidativo en los tejidos. Como se mencionó anteriormente, el Cu puede cambiar entre un estado oxidado o cúprico (Cu^{+2}) y un estado reducido o cuproso (Cu^{+1}). Esto le permite unirse fuertemente a muchos tipos de estructuras ricas en electrones. Normalmente, el cobre libre en la célula se mantiene en bajas concentraciones por compuestos que se unen al Cu como la metalotioneína, glutatión y proteínas chaperonas de Cu (Viarengo *et al.*, 2002). Sin embargo, cuando la concentración de Cu en la célula supera la homeostasis del metal, el Cu libre puede alterar las funciones celulares al unirse directamente a proteínas y ácidos nucleicos, y mediante la formación de especies reactivas de oxígeno. El Cu iónico participa en la reacción de Fenton, que resulta en la producción de especies reactivas de oxígeno, incluido el radical hidroxilo (Viarengo *et al.*, 2002). Los radicales, hidroxilo pueden causar peroxidación de lípidos en las membranas

celulares, escisión de ácidos nucleicos y oxidación de proteínas celulares. La toxicosis aguda por Cu en varias especies animales, incluidos los humanos, produce náuseas y vómitos, el mecanismo responsable de esto se debe a los iones de cobre, receptores estimulantes que, a su vez, estimulan el nervio vago, provocando una respuesta refleja de náuseas y vómitos (Araya *et al.*, 2002).

2.3 Fuentes de cobre y biodisponibilidad

El Cu se encuentra naturalmente en la corteza terrestre a una concentración promedio de 50 mg/kg (ATSDR, 2002). El agua de mar contiene aproximadamente 0.15 µg Cu/L, y el agua dulce contiene 1.0 a 20 µg Cu/L en áreas no contaminadas (WHO, 1998). La meteorización natural del suelo y las descargas de industrias y plantas de tratamiento de aguas residuales pueden liberar Cu en el agua. Los compuestos de Cu también son a veces aplicados al agua para eliminar algas. El Cu liberado en el agua es principalmente en forma de partículas y tiende a sedimentar, precipitar o ser adsorbido por la materia orgánica, Fe hidratado, óxidos de Mn o arcilla en el sedimento. Esto generalmente da como resultado bajas concentraciones de Cu en aguas por debajo de la fuente de entrada de Cu. El ion cuproso ($+1$) es inestable en solución acuosa y tiende a desproporcionar a la forma cúprica ($+2$), a menos que un ligando estabilizador esté presente (WHO, 1998). Los únicos compuestos cuprosos estables en el agua son insolubles como el sulfuro cuproso. El Cu cúprico forma compuestos o complejos con ligandos orgánicos e inorgánicos. La biodisponibilidad del Cu en el agua es generalmente baja debido a su adsorción a partículas suspendidas y a la complejación por materia orgánica disuelta o ligandos inorgánicos como el carbonato (OMS, 1998). El Cu en los sedimentos también parece tener poca biodisponibilidad debido a su capacidad para reaccionar con sulfuros volátiles ácidos y formar precipitados insolubles (Besser *et al.*, 1996).

El Cu del suelo puede adsorberse en la materia orgánica, los minerales de arcilla, los minerales de carbonatos u óxidos de hierro y manganeso hidratados. El cobre se une al suelo con más fuerza que otros cationes divalentes (Georgopoulos *et al.*, 2002); por esta fuerte adsorción y complejación del Cu a la parte superior del suelo, a menudo, no aumenta mucho su absorción por las plantas (Payne *et al.*, 1988).

El contenido de Cu en los forrajes en general varía de 3 a 8 mg Cu/kg MS (Minson, 1990).

En las regiones de clima templado, las plantas leguminosas tiene más Cu que las gramíneas. La biodisponibilidad del Cu de los forrajes consumidos por rumiantes es baja, y se ve muy afectada por las concentraciones de S, Mo y Fe (Underwood y Suttle, 1999). Las concentraciones normales de Cu en los granos de cereales varían de 3 a 8 mg Cu/kg MS, mientras que las harinas de leguminosas y oleaginosas oscilan de 15 a 35 mg Cu/kg de MS (NRC, 2005).

Con relación a la biodisponibilidad de las fuentes sulfato de cobre, harina de gluten de maíz, harina de soja y harina de semilla de algodón fue del 48, 38 y 41 %, respectivamente, en pollitos. Los piensos de origen animal, con excepción de los productos de hígado, son bajos en Cu. El hígado se usa con frecuencia como ingrediente en alimentos para mascotas. Basado en estudios con pollitos, usando la bilis como medio de excreción de Cu y como medida de su biodisponibilidad, el Cu en hígado de cerdo, esencialmente no está disponible (Aoyagi *et al.*, 1993).

El uso de excretas de aves de corral o porcinos en las dietas o como fertilizante para pastos puede resultar en una alta ingesta de Cu por parte de los rumiantes. Los desechos de aves y cerdos tienen un alto contenido de Cu, especialmente si los desechos son obtenidos de animales alimentados con concentraciones de Cu estimulantes del crecimiento (100 a 250 mg/kg). El cobre de los desechos porcinos y avícolas tiene la misma biodisponibilidad que el sulfato de cobre cuando es alimentado a ovejas hipocupremicas (Suttle y Price, 1976). La aplicación de excretas con alto contenido de Cu a los pastos (Suttle y Price, 1976) o tierras de cultivo (Payne *et al.*, 1988) no aumenta el Cu del forraje o los grano en gran medida. Sin embargo, la aplicación de excretas a los pastos puede resultar en toxicosis por Cu debido a ingestión de forraje contaminado con alto contenido de Cu. Se ha informado de toxicosis por Cu en rumiantes alimentados con excretas de aves de corral (Tokarnia *et al.*, 2000) o pastoreados en praderas en donde se han aplicado grandes cantidades de excretas (Sargison y Scott, 1996). Otros estudios no mostraron efectos nocivos por el pastoreo de ovejas en praderas fertilizadas con estiércol de cerdo con alto contenido de Cu (Prince *et al.*, 1975).

Una fuente importante de Cu en la dieta animal es la complementación de Cu adicionado a dietas o suplementos minerales de libre acceso. Errores en la formulación de Cu o suplementación excesiva de Cu pueden provocar toxicosis. Las fuentes de cobre suplementadas a

las dietas animales incluyen sulfato cúprico, cloruro cúprico tribásico, óxido de cobre (principalmente óxido cúprico), carbonato cúprico y diversas fuentes de Cu orgánico. El Cu en polvo de óxido de Cu, esencialmente no está biodisponible cuando se suministra a ganado (NRC, 2005).

Las agujas de óxido de Cu suministran Cu disponible a los rumiantes porque se retienen en el tubo digestivo y liberan Cu durante varias semanas. Aparentemente, el polvo de óxido de Cu pasa a través del ambiente ácido del tubo digestivo antes de que el Cu pueda ser solubilizado. El cloruro de Cu tribásico es similar en biodisponibilidad al sulfato de Cu en pollos, porcinos y en ganado alimentado dietas bajas en molibdeno y azufre (NRC, 2005). Relativo al sulfato de Cu (fijado al 100 %), cloruro de Cu tribásico es más biodisponible (132 a 196 %) cuando es complementado con dietas ricas en Mo y S (Spears *et al.*, 2004). El carbonato de Cu, grado alimenticio, es menos biodisponible, según las concentraciones de Cu en el hígado, que el sulfato de Cu (Ward *et al.*, 1996). Los resultados de estudios que evaluaron la biodisponibilidad del Cu de diferentes fuentes orgánicas han sido variables, con algunos estudios que indican una biodisponibilidad similar y otros una mayor biodisponibilidad en relación con el sulfato de Cu (Spears, 2003).

El Cu contenido en la dieta de cerdos generalmente proviene de alimentos de origen vegetal o animal, o de fuentes inorgánicas. Los granos de cereales contienen de 4 a 10 mg de Cu/kg MS (Cuadro 1), sin embargo, la concentración de Cu de cada ingrediente vegetal puede variar según la variedad, tipo de suelo en el que crecen las plantas, etapa de madurez y condiciones climáticas durante el crecimiento (Underwood y Suttle, 1999). Las harinas de oleaginosas, harinas de soya, de semillas de algodón y de linaza tienen mayor contenido de Cu comparado con los granos de cereales (NRC, 2012). El procesamiento de ingredientes proteicos vegetales, como la fermentación, puede mejorar la digestibilidad, contenido de proteína y cenizas, por su menor concentración de carbohidratos, por lo tanto, puede aumentar el nivel de Cu en estos ingredientes (Drew *et al.*, 2007). Las fuentes de proteínas de origen animal utilizadas en dietas de cerdos incluyen harinas de pescado, de desechos de aves y sangre, estos ingredientes continen nivles de Cu de 8 a 36 mg/kg MS. El contenido de Cu en productos lácteos, como leche desnatada en polvo, lactosa, caseína y suero en polvo varía de 0.10 a 6 mg/kg MS (NRC, 2012).

La complementación de la dieta con Cu se puede hacer adicionando a dietas completas y premezclas fuentes inorgánicas de Cu como sulfato de Cu (CuSO_4), cloruro de Cu (CuCl), hidroxicloruro de Cu, así como fuentes orgánicas como Cu quelado a través de complejos de aminoácidos de Cu. El sulfato de Cu es soluble en agua, pero se reduce su solubilidad en condiciones ácidas (Justel et al., 2015). Debido a su disponibilidad, el CuSO_4 es la forma más común de suministra Cu en la alimentación animal su costo es relativamente bajo, comparado con otras fuentes inorgánicas de Cu (Shelton *et al.*, 2009). Varios estudios realizados en cerdos consignaron los efectos del CuSO_4 en un mayor crecimiento y mejor salud intestinal de cerdos al destete (Perez et al., 2011).

Sin embargo, el uso de dosis farmacológicas de CuSO_4 en dietas de cerdos generan problemas ambientales por alta excreción de Cu en heces (Zhao *et al.*, 2014) y antagonismos con otros componentes de los alimentos también preocupan. Otras fuentes de Cu inorgánico, con menor nivel de inclusión en la dieta y menos reacción con otros nutrientes, se han introducido en la industria de alimentos balanceados, estos incluyen a hidroxicloruro de Cu quelado; la quelación implica unir al Cu con un ligando (es decir, EDTA, aminoácidos o polisacáridos), con beneficios en absorción más eficiente y mayor retención comparado con el CuSO_4 (Liu *et al.*, 2014).

Cuadro 1. Contenido de Cu en ingredientes alimenticios usados en dietas para cerdos.

Ingrediente Alimenticio	Contenido promedio de Cu (mg/kg B.H.)	Ingrediente alimenticio	Contenido promedio de Cu (mg/kg B.H.)
Maíz blanco	4.4	Granos secos de	16.4
Maíz Amarillo	4.7	cervecería	
Avena	5.9	Salvado de trigo	16.4
Cebada	6.8	Gluten de trigo	17.2
Trigo	7.2	Harinolina	21.8
Harina de pescado	8.0	Harina de linaza	21.8
Salvado de arroz	7.8	Harina de soya	22.7
Germen de trigo	9.0	Harina de carne	23.1
Acemite de trigo	12.1	Gluten de maíz	35.1
Harina de carne-hueso	11.0	Harina de pollo	35.7
Harina de sangre	13.1	Granos secos de destilería	38.4

Fuente: (NRC, 2012).

El suministro de Cu quelado en dietas para lechones destetados es eficaz como el CuSO_4 para mejorar su rendimiento productivo (Cromwell *et al.*, 1994); la complementación de 100 a 200 mg de Cu/kg de MS de dieta, quelado con aminoácidos como Cu-lisina (CuLys) es más eficaz que CuSO_4 para aumentar el consumo de alimento y la ganancia de peso de lechones destetados (Windisch *et al.*, 2001). Otra fuente inorgánica es el hidroxiclorigenato de Cu, el cual adicionado en dietas para cerdos mejora el crecimiento y eficiencia alimentaria de los cerdos (Cromwell *et al.*, 1998), entre sus propiedades se ha observado que es altamente soluble en condiciones ácidas, es menos reactivo en premezclas de vitaminas y minerales, menos tóxico y tiene menos actividad prooxidante que CuSO_4 (Liu *et al.*, 2005).

2.4 Niveles de Cu en tejidos

Las concentraciones de Cu representativas en tejidos de varios animales alimentados con niveles normales o altos de Cu se muestran en el Cuadro 2. Las concentraciones de Cu son más altas en el hígado, y aumenta en animales alimentados con una dieta alta en Cu. Las concentraciones normales de Cu en hígado son más altas en rumiantes que en cerdos y pollos, y cantidades relativamente pequeñas de Cu en la dieta aumentan considerablemente las concentraciones de Cu en el hígado en rumiantes. En no rumiantes y peces, el Cu de hígado aumenta en un grado mucho menor con el aumento de Cu en la dieta, a menos que se utilicen altos niveles de Cu (> 100 mg Cu/kg MS) en el alimento. Las concentraciones de Cu en los riñones también pueden aumentar en los animales alimentados con alto contenido de Cu en la dieta, pero en menor medida que en el hígado (NRC, 2012). El músculo contiene menos de 4 mg de Cu/kg de MS en la mayoría de los animales, y no aumenta en animales alimentados con dietas altas en Cu. La concentración de Cu en huevo tampoco se ve afectada por el nivel de Cu en dietas de gallinas ponedoras. El contenido de Cu de la leche es bajo y varía según la especie y la etapa de lactancia. La adición de Cu a dietas ya adecuadas en Cu tiene poco efecto sobre su concentración en la leche de vacas (Underwood, 1977).

2.5 Concentración máxima tolerable

El nivel máximo tolerable para el Cu se define como el nivel dietético que, cuando se alimenta durante un período de tiempo definido, no perjudica la salud y/o rendimiento de los animales. Los no rumiantes toleran altas concentraciones de Cu en la dieta, en relación con sus requerimientos. Con base en literatura publicada sobre no rumiantes, los niveles máximos tolerables de mg Cu/kg MS fueron establecidos por el comité de NRC, en pollo y pavo, 250; pato, 100; porcinos, 250; caballo, 250; conejo, 500; rata, 1,000; y ratón, 2000. No hay datos suficientes disponibles para establecer un nivel máximo tolerable de Cu para perros y gatos (NRC, 2012).

Cuadro 2. Concentraciones de Cu en tejidos y fluidos de animales (mg/kg) complementados con Cu inorgánico (CuSO₄) en la dieta.

Especie	Cantidad	Duración (días)	Hígado	Riñón	Musculo	Corazón	Huevo	Referencia
Conejo	Control	28	12 ^a	10 ^a	2.6 ^a			Grobner et al., 1986.
	+250ppm		195	11	3.6			
	+500ppm		890	15	3.4			
Pollo	Control	42	3.1 ^b		0.4 ^b	2.8 ^b		Pesti y Bacalli, 1996.
	+250ppm		5		0.4	3.0		
Gallina	Control	48 semanas	12 ^a				3.4 ^a	Jackson y Estivenson, 1981.
	+150ppm		16				3.4	
	+300ppm		32				3.3	
	+450ppm		61				3.0	
Cerdo	Control	132	20 ^a	29 ^a	1.8 ^a			Bradlet et al., 1983.
	+120ppm		122	40	1.8			
	+240ppm		439	44	1.7			
Bovino	Control	155	63 ^a		3.5 ^a			Engle et al., 2000.
	+20ppm		290		4.2			
	+40ppm		380		3.0			
Ovino	Control	91	350 ^a	14 ^a	5.0a	7.0a		Zervas et al., 1990.
	+30ppm		2,400	50	8.0	26.0		
Pez, Trucha	Control	28	38 ^b	1.7 ^b	0.3 ^b			Kamunde et al., 2001.
	+30ppm		45	1.7	0.3			
	+1000ppm		100	10	0.3			

^aBase tejido seco. ^bBase tejido fresco.

Adaptado de (NRC, 2005).

En pollos de engorda, la adición de 250 mg de Cu/kg MS a la dieta puede aumentar la incidencia de proventriculitis (Wideman *et al.*, 1996) y causar lesiones en la cavidad bucal, lengua y faringe (Chiou *et al.*, 1999), pero generalmente no hay efectos negativos sobre el rendimiento productivo. Los ponis toleran hasta 791 mg de Cu/kg MS en la dieta durante 6 meses sin mostrar signos clínicos de toxicosis (Smith *et al.*, 1975). Sin embargo, las concentraciones de Cu en hígado aumentan a niveles que pueden causar toxicosis, y, en situaciones estresantes, afectan la función hepática. En caballos, debido a datos limitados de investigación, así como a posibles diferencias en la susceptibilidad a la toxicidad del Cu, se recomienda un nivel máximo tolerable de 250 mg Cu/kg MS (NRC, 2005). En ovinos, el nivel máximo tolerable se estableció en 15 mg Cu/kg de MS de dieta. Algunas razas de ovejas pueden ser susceptibles a toxicosis por Cu en concentraciones más bajas si la dieta contiene Mo y/o S por debajo de los niveles normales (1 a 2 mg Mo/kg MS; 0.15 a 0.25 % de S) (Mac Pherson *et al.*, 1997). Este límite superior para Cu es similar al límite actual establecido por la Comisión Europea (CE, 2003) de 17 mg Cu/kg MS en dietas para ovinos.

El nivel de Cu en la dieta que causa la toxicosis en los rumiantes es afectado por el nivel de S y Mo en la dieta, y también por la genética. Otros factores que pueden afectar al máximo nivel de Cu que los rumiantes pueden tolerar incluyen: (1) tiempo de exposición, (2) edad, (3) concentración inicial de Cu en hígado al inicio de una alta exposición al Cu, (4) toxinas dietéticas que deterioran la función hepática y desencadenan crisis hemolíticas, y (5) concentraciones dietéticas de Zn y Fe. Los niveles máximos tolerables de Cu para rumiantes se establecieron en base a literatura, y asumiendo un contenido de S dietario normal (0.15 a 0.25 % MS) y Mo (1 a 2 mg/kg MS) (NRC, 2005).

El nivel máximo tolerable de Cu en el ganado bovino se fijó en 40 mg Cu/kg MS. Las concentraciones más altas de Cu pueden ser toleradas por el ganado durante varias semanas o incluso meses. Sin embargo, la alimentación, a largo plazo, con dietas ligeramente inferiores a 40 mg Cu/kg MS puede provocar toxicosis por Cu (Bradley, 1993). Alimentar dietas con alto contenido de Cu en aumentará, en gran medida, las concentraciones de Cu en hígado. Los factores que regulan el Cu en el hígado del ganado no están bien entendidos, así como la concentración mínima de Cu en hígado que puede provocar signos clínicos de toxicosis. Sin

embargo, en el ganado que no muestra signos clínicos de toxicosis por Cu, pero con altas concentraciones de Cu en hígado, se esperaría sea más susceptible a una crisis hemolítica, cuando se expone a toxinas que causan daño hepático u otros factores estresantes (NRC, 2005).

2.6 Cobre y salud humana

Es improbable que el Cu en tejido comestible represente un problema de salud, cuando el Cu se proporciona, en las dietas de los animales, en los niveles máximos tolerables indicados. El Cu muscular es el reflejo del Cu en la dieta a nivel bajo, y al aumentarlo no aumenta su nivel en músculo. La ingesta de Cu de productos animales, posiblemente, podría ser motivo de preocupación en humanos que consumen grandes cantidades de hígado. En los hígados de animales alimentados con Cu dietético, las concentraciones, dentro de los niveles máximos tolerables de Cu sugeridos, pueden contener de 20 a 900 mg Cu/kg MS (Cuadro 1) (NRC, 2005).

2.7 Valor nutrimental del cobre en la producción animal

La clasificación de los minerales en dos grupos se basa según la concentración requerida en la dieta. Los minerales requeridos en más de 100 mg/kg de MS de dieta se denominan macrominerales, este grupo incluye siete elementos Ca, P, K, Mg, Na, Cl y S (Suttle, 2010). Estos minerales son muy importantes en la regulación del equilibrio ácido-base, las funciones estructurales y reguladoras en huesos y dientes, y transmisión del impulso nervioso. Los minerales requeridos en concentraciones inferiores a 100 mg/kg de MS de dieta se denominan microminerales o minerales traza, estos elementos incluyen a Cu, Fe, I, Mn, Mo, Co, Se, Zn y Cr (McDowell, 1992). Los microminerales son componentes de enzimas, coenzimas y hormonas (Goff, 2015). Otro grupo de minerales son los minerales ultratraza, cuyas necesidades dietéticas son inferiores a 50 ng/g de MS; estos minerales incluyen a B, Cd, F, Ni, Pb y Si, los cuales contribuyen en la estabilidad mecánica de órganos corporales como huesos y dientes. Sin embargo, estos elementos no suelen complementarse en dietas para animales de granja, porque los alimentos suelen tener cantidades suficiente para cubrir los requerimientos de los animales (Nielsen, 1984).

Los minerales tienen funciones estructurales, fisiológicas, catalíticas y reguladoras en el organismo animal. Actúan como componentes de órganos y tejidos corporales, están presentes en

fluidos del cuerpo como electrolitos, catalizadores o componentes específicos en enzimas específicas, y regulan la replicación y diferenciación celular. Los minerales también tienen efectos metabólicos interrelacionados entre ellos, lo cual puede afectar el crecimiento y salud del animal (Underwood, 1981).

2.8 Requerimientos de cobre

Los animales no rumiantes generalmente requieren entre 4 y 8 mg Cu/kg de dieta; los requisitos de cobre parecen ser más altos en los caballos (Underwood y Suttle, 1999). El requerimiento de Cu en los cerdos está influenciado por factores de la dieta y la edad del animal. Los cerdos recién nacidos requieren de 5 a 10 mg de Cu/kg de MS de dieta para un metabolismo normal (NRC, 2012) y a medida que los cerdos maduran, su requerimiento de Cu disminuye. Se ha establecido un requerimiento de 4 mg de Cu/kg de MS de dieta, sugerido para cerdos en crecimiento, para cerdas gestantes y lactantes, incluir 60 mg de Cu/kg MS puede mejorar el rendimiento reproductivo en comparación con cerdas alimentadas con una dieta que contiene 6 mg de Cu/kg MS (NRC, 2012). Se ha documentado que concentraciones farmacológicas de Cu (125 a 250 mg Cu/kg MS) pueden estimular el crecimiento y la eficiencia alimentaria en cerdos (Cromwell *et al.*, 1989) y aves de corral (Pesti y Bakalli, 1996). Las cerdas alimentadas con dietas que contienen 250 mg de Cu/kg MS, de CuSO_4 , tuvieron una tasa de eliminación reducida, parieron una gran camada de lechones con más peso al nacer y al destete, en comparación con cerdas alimentadas con dietas sin Cu adicionado (Cromwell *et al.*, 1993). La complementación de 4 a 6 mg Cu/día, es necesaria para cerdas durante la última etapa de gestación (Underwood y Suttle, 1999), pero (Close y Cole, 2000) indicaron que tanto las cerdas primíparas como las múltiparas, requieren 10 mg de Cu/kg MS de dieta durante toda la gestación; sin embargo, los mecanismos responsables de la acción promotora del crecimiento de altos niveles de Cu en la dieta en especies no rumiantes son poco claro.

Algunos factores relacionados con la dieta del cerdo pueden afectar la absorción del Cu ingerido, por lo tanto, pueden influir en los requerimientos del animal, algunos minerales incluyen los contenidos de Zn, Fe, S, Mo y fitatos en la dieta. El contenido de Zn en la dieta está estrechamente, química y fisiológicamente, relacionado con el Cu de la misma (Hill *et al.*, 1984). El Zn es componente y activador esencial de varias metaloenzimas, algunas de estas

metaloenzimas, como superóxido dismutasa, tienen Cu y Zn en su estructura (O'Dell, 2000).

Altas concentraciones de Zn en la dieta pueden aumentar el requerimiento de Cu (Underwood, 1977) por inducir altas concentraciones de metalotioneína intestinal, la cual se une al Cu y reduce su absorción (Cousins, 1985), por lo tanto, inducirá signos clínicos de deficiencia de Cu (Carlson *et al.*, 2007). Altas concentraciones de Fe en la dieta también disminuyen la absorción de Cu, pudiendo producir deficiencia de Cu (Hansen *et al.*, 2009; NRC, 2012). El Fe y Cu tienen efectos antagónicos debido a su competencia por los mismos sitios de absorción en la mucosa intestinal (Hedges y Kornegay, 1973); además, la interferencia de Fe en la absorción de Cu puede implicar la formación de complejos de sulfuro ferroso (Collins *et al.*, 2010), la parte de sulfuro en el complejo puede formar complejos insolubles con Cu (Suttle *et al.*, 2009).

En rumiantes, los requerimientos de Cu varían de 4 a más de 20 mg/kg de MS, depende de las concentraciones de minerales antagonistas del Cu. El contenido relativamente bajo de Mo y S pueden aumentar los requisitos de Cu en 2 a 3 veces (Underwood y Suttle, 1999).

2.9 Digestibilidad del cobre

La digestibilidad de un mineral refleja su disolución y absorción a nivel del lumen gastrointestinal. La digestibilidad de los minerales es difícil de determinar debido a las secreciones minerales endógenas del tracto gastrointestinal desde el páncreas, bilis y células de las mucosas (Hambridge *et al.*, 1986). La digestibilidad de los microminerales Cu y Zn es difícil de medir debido a la interferencia de la regulación homeostática, la cual limita la absorción de ambos minerales cuando los animales se alimentan más allá de la cantidad requerida en la dieta (Lebel *et al.*, 2014).

La digestibilidad del Cu depende de la edad, en los cerdos en etapa de crecimiento varía de 30 a 55% (Liu *et al.*, 2014). La relativamente baja digestibilidad de Cu se debe a los antagonismos de este con otros microminerales (Richards *et al.*, 2010). El pH ácido del estómago puede reducir la digestibilidad del Cu al causar la disociación de sales inorgánicas del Cu de la dieta (Underwood y Suttle, 1999). Cuando aumenta el pH en el intestino delgado, el Zn y Cu pueden ser atrapados en precipitados de hidróxidos insolubles, los cuales no se pueden absorber (Powell *et al.*, 1999).

La fuente, forma química de Cu, también puede afectar su digestibilidad en cerdos (Lebel *et al.*, 2014). Quelar oligoelementos de la dieta con proteínatos (péptidos, aminoácidos) mejoran la digestibilidad y retención total aparente de Cu en los cerdos al prevenir la formación de complejos insolubles ya que son menos reactivos, a lo largo del tracto gastrointestinal (Liu *et al.*, 2014).

2.10 Biodisponibilidad del cobre

La eficacia de las fuentes inorgánicas de Cu se evalúa al medir su biodisponibilidad o digestibilidad. La biodisponibilidad relativa del Cu de la dieta es la proporción del Cu ingerido que es absorbido, transportado al sitio de acción y usado por el organismo para funciones de mantenimiento y producción (Baker y Ammerman, 1995). La estimación de la biodisponibilidad relativa de diferentes fuentes química de Cu se obtiene, por lo general, a través de ensayos de la relación de pendientes, formulando dietas con niveles graduales de Cu en donde la respuesta indica el estado de Cu evaluado en los animales (Aoyagi *et al.*, 1993). Las respuestas pueden incluir concentraciones tisulares de Cu, de metaloproteínas y actividad enzimática en los animales alimentados con las dietas de ensayos, la pendiente de la línea de regresión se compara con la de los animales alimentados con una fuente de Cu de referencia (Suttle, 2007). El sulfato de Cu pentahidratado es el estándar de referencia más usado para medir la biodisponibilidad de Cu de diversas fuentes orgánicas e inorgánicas (Lønnerdal *et al.*, 1985). La biodisponibilidad relativa de Cu también puede evaluarse in vivo utilizando radioisótopos de Cu y suplementación dietética pletórica. En cerdos, pollos de engorde y ratas, la biodisponibilidad relativa de Cu se ha hecho en experimentos con dietas altas en Cu (Baker y Ammerman, 1995). El hígado, bilis y vesícula biliar se recolectan para medir las concentraciones de Cu y evaluar la biodisponibilidad relativa del mineral (Lo *et al.*, 1984; Cromwell *et al.*, 1989; Aoyagi y Baker, 1995). Los niveles de Cu en plasma, metaloproteínas y actividad de metaloenzimas (ceruloplasmina, citocromo C oxidasa y Cu-superóxido dismutasa) se analizan para medir la biodisponibilidad de Cu (Kegley y Spears, 1994). Suplementos de Cu como citrato de Cu y carbonato de Cu tienen biodisponibilidad relativa similar, el Cu de Cu-Lisina y Cu-Metionina, es más biodisponible en aves de corral (Baker *et al.*, 1991); en contraste, en cerdos, el Cu de Cu-Lisina y Cu-Metionina es más biodisponible que el Cu de carbonato o citrato de Cu (Cuadro 3).

Cuadro 3. Biodisponibilidad relativa de fuentes orgánica e inorgánicas de Cu para cerdos.

Fuente de Cu	Biodisponibilidad relativa ¹
CuSO ₄	100
Cu-Met.	110
Cu-Lis.	112
Carbonato de Cu	85
Óxido de Cu	0
Sulfato de Cu	10
Citrato de Cu	84

¹Biodisponibilidad relativa de Cu hepático expresada con relación a la biodisponibilidad de CuSO₄.

Fuente: Baker y Ammerman (1995).

En general, las fuentes de alimentos vegetales varían en su biodisponibilidad de Cu, pero esta es menor que las fuentes de Cu de origen animal e inorgánicas (Baker y Ammerman, 1995), lo anterior puede deberse al hecho de que el Cu de estos alimentos puede estar unido a los fitatos (Aoyagi *et al.*, 1993). Se ha observado que el Cu almacenado en el hígado de cerdos tiene menor biodisponibilidad comparada con otras fuentes, lo que puede deberse a un alto contenido de Zn en este órgano, y, en consecuencia, inhibir la disponibilidad de Cu usado por el organismo (Aoyagi *et al.*, 1993). El óxido de Cu tiene baja biodisponibilidad cuando se suministra a rumiantes, aves de corral y cerdos (Cromwell *et al.*, 1989), esto aparentemente se debe a la incapacidad del óxido de Cu para solubilizarse en condiciones ácidas, con tasa de paso, relativamente alta, en el tracto gastrointestinal (Kegley y Spears, 1994).

Kong *et al.* (2015) han estudiado la eficacia enzimática, digestibilidad y biodisponibilidad *in vitro* del Cu en ingredientes alimenticios; los resultados indican que el CuSO₄ e hidroxiclورو de Cu (Cu₂(OH)₃Cl) se disolvieron completamente durante la digestión simulada en el estómago, pero la solubilidad de Cu, a partir de hidroxiclورو de Cu, estuvo más influenciada por el pH de la digesta que el Cu, de CuSO₄, en las aves de corral (Pang y Applegate, 2006). Pang y Applegate (2007) demostraron que el Cu de CuSO₄ se disolvió completamente a pH de 6.8, 4.8, 3.0 y 2.0,

sin embargo, el Cu, del hidroxicloriguro de Cu, no se solubilizó a pH de 6,8, pero su solubilidad aumentó gradualmente a medida que disminuyó el pH.

La concentración de Cu en las dietas también puede afectar su solubilidad en el estómago. En cerdos, la solubilidad del Cu durante la digestión estomacal simulada aumentó cuando 250 mg de Cu/kg de MS, de CuSO₄ o hidroxicloriguro de Cu, se incluyó en una dieta control que tuvo 15 mg de Cu/kg de MS. Debido a la baja concentración de Cu en la dieta de control, la disolución del Cu pudo ser inhibida por otros ingredientes de la dieta; por lo tanto, la suplementación de CuSO₄ o hidroxicloriguro de Cu en la dieta de control, pudo aumentar la proporción de Cu disponible disuelto en el estómago de los cerdos (Park y Kim, 2016).

2.11 Efecto del cobre en las características de la canal y calidad de carne de cerdos

El Cu es un microelemento esencial en varios procesos fisiológicos y metabólicos, interviene en la regeneración de las células dañadas por radicales libres, en la síntesis de hemoglobina, elastina, mielina y colágeno, entre otras. En general, se estableció que, para estos procesos, concentraciones entre 5 y 25 mg de Cu kg/MS en la dieta cubren los requerimientos de cerdos (NRC, 2012). Sin embargo, en cerdos de engorda, el suministro de cantidades mayores (100 a 250 mg de Cu kg/MS) mejora el crecimiento (Cromwell *et al.*, 1989; Dove, 1993; Hill and Spears, 2001), reduce el depósito de grasa subcutánea en la canal y aumenta el contenido de ácidos grasos insaturados en la carne (Amer y Elliot, 1973; Pettigrew and Esnaola, 2001); no obstante, la respuesta disminuye con la edad y con el suministro durante períodos prolongados de tiempo (Hastad *et al.*, 2001).

Por otro lado, la absorción del Cu en el intestino delgado es baja y varía dependiendo de la biodisponibilidad e interacción con otros nutrientes de la dieta de la fuente suministrada (inorgánico vs orgánico), en general, el Cu inorgánico se absorbe poco, entre 0.5 y 4.0% (Wapnir, 1998); mientras que el Cu orgánico tiene una mayor, biodisponibilidad, absorción y retención tisular. Una de las fuentes orgánicas de Cu usadas en la nutrición de cerdos es el proteinato de Cu, la cual es un quelado orgánico, que resulta de unir una sal de Cu soluble con aminoácidos, con mayor biodisponibilidad y bioactividad, además de que se reduce su eliminación hacia el ambiente (Murray *et al.*, 1997; Sciavon *et al.*, 2000). Colín Á. *et al.* (2019) evaluaron el efecto de dosis altas de Cu orgánico en la dieta (0, 75, 150 y 225 mg Cu/kg MS), de proteinato de Cu,

sobre la respuesta en la eficiencia del crecimiento, las características de la canal y calidad de la carne de cerdos comerciales Landrace X Duroc en finalización. Estos autores concluyeron que adicionar proteína de Cu a la dieta mejoró el crecimiento y la eficiencia alimentaria de los cerdos en finalización, en las cerdas hembras hubo mayor área de ojo de chuleta, en tanto que en los cerdos machos el proteinato de Cu redujo 10.9% el espesor de grasa dorsal, mejorando las características de la canal; además, el proteinato de Cu aumentó el rendimiento de cortes primarios de la canal y redujo la pérdida de agua en la carne; asimismo, al aumentar la dosis de Cu en la dieta influyó en el pH de la carne y en los índices de coloración a* y b* del músculo Longissimus thoracis, por lo tanto, el Cu mejoró las calidad de la carne de los cerdos. Castell *et al.* (1975) indicaron que cerdos suplementados con altas dosis de CuSO₄ en la dieta redujeron la cantidad de grasa dorsal y modificaron su perfil lipídico, aumentando el contenido de ácidos grasos (AGI) monoinsaturados como palmitoléico (16:1) y oléico (18:1), además redujeron la proporción de ácidos grasos saturados como palmítico (16:0) y esteárico (18:0). En pollo de engorda se ha demostrado que suministrar dietas con 180 mg de Cu kg/MS reduce 25% el colesterol en hígado, pechuga y piernas; contrariamente, un nivel bajo de Cu en la dieta puede causar hipercolesteremia, con aumento de la actividad de la enzima glutatión peroxidasa hepática (Konjufca *et al.*, 1997). La reducción de la grasa corporal puede explicarse por la función que tiene el Cu como regulador endógeno de lipólisis a nivel del segundo mensajero, AMP cíclico (cAMP), alterando la actividad de la fosfodiesterasa PDE3B degradante de cAMP (Krishnamoorthy *et al.*, 2016).

En diversos estudios sobre nutrición porcina se ha abordado como mejorar, a través de la dieta, la calidad de la carne, los perfiles de antioxidantes y de ácidos grasos (AG) en músculo y grasa de cerdos, para hacerla más saludable (Mahan *et al.*, 1999), como resultado, se ha demostrado que la adición de dosis de Cu en la dieta de cerdos en engorda, mayores al requerimiento (>200 mg kg/MS) aumenta los ácidos grasos (AG) insaturados (Amer y Elliot, 1973). El requerimiento de Cu en la dieta de cerdos, según el (NRC, 2012) es de 25 mg Cu kg/MS, pero algunos estudios indican que suplementar 250 mg kg/MS (CuSO₄) mejora su crecimiento (Cromwell *et al.*, 1993; Hill *et al.*, 2000); asimismo, Castell *et al.* (1975) al aumentar el Cu de 125 a 200 mg kg/MS obtuvieron mayor crecimiento de cerdos y también observaron aumentos de los AG insaturados.

Castell y Bowland (1968) no encontraron diferencia ($P>0.05$) en en área de la chuleta al aumentar el Cu dietario (CuSO_4) de 125 a 200 mg kg/MS, pero la grasa dorsal fue menor en los cerdos suplementados con 225 mg de Cu kg/MS, reduciéndose, respecto al grupo control sin Cu, 13.7%. Lo anterior coincide con la función del Cu en el metabolismo de los lípidos; Castell *et al.* (1975) indicaron que en cerdos suplementados con altas dosis de CuSO_4 en la dieta, redujeron la grasa dorsal y modificaron su composición lipídica, aumentando el contenido de ácidos grasos (AGI) insaturados como el palmitoléico (16:1) y oléico (18:1) y redujeron el palmítico (16:0) y esteárico (18:0). En el cerdo Pelón Mexicano, la grasa dorsal puede tener 45.02% de AG esteárico, 4.3% de palmítico y 16.1% de oleico (Lemus *et al.*, 2002). Por otro lado, Konjufca et al. (1997) observaron que suministrar, en dietas de pollos en engorda, 180 mg de Cu kg/MS, redujo 25% el colesterol en hígado, pechuga y pierna; también concluyeron que el bajo nivel de Cu en la dieta puede causar hipercolesteremia, y un aumento del nivel de la enzima glutatión peroxidasa hepática.

2.12 Composición química de la carne

La carne es un producto pecuario de alto valor; contiene nutrientes como proteínas, aminoácidos, minerales, grasas, ácidos grasos, vitaminas y otros componentes bioactivos, así como pequeñas cantidades de carbohidratos. Nutritionalmente, la importancia de la carne se debe a sus proteínas de alta calidad, estas contienen aminoácidos, minerales, lípidos y vitaminas esenciales de elevada biodisponibilidad (FAO, 2013).

Cuadro 4. Contenido nutricional de la carne de cerdo.

Energía	Agua	Proteína	Grasa	Cenizas	Calcio	Fósforo	Hierro	Tiamina
Kcal	(g/100 g)				(mg/100 g)			
469.0	75.1	22.8	1.2	1.0	1.2	2.4	1.3	0.90

Fuente: FAO (2013).

Según el Codex Alimentarius la definición de la carne es: “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 varía según la especie pecuaria, el músculo, la edad, el tipo de alimentación y el sexo del animal, en términos generales el músculo del cerdo contiene: 75% de agua, 22.8% de proteínas, 1.2% de grasa, 1.0% de cenizas (Cuadro 4).

2.13 Calidad de la carne

“Calidad” es considerado un término complejo para su definición, el concepto de “calidad” más difundido y aceptado es el que se 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 considera diferentes aspectos:

1. *Calidad higiénico-sanitaria*: Que está libre de contaminación microbiana y de sustancias tóxicas.
2. *Calidad nutritiva*: Que aporta nutrientes para satisfacer las necesidades del organismo.
3. *Calidad organoléptica*: Que, durante el consumo, conserva percepciones satisfactorias de carácter sensorial.
4. *Calidad tecnológica*: Que mantiene las características necesarias para el desarrollo de determinados procesos de transformación en la industria del manejo y conservación.
5. *Calidad de servicio*: Que tiene cualidades culinarias o de presentación que permiten que sea fácil de preparar y /o consumir.
6. *Calidad simbólica*: Que tiene ciertas características que el consumidor asocia con una mayor calidad (producto fresco vs congelado, imagen de una determinada marca, etc.).

Con base en las diferentes definiciones de calidad hay diversos parámetros y atributos indicativos sobre la calidad de la carne tales como pH, color, contenido de pigmentos, flora bacteriana, capacidad de retención de agua, composición química y energética, nivel de oxidación lipídica, propiedades de textura, atributos sensoriales como olor, sabor y aroma percibidos en la masticación. Estos atributos no se pueden considerar independientes, están muy relacionados entre sí y su interacción proporciona las características de calidad de carne (Sierra, 2010).

2.14 Parámetros fisicoquímicos que determinan la calidad de la carne

2.14.1 pH muscular

Es una de las características de calidad de la carne más importantes por sus efectos directos sobre la estabilidad y propiedades de las proteínas, del valor final, medido por lo general a 24 horas post-mortem, así como la velocidad de caída del mismo durante la transformación de músculo en carne, se afectan a las características organolépticas (color, jugosidad, terneza, aroma, etc.), y tecnológicas de la misma (capacidad de retención de agua, capacidad de conservación o vida de anaquel) (Sañudo, 1991). El pH del tejido muscular del animal vivo es neutro, tras la muerte del animal, cesa el aporte sanguíneo de oxígeno y nutrientes al músculo, el cual debe usar sus reservas de energía para sintetizar ATP con el fin de mantener la temperatura e integridad muscular. Conforme se reducen los niveles de ATP, se genera al mismo tiempo fosfato inorgánico, el cual, a su vez, estimula la degradación de glucógeno a ácido láctico, mediante glucólisis anaerobia (Garrido *et al.*, 2005). La formación de ácido láctico y otros ácidos orgánicos causa un descenso del pH muscular, el cual continua hasta que se agotan las reservas de glucógeno o hasta que se inactivan las enzimas que controlan el metabolismo muscular (Lawrie, 1998). Debido a la estrecha relación entre el descenso del pH y la transformación de músculo en carne, la determinación de este parámetro constituye una medida obligada para conocer el proceso de maduración y valoración de la calidad de la carne como producto final (Purchas, 1990). Durante la matanza y faena hay circunstancias en la evolución del pH que alteran la calidad de la carne, se conocen como carnes PSE (pale, soft, exudative; pálida, suave, exudativa) y DFD (dark, firm, dry; oscura, firme, seca), cuyas características han sido ampliamente estudiadas (Cuadro 5).

Medir el pH en diferentes músculos tiene como objetivo estudiar su evolución de durante los procesos de transformación en carne. Por lo tanto, se usan, para su medición, tiempos cercanos a la obtención de la canal a 45 minutos de la matanza (pH 45min) y a 24 horas postmortem (pH 24h), ya que este es el momento cuando se alcanza el pH más bajo, a partir de aquí, se mantiene o comienza a subir el valor, dependiendo de la temperatura ambiente (Oliver *et al.*, 1991).

Cuadro 5. Características de las carnes PSE y DFD.

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

Fuente: Hoffmann (1990).

2.14.2 Capacidad de retención de agua

El parámetro capacidad de retención de agua (CRA) es la propiedad que tiene la carne para retener su propia agua, tanto durante la aplicación de fuerzas externas, como por otros tratamientos. La importancia de la CRA radica en que la pérdida o ganancia de agua afecta el peso y valor económico de la carne. El contenido y distribución de agua en la carne influye en sus propiedades y productos derivados, y está relacionado con otros atributos como textura, terneza y color de la carne cruda, así como con la jugosidad y firmeza de la carne cocinada. Inmediatamente después de la matanza del animal, la carne cruda de los mamíferos contiene, en promedio, 75% de agua (Lawrie, 1998), este valor varía con la especie pecuaria y músculo evaluado. Parte de esta agua se pierde por evaporación durante la faena, enfriamiento de la canal (en bovino pierde hasta 2% de su peso) o por goteo, como consecuencia por la disección de tejidos (según el grado de partición de la carne puede perderse hasta 6%, el valor puede duplicarse tras la descongelación y puede ser mayor aún en la carne PSE). Las mayores pérdidas de agua, sin embargo, se producen al cocinar la carne, perdidas que pueden superar el 40% (Offer y Knight, 1988).

Las pérdidas de agua por evaporación de la superficie de las canales se producen durante su enfriamiento por diferencias de presión de vapor. La evaporación de agua afecta su aspecto y reduce su aceptación por el 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 33%, con el correspondiente incremento en la concentración de sales y proteínas (Offer y Knight, 1988).

Aproximadamente, 70% del agua de la carne fresca está localizada en las miofibrillas musculares, 20% en el sarcoplasma y el resto en tejido conjuntivo. Del total de agua del músculo 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 (Sayre y Briske, 1963) y valor de pH. Así, el agua ligada permanece fuertemente unida a las proteínas, incluso cuando se aplican fuerzas externas sobre el músculo. A medida que el agua se aleja de los grupos reactivos de las proteínas se disponen moléculas de agua unidas por fuerzas de menor intensidad, lo cual se denomina “*agua inmovilizada*”, la cantidad de agua que se desprende depende de la intensidad de la fuerza externa aplicada sobre el músculo. El agua que se mantiene 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 (Forrest *et al.*, 1979).

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. Únicamente tratamientos muy severos (deshidratación a altas temperaturas) afectan al agua ligada (Hamm, 1986).

Actualmente, 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.

2.14.3 Color

El color de la canal y carneo es un parámetro preferente entre los factores que definen su calidad, el producto pecuario cárnico puede ser rechazado por su color, sin valorarse otras propiedades como aroma, textura o sabor, por esto es de gran importancia para la industria cárnica que la apariencia que la carne que se oferta en el mercado al consumidor muestre un alto grado de aceptabilidad; no obstante, en la aceptación del color influyen factores de tipo geográficos, sociales y culturales, por lo tanto, generalizar este parámetro es complejo (Kramer, 1994).

El color de la carne depende del contenido de pigmentos hemínicos, principalmente mioglobina, 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 de marmoleo (Warris *et al.*, 1990). El color rojizo de la carne resulta de la presencia del pigmento mioglobina, la cual es una proteína conjugada con el grupo prostético “*hemo*”, este contiene hierro que tiene una función primordial en las distintas coloraciones. El pigmento se presenta en diversas formas: 1) la oxihemoglobina, de color rojo brillante, 2) la metamioglobina de color café y 3) 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 dependerán de la concentración del pigmento y sus cambios bioquímicos, entre mayor contenido de mioglobina, más oscura es 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 oxidarse; la superficie de los cortes frescos va cambiando de tonalidad debido al estado oxigenado del pigmento (Cañeque y Sañudo, 2005).

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 O_2 se pierde cuando las proteínas de la carne se desnaturalizan por el calor, esta es la razón del cambio de color en la cocción. Otra causa de los cambios en los colores normales de la carne es la presencia de microorganismos en la superficie que ocasionan oxidación de la misma. El color de la carne no está relacionado con su ternura y, en general, cuanto más oscura sea una carne, más intenso será su sabor (Guerrero *et al.*, 2002).

La percepción del color de la carne es única y exclusiva de cada individuo, por lo tanto, había 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 comparaciones. Actualmente, para la identificación exacta de un color, hay numerosos instrumentos que le atribuyen valores numéricos, los cuales hacen objetiva esta propiedad. Actualmente, la Comisión Internacional de la Iluminación (Commission International de l'Eclairage- CIE), ha definido el sistema más importante y usado para describir el color, basado en observadores y fuentes de iluminación estándar (Giese, 1995). El método de referencia ampliamente utilizado para la medición del color en la carne es el referenciado por Honikel (1998). La ventaja de utilizar este espacio de color (CIE-Lab) estriba en 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), depende de factores como 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); además, la 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 son los valores de L^* . La coordenada a^* (rojo-verde) está relacionada con el contenido de mioglobina. La coordenada b^* (amarillo-azul) está relacionada con los distintos estados de mioglobina (Pérez-Alvarez *et al.*, 1998).

Cuadro 6. Parámetros de color de diferentes músculos y especies pecuarias.

Especie	Músculo	L*	a*	b*
Bovino ¹	<i>Longissimus dorsi</i>	39.1	17.1	7.0
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>Semimembranoso</i>	63.1	8.12	2.1
Cerdo ⁶	<i>Semimembranoso</i>	48.9	3.95	11.2
Conejo ⁷	<i>Biceps femoralis</i>	52.1	3.47	4.4

Fuente: ¹Rubio *et al.* (2005); ²Gil *et al.* (2001); ³Holownia *et al.* (2003); ⁴Norman *et al.* (2003); ⁵Ondřej *et al.* (2013); ⁶Olivas *et al.* (2017); ⁷Pla *et al.* (1998).

El color de la carne puede modificarse por factores de tipo fisiológico y de proceso, tales como la especie, los bovinos poseen mayor concentración de mioglobina que los porcinos; el contenido de mioglobina en la carne de ovinos se estima en alrededor de 0.25%; el sexo, los machos poseen mayor cantidad de mioglobina que las hembras y machos castrados; la cantidad y tipo de fibras musculares, las características genéticas y edad, los animales viejos producen carne de color marrón (Díaz, 2001). El Cuadro 6 muestra parámetros de color muscular de especies pecuarias.

2.14.4 Textura

La mayoría de los consumidores de carne consideran la *dureza* como el factor más importante que determina su calidad. Quizá sea debido a esto que cuando se habla de carne, frecuentemente se utilizan indistintamente los términos textura y dureza, pero cabe aclarar que no son sinónimos. La *textura* es una propiedad sensorial, mientras que la *dureza* es un atributo de la *textura* (Chrystall, 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 densidad, dureza, plasticidad, elasticidad, consistencia, cantidad de grasa, humedad y tamaño de las partículas de la misma. De entre ellas, el consumidor da mayor importancia a la ternura, la cual se considera antagónica a la dureza como principal atributo de la

textura, siendo uno de los criterios determinantes de la calidad de la carne (Lawrie, 1998).

Está aceptado que dos fracciones proteicas determinan la terneza, por un lado, están: a) las proteínas del tejido conjuntivo y, por otro, b) las proteínas miofibrilares. Las primeras están constituidas por el colágeno, elastina y reticulina, y constituyen un elemento negativo que limita 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. Hill (1996) indica que la solubilidad del colágeno es el factor más importante a considerar cuando se habla 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, habiendo estrecha relación entre esta y el grado de concentración de las miofibrillas. Herring *et al.* (1967) demostraron que la dureza de la carne está relacionada con la contracción de las fibras musculares.

De acuerdo con Van Hoof (1981), sobre el parámetro terneza influyen tres componentes, a) en primer lugar está el tamaño de los paquetes de fibras contenidas en el músculo, pues los diferentes tipos de fibras musculares presentan diferentes capacidades de contracción y retención de agua, por lo tanto, reaccionan de distinta forma a las temperaturas que determinan la cocción y refrigeración. En las especies pecuarias mayores, como el ganado vacuno, estos paquetes son mayores que en las especies menores como el ovino y cerdo; b) en segundo lugar, inciden sobre la dureza la longitud de sarcómero y miofibrillas, de tal forma que cuanto mayor es su contracción mayor es la dureza; c) por último, como se ha mencionado, influye el contenido y naturaleza del tejido conjuntivo, una mayor cantidad de colágeno implica mayor dureza, mucho más si está muy polimerizado, lo cual disminuye su solubilidad (Touraille, 1978).

Otro aspecto importante es la actividad enzimática que depende de la temperatura y, a medida que la temperatura post mortem disminuye, la actividad de las enzimas implicadas en la degradación miofibrilar (calpaína y calpastatina) disminuyen también; por lo tanto, la degradación miofibrilar, la cual está relacionada con la menor dureza de la carne, se ve reducida. La extensión del ablandamiento de la carne es proporcional al nivel de calpaínas y calpastatinas en a misma (Shackelford *et al.*, 1991; Koomaraie, 1992). De acuerdo con lo observado por Shackelford *et al.* (1991) el inhibidor de las calpainas (calpastatina) es el parámetro mejor

correlacionado con la dureza después de transcurrir 14 días de almacenamiento a una temperatura de 2 °C; estos autores especularon sobre la función de estas enzimas como reguladoras de la dureza. El pH también influye sobre la dureza de la carne; algunos estudios han demostrado que la dureza probablemente alcanza su valor más bajo si la glucólisis post mortem se verifica a una velocidad intermedia (corresponde a un valor de pH de aproximadamente 5.9 puntos a 3 horas post mortem), y es mayor con una velocidad más lenta o más rápida (Smulders *et al.*, 1990).

Dentro del mismo músculo la dureza también varía, por ejemplo, en el músculo del lomo, aumenta del centro hacia los extremos, debido, sobre todo, al contenido de tejido conjuntivo presente. Se ha establecido que muchos de los puentes covalentes que unen las moléculas de tropocolágeno son relativamente lábiles en animales jóvenes y, se hacen más estables conforme aumenta la edad. Varios estudios han mostrado el endurecimiento que causa el “acortamiento por frío” en la carne de ganado bovino. También parece haber diferencias en cuanto a la dureza debido al factor racial, aunque estas son relativamente poco importantes, porque dentro de la misma raza se pueden dar variaciones mayores. El factor sexo tampoco parece tener efecto especialmente importante (Sierra *et al.*, 1988). En animales jóvenes no se encontraron diferencias entre machos y hembras; Dransfield *et al.* (1990) tampoco se encontraron diferencias en la dureza de la carne entre machos enteros y castrados; en contraste, Alvi (1980) detectó que en animales enteros la carne fue más dura que castrados. Dreyer *et al.* (1977) afirmaron que los machos tienen mayor dureza debido al mayor contenido en colágeno y menor cantidad de grasa de infiltración que las hembras.

La textura de la carne puede ser evaluada por diferentes métodos, dentro de los métodos subjetivos está el test de consumidores y/o paneles de catadores, y en los métodos objetivos se pueden clasificar en mecánicos (corte, compresión y penetración), estructurales, químicos y otros (ultrasonido, fluorescencia). Las mediciones objetivas de la textura pretenden imitar las fuerzas necesarias producidas al morder y durante la masticación. Las mediciones se pueden realizar sobre la carne cruda y cocida. 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, recomendando una temperatura de 75 °C. El grosor y peso de las muestras de carne debe ser igualmente constante. Todas las mediciones de la prueba deben ser siempre claramente definidas

en la metodología (Honikel, 1998).

Para medir la dureza de la arne, el método más usado 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 la fuerza usada, más dura es la carne. Muchos factores influyen en la medición (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, así como la 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/cm^2 (Galián, 2007). En el Cuadro 7 se muestran resultados de estudios realizados sobre la medición de la variable fuerza de corte en músculo del lomo de diferentes especies pecuarias.

Cuadro 7. Valores medios de la variable esfuerzo al corte en músculos *Longissimus thoracis* y *dorsi* de cerdos y ovinos en engorda.

Espece pecuaria	Músculo	Fuerza de corte (kg/cm^2)
Cerdos ¹	<i>Longissimus thoracis</i>	3.04
Ovinos ²	<i>Longissimus dorsi</i>	3.00

¹Olivas *et al.* (2017).²Moreno-Camarena. (2015).

2.15 Colágeno

El colágeno de la carne es la proteína más abundante en el cuerpo de los mamíferos; constituye en promedio 25% del total de la proteína del cuerpo, y 95% de los elementos fibrosos del tejido conectivo, aunque un gran contenido está asociado con el esqueleto (Pearson y Young, 1989). Molecularmente el colágeno es una glucoproteína fibrosa, es insoluble en medio neutro, su contenido de aminoácidos esenciales es menor que en las proteínas intracelulares. No contiene los aminoácidos triptófano y cistina, por lo tanto, es de bajo valor biológico, sin embargo, el colágeno es el principal responsable de la llama “dureza base de la carne” ya que casi no es afectado por la maduración. La unidad funcional del colágeno es el tropocolágeno, formado por

tres cadenas polipeptídicas, portadoras de los glúcidos glucosa y galactosa, las cuales están enrolladas entre sí, constituyendo una triple hélice. Las cadenas polipeptídicas están unidas por fuertes enlaces, de ahí que sea una proteína difícil de atacar por enzimas digestivas. La proporción de estas uniones incide en la textura de la carne y difiere entre músculos. Por ello, la textura de la carne depende del contenido de colágeno, 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 polipéptídicas que forman el tropocolágeno están constituidas por una secuencia de aminoácidos conocida, 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, es poco frecuente en las proteínas, por lo que su cuantificación se usa comúnmente para la determinación del contenido de colágeno en carne (Bonnet y Kopp, 1984). A la hidroxiprolina se fijan los glúcidos de la molécula de colágeno, además, juega un papel importante en la formación de entrecruzamientos en las fibras de colágeno y, 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 varía de 7 a 8, según el tipo de colágeno considerado.

El colágeno está clasificado bioquímicamente de acuerdo a su estructura y composición, de forma que cada clase de tejido contiene una composición característica de colágeno; hay cinco tipos de colágeno, además de otros minoritarios que se diferencian en la secuencia de aminoácidos como el tipo 7s, CF1, CF2, IX, HVM, LMV, VI, VII, VIII y X. El mayoritario se ha clasificado como: Colágeno I, el cual constituye 90% del total, forma el epimisio y el perimisio (Bailey y Sims, 1977); Colágeno II, está presente en el músculo, además de otros tejidos (Swan *et al.*, 1976); Colágeno III, se encuentra en el epimisio y en menor proporción en el endomisio; Colágeno IV, presente en mayor proporción en el endomisio; y Colágeno V, aislado de diversos tejidos, incluyendo el muscular, se encuentra en forma de trazas en el perimisio (Stenn *et al.*, 1979).

El contenido de colágeno depende de diferentes factores; dentro de la misma especie y

raza, el contenido de colágeno se ve influido por la edad y 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 especies pecuarias productoras de carne indican contradictorias respecto a los cambios cuantitativos que se producen en función de la edad; Wada *et al.* (1980) indicaron un aumento del contenido de colágeno en animales de mayor edad, 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 tienen; 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 mayor. 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 según el músculo, raza y sexo del animal pecuario (Heinze *et al.*, 1986), pero el factor esencial de variación es el resultado de la polimerización que progresa con el envejecimiento, lo cual explica parte de las diferencias observadas dentro de la 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 y, por lo tanto, provoca una textura más dura de la carne. Los enlaces cruzados son termorresistentes, a esto se atribuye que la cantidad de colágeno solubilizado mediante calentamiento sea superior en animales más jóvenes, es decir, la solubilidad del colágeno disminuye con la edad (Hill, 1966).

2.16 Lípidos de la carne y grasa

El el proceso de metabolismo de lípidos incluye el depósito de grasa subcutánea (tejido adiposo intermuscular) y grasa intramuscular del tejido muscular. Las grasas de depósito intermuscular se localizan en la capa subcutánea, pero en ocasiones también están presentes en cantidades considerables entre los músculos, como depósitos intermusculares, así como en las cavidades del cuerpo, alrededor de los riñones, pelvis y corazón (grasa RCP) (Ramírez, 2004). La cantidad de grasa de cada depósito difiere según la especie, (en cerdo haye más grasa subcutánea que en el bovino), incluso dentro de especie, observándose como en el ganado bovino de aptitud lechera una acumulación predominante de grasa interna, mientras que los animales de aptitud cárnica, acumulan mayor grasa subcutánea, también denominada por la grasa de cobertura (Lister, 1980). En todas las especies pecuarias hay relación positiva elevada entre el contenido de grasa intramuscular o de infiltración con 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 efecto en el aumento del flavor o aroma de la carne, se ha demostrado que el flavor de la carne, *per se*, reside en su fracción soluble en agua, mientras que las características del flavor y aroma de las especias reside en su fracción lipídica.

Otra contribución importante 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 el 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), además facilita la absorción de las vitaminas liposolubles (Linschneer y Vergroesen, 1981).

2.17 Ácidos grasos

Los ácidos grasos encontrados en 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 grasa de cordero y bovino se han encontrado ácidos grasos de cadenas impar y ramificada, además de ácidos grasos *trans* e isómeros posicionales del ácido oleico y linoleico (Enser *et al.*, 1996).

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: palmitoleico (C16:1) y oleico (C18:1); los poliinsaturados son linoleico (C18:2), linolenico (C18:3) y araquidónico (C20:4). Los ácidos grasos con un número impar de átomos de carbono mayoritarios en la grasa animal son: pentadecanoico (C15:0) y 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 cordero (Solomon *et al.*, 1992). Así, en el caso de los ovinos, se ha observado que cerca del 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 existen importantes contribuciones de grasas esenciales polinsaturadas como las que proporciona el linoleico (C18:2), linolénico (C18:3) y araquidónico (C20:2) (Velasco *et al.*, 2001). Hay, otros ácidos grasos poliinsaturados en pequeñas concentraciones, pero de efectos muy benéficos para la salud humana, como son los ácidos grasos omega 3 (ácido eicosapentanoico (EPA), el decosahexanoico (DHA) y el ácido linoleico conjugado (CLA), cuya síntesis solo se realiza en especies pecuarias rumiantes (Cuadro 8). 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 al no poder sintetizarlos el propio

organismo, deben ser aportados en la dieta (Santos, 2002).

Los animales monogástricos 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 incremento en el contenido de 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),

Cuadro 8. Contenido medio de ácidos grasos en *Longissimus dorsi* de ovinos y cerdos.

Nombre	Numero de C	Ovino ¹	Cerdo ²
Cáprico	C10:0	0.42	---
Laurico	C12:0	1.48	0.10
Mirístico	C14:0	2.45	1.30
Miristoleico	C15:0	0.44	---
Palmítico	C16:0	30.3	23.20
Palmitoleico	C16:1n7	2.11	2.55
Exadecenoico	C16:1	2.20	2.70
Metil-Palmítico	C17:0	0.98	---
Esteárico	C18:0	13.20	12.20
Elaidico	C18:1n9 trans	1.529	---
Oleico	C18:1n9 cis	34.29	32.80
Linoléico	C18:2n6	10.54	14.20
Linolenico	C18:3n3	0.61	1.00
Araquidónico	C20:4n6	3.53	2.20

¹Cruz *et al.* (2014); ²Lawrie (1998).

Los ácidos grasos participan en diferentes aspectos tecnológicos de calidad de la carne.

Puesto que tienen 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) se funde a 69.6 °C, ácido oleico (18:1) a 13.4 °C, ácido linoleico (18:2) a -5 °C, y 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 contienen grasa solidificada con elevado punto de fusión aparecen más blancos que aquella grasa líquida con 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 para oxidarse rápidamente de los ácidos grasos insaturados, 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).

2.18 Fibras musculares y su relación con la calidad de la carne

La composición de las fibras musculares, también es un factor importante que influye en los procesos bioquímicos *pre* y *posmortem*, y, por lo tanto, en la calidad de la carne. El músculo esquelético presenta gran diversidad en los diferentes tipos de fibras musculares. Hay diferencias marcadas en cuanto a composición de los tipos de fibras, tanto dentro como entre individuos, lo cual puede influir en la calidad de la carne, en función de factores como la localización corporal, edad, peso y raza del animal (Pette y Staron, 1990). Las características intrínsecas del músculo, el tipo fibrilar, el área de sección transversal de las fibras (AST) y el tipo de metabolismo que poseen, intervienen y son muy importantes fuentes de variación en la calidad de la carne para su consumo fresco o industrializado (Maltin *et al.*, 1997); sin embargo, estas características musculares y su influencia real en las propiedades sensoriales de la carne no han sido totalmente estudiadas e identificadas y son actualmente motivo de extensa investigación (Lebret *et al.*, 1999).

2.19 Morfología de la fibra muscular

De acuerdo con Ryu y Kim (2005), morfológicamente la fibra muscular es representada por el número total de fibras (NTF), el área de la sección transversal (AST) y el ancho de la fibra muscular. El diámetro y número de fibras son factores que afectan el potencial de crecimiento del

músculo y la calidad de la carne. El NTF y el AST están inversamente relacionadas entre si, pero se correlacionan positivamente con la masa muscular. Para los músculos *Longissimus dorsi* y *Semitendinoso*, en cerdos de igual peso, se observa que los animales con rápido crecimiento tienen mayor número de fibras, pero estas son más pequeñas que en canales de cerdos con baja tasa de crecimiento; en la masa de los músculos influye más el número de fibras que el diámetro fibrilar. En cerdos, se ha reportado que el NTF tiene una correlación positiva con la calidad de la carne (Ryu y Kim, 2005). El NTF se correlaciona positivamente con el pH medido a 45 minutos post mortem y está negativamente correlacionado con el drip loss (Fielder *et al.*, 1994). En el caso del AST, los estudios sugieren que el aumento del tamaño de la fibra muscular influye negativamente en la calidad de la carne debido a que el tamaño de la fibra es uno de los factores más importantes que determina la dureza de la carne (Cassens y Cooper, 1971). Así mismo, Karlsson *et al.* (1993) indicaron que los músculos con fibras más grandes muestran más dureza de la carne que los músculos con fibras más pequeñas; Duckett *et al.* (2000) indicaron una correlación negativa entre el área de las fibras y la terneza de la carne. Actualmente, se sabe de la importancia del área de las fibras musculares sobre su influencia en el metabolismo muscular en el periodo *perimortem*. El aumento del área es una característica negativa porque reduce el número de capilares unidos a las fibras, en consecuencia, reduce el transporte de oxígeno y substratos, hay deficiente remoción de productos finales (CO₂ y lactato), que afectan la calidad de carne (Karlsson *et al.*, 1999).

2.20 Relación entre el pH y las fibras musculares

La reducción del pH depende del tipo de fibras predominantes, así como de la actividad muscular antes de la matanza. Los músculos con predominio de fibras de contracción rápida (blancas) alcanzan un valor de pH final de 5.5, mientras que si hay una mayor cantidad de fibras de contracción lenta (rojas), el pH no baja más allá de 6.3. Los músculos que más trabajan pre matanza son los que tienen valores post-mortem de pH más elevados (Pearson y Young, 1989).

Ryu *et al.* (2006) indicaron que post mortem el porcentaje de fibras musculares de tipo IIB está negativamente correlacionado con el pH muscular; Choe *et al.* (2008), indicaron que los músculos con elevado porcentaje de fibras musculares de tipo IIB y bajo porcentaje de fibras tipo I, muestran mayores contenidos de glicógeno y lactato a 45 minutos post mortem, además,

muestran un color más pálido y alto valor drip loss en el periodo post mortem. Poto *et al.* (2004) observaron correlación positiva entre el pH a 45 minutos post mortem con el porcentaje de fibras tipo IIA, y una correlación negativa con su tamaño, área y diámetro mínimo en fibras tipo IIB. Con respecto al pH medido a 24 horas post mortem, los mismos autores indicaron correlación negativa entre el área y diámetro mínimo de las fibras tipo I, una correlación positiva con el porcentaje de fibras oxidativas (I y IIA), y una correlación negativa con el porcentaje de fibras tipo IIB, concluyendo que hay relación positiva entre el pH final y el porcentaje de fibras oxidativas, por lo tanto, el pH final está más correlacionado con la capacidad oxidativa y área de las fibras oxidativas lentas, con una mayor variación en músculos con alta capacidad oxidativa (Maltin *et al.*, 1997).

2.21 Relación entre la grasa intramuscular y las fibras musculares

Los lípidos intramusculares se encuentran almacenados principalmente en las fibras musculares tipo I y en algunas del tipo IIA; también se ha encontrado una correlación positiva entre la grasa intramuscular y la frecuencia de fibras tipo IIB. Por lo tanto, la terneza de la carne está relacionada con el perfil metabólico del músculo, encontrándose gran variabilidad entre la capacidad oxidativa y el almacenamiento de glucógeno y lípidos en diversas razas de especies pecuarias estudiadas, incluso, entre individuos de la misma especie. En los estudios de Serra *et al.* (1998), al comparar cerdos de raza Landrace con cerdos cerdos Ibéricos, mostraron que el porcentaje y tamaño de las fibras musculares guarda cierta correlación con la calidad final del producto, destacando que en los cerdos Ibéricos el porcentaje de grasa intramuscular está más relacionado con el porcentaje de fibras musculares tipo I; Ruusunen (1996) encontró que un porcentaje mayor de fibras lentas rojas tipo I y IIA, de escaso diámetro, y una disminución del tipo IIB, al menos para el músculo *Longissimus dorsi* en cerdos, favorecer la calidad de la carne; Lefaucher (1989) señaló que la calidad de la carne puede disminuir por aumentos de fibras tipo IIB, como consecuencia de una disminución de los lípidos intra e interfibrilares; otros autores indicaron que en músculos con más de 30% de fibras tipo IIB, suelen tener características asociadas con carnes DFD, oscuras, firmes y secas (Klont *et al.*, 1998). En el cerdo Chato Murciano, Poto *et al.* (2004) indicaron correlación positiva entre la grasa intramuscular y el porcentaje de fibras tipo I y IIA, y correlación negativa con el porcentaje de fibras IIB; en

contraste, Larzul *et al.* (1997) hallaron que, en cerdos, la grasa intramuscular no está correlacionada con los porcentajes fibrilares del músculo *Longissimus dorsi*.

2.22 Relación entre el color de la carne y las fibras musculares

Las fibras musculares tipo I y IIA tienen mayor contenido de mioglobina que las fibras tipo IIB (Essén-Gustavson *et al.*, 1992), por lo tanto, los músculos con mayor contenido de fibras de orientación oxidativa (tipo I y IIA), presentan un color rojo intenso, mientras que los músculos con mayor contenido de fibras con orientación glicolítica (tipo IIB), presentan un color más blanco. Por otra parte, las fibras tipo I y IIA tienen mayor concentración de mitocondrias, comparadas con las fibras tipo IIB, una característica de estas es que compiten con la mioglobina por el oxígeno, disminuyendo el color rojo brillante de la superficie y la estabilidad del color, así, el color de los músculos glicolíticos puede ser más estable que el de los músculos oxidativos. Los estudios de Larzul *et al.* (1997) indicaron que no hay correlación clara entre el parámetro luminosidad y área de la sección transversal de la fibra, sin embargo, en el cerdo de la raza Chato Murciano, según Poto *et al.* (2004) si hay correlación positiva con el área de las fibras tipo IIB y, en menor medida, con las fibras tipo IIA, por lo tanto, hay correlación negativa con el área de las fibras tipo I. Los estudios realizados por Maltin *et al.* (1997) indicaron que no hay correlaciones significativas entre las características del tipo de fibra y los valores de la coordenada a* (índice de rojos), mientras en el cerdo Chato Murciano si se encontraron correlaciones positivas entre la coordenada a* y el tamaño de las fibras tipo IIB, y correlaciones negativas con el tamaño de las fibras tipo I y IIB.

2.23 Relación de la calidad sensorial de la carne y las fibras musculares

La relación entre el tipo de fibras musculares y la calidad sensorial de la carne no es del todo clara; sin embargo, varios estudios muestran la existencia de correlación entre la calidad sensorial de la carne con el tipo de fibras, con evidencia de una importante correlación positiva entre un elevado contenido de fibras tipo I con la jugosidad y sabor de la carne, esto como consecuencia de la gran cantidad de lípidos encontrados en las fibras tipo I, lo cual es muy importante para la percepción del sabor y jugosidad de la carne. Por otra parte, hay, correlación negativa entre altos contenidos de fibras tipo IIB con la ternura y esfuerzo al corte; lo anterior se

ha asociado con el hecho de que las fibras tipo IIB son más grandes y presentan mayor resistencia a la fuerza de corte (Cuadro 9) (Taylor, 2004).

Cuadro 9. Relación entre el tipo de fibras musculares y la calidad de la carne.

Tipo de fibra	Característica	Relación con la calidad de la carne
I	Roja, oxidativa, contracción lenta, rica en mitocondrias, más contenido de mioglobina.	Alto contenido de grasa, diámetro pequeño, color rojo, bajo potencial glicolítico.
IIA	Roja, intermedia, contracción rápida, anaeróbica.	Intermedia, alcanzan rápidamente el <i>rigor mortis</i> en comparación con las fibras tipo I.
IIB	Blancas, glicolíticas, contracción rápida, ricas en glicógeno, anaeróbicas, menos contenido de mitocondrias.	Fibras grandes, resistentes al corte, color pálido, cambios en el tamaño con el ejercicio y edad, elevado potencial glicolítico, descenso de pH lento.

Fuente: Taylor (2004).

2.24 Literatura citada

- Adeola, O. 1995. Digestive utilization of minerals by weanling pigs fed copper- and phytase supplemented diets. *Can. J. Anim. Sci.* 75:603-610.
- Alvi, A. S. 1980. The influence of sex status on meat quality characteristics in sheep. *Fleischwirtschaft.* 60:2037.
- Amer, M.A., and J. I. Elliot. 1973. Influence of supplemental dietary copper and vitamin E on the oxidative stability of porcine depot fat. *Journal of Animal Science.* 37:87-90.
- Aoyagi, S., and D. H. Baker. 1995. Effect of microbial phytase and 1,25-dihydroxycholecalciferol on dietary copper utilization in chicks. *Poult. Sci.* 74:121-126.
- Aoyagi, S., D. H. Baker, and K. J. Wedekind. 1993. Estimates of copper bioavailability from liver of different animal species and from feed ingredients derived from plants and

- animals. *Poult. Sci.* 72:1746-1755.
- Araya, M., M. Gonzalez, M. Olivares, and R. Uauy. 2002. Biological effects of chronic copper exposure. In: *Handbook of Copper Pharmacology and Toxicology*, E. J. Massaro, ed. Totowa, NJ. Humana Press.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). 2002. Toxicological profile for copper. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. Available at <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp132.html>. Accessed March 23, 2020.
- Bailey, A. J., and T.J. Sims, T. J. 1977. Meat tenderness: Distribution of molecular species of collagen in bovine muscles. *J. Sci. Food Agric.* 28:565.
- Baker, D. H., and C. B. Ammerman. 1995. Copper bioavailability. In: C. B. Ammerman, D. H. Baker and A. J. Lewis, editors, *Bioavailability of nutrients for animals*. Academic Press, San Diego. p. 127-156.
- Baker, D. H., J. Odle, M. A. Funk, and T. M. Wieland. 1991. Research note: bioavailability of copper in cupric oxide, cuprous oxide, and in a copper-lysine complex. *Poult. Sci.* 70:177-179.
- Besser, J. M., C. G. Ingersol, and J. P. Giesy. 1996. Effects of spatial and temporal variation of acid-volatile sulfide on the bioavailability of copper and zinc in freshwater sediments. *Environ. Toxicol. Chem.* 15:286-293.
- Body, D. R. 1988. The lipid composition of adipose tissue. *Prog. Lipid Res.* 27:39-60.
- Bonet, M., and J. Kopp. 1984. Dosage du collagène dans les tissus conjonctifs, la viande et les produits. *Cah. Techn. INRA.*5:19-30.
- Bradley, B. D., G. Graber, R. J. Condon, and L. T. Frobish. 1983. Effects of graded levels of dietary copper on copper and iron concentrations in swine tissues. *J. Anim. Sci.* 56:625-630.
- Bradley, C. H. 1993. Copper poisoning in a dairy herd fed a mineral supplement. *Can. Vet. J.* 34:287-292.
- Bremner, I. 1987. Involvement of metallothionein in the hepatic metabolism of copper. *J. Nutr.* 117:19-29.
- Bremner, I., B. W. Young, and C. F. Mills. 1976. Protective effect of zinc supplementation

- against copper toxicosis in sheep. *Br. J. Nutr.* 36:551-561.
- Cañeque, V. y C. Sañudo. 2005. 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.
- Cassens, R. G. and C. C. Cooper. 1971. Red and white muscle. *Advances in Food Research.* 19:1-74.
- Castell, A. G., and J. P. Bowland. 1968. Supplemental copper for swine: growth, digestibility and carcass measurements. *Can. J. Anim. Sci.* 48:403-413.
- Castell, A.G., R. D. Allen, R. M. Beames, J. M. Bell, R. Belzile, J. P. Bowland, J. I. Elliot, M. Ihnat, E. Larmond, T. M. Mallard, D. T. Spurr, S. C. Stothers, S. B. Wilton, and L.G. Young. 1975. Copper supplementation of Canadian diets for growing-finishing pigs. *Canadian J. of Anim. Sci.* 55:113-134.
- Choe, J. H., Y. M. Choi, S. H. Lee, H. G. Shin, Y. C. Ryu, and K. C. Hong. 2008. The relation between glycogen, lactate content and muscle fiber type composition, and their influence on postmortem glycolytic rate and pork quality. *Meat Sci.* 80:355-362.
- Chrystall, B. B., C. E. Devine, M. Snodgrass, and S. Ellery. 1982. Tenderness of exercised lambs. *N. Z. J. Agric. Res.* v25:331.
- Close, W. H., and D. J. A. Cole. 2000. Nutrition of sows and boars. In: T. P. Lyons, editor, Nottingham University Press, Nottinghamshire, U. K. p. 8-9.
- Colín-Álvarez, B. M., I. A. Domínguez-Vara, J. L. Bórquez-Gastelum, J. A. Partida-De la Peña, J. E. Sánchez-Torres, E. Morales-Almaraz y D. Trujillo-Gutiérrez. 2019. Efecto de la inclusión de proteinato de cobre en la dieta sobre el comportamiento productivo, las características de la canal y la calidad de la carne de cerdos en finalización. *Tropical and Subtropical Agroecosystems.* 22: 153-161.
- Collins, J. F., J. R. Prohaska, and M. D. Knutson. 2010. Metabolic crossroads of iron and copper. *Nutr. Rev.* 68:133-147.
- Cousins, R. J. 1985. Absorption, transport, and hepatic metabolism of copper and zinc: special reference to metallothionein and ceruloplasmin. *Physiol. Rev.* 65:238-309.
- Cromwell, G. L., H. J. Monegue, and R. D. Coffey. 1994. Efficacy of a copper-lysine complex as a growth promotant for weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 72:2880-2886.

- Cromwell, G. L., H. J. Monegue, and T. S. Stahly. 1993. Long-term effects of feeding a high copper diet to sows during gestation and lactation. *J. Anim. Sci.* 71:2996-3002.
- Cromwell, G. L., M. D. Lindemann, H. J. Monegue, D. D. Hall, and J. D. E. Orr. 1998. Tribasic copper chloride and copper sulfate as copper sources for weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 76:118-123.
- Cromwell, G. L., T. S. Stahly, and H. J. Monegue. 1989. Effects of source and level of copper on performance and liver copper stores in weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 67:2996-3002.
- Cruz, G. M. I., M. D. I. Sánchez, C. J. López, X. J. A. Munguia, B. R. M. Molina, A. F. Rivera, Ch. J. F. Hernández, 2014. Caracterización del perfil de ácidos grasos en carne de borrego de engorda utilizando cromatografía de gases. *Nacameh.* 8:39-49.
- 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.
- Diwa, E. Ch. 2019. Copper from copper hydroxychloride in diets for growing pigs increases feed efficiency, improves energy utilization and changes intestinal microbial activity. Thesis Doctor of Philosophy in Animal Sciences. University of Illinois. Urbana-Champaign, Illinois. USA.
- Dove, C. R. 1993. The effect of adding copper and various fat sources to the diets of weanling swine on growth performance and serum fatty acid profiles. *Journal of Animal Science.* 71:2187-2192.
- Dransfield, E., G. R. Nute, B. W. Hogg, and B. R. Walters. 1990. Carcass and eating quality of ram, castrated ram and ewe lambs. *Anim. Prod.* 50:291-299.
- Drew, M. D., T. L. Borgeson, and D. L. Thiessen. 2007. A review of processing of feed ingredients to enhance diet digestibility in finfish. *Anim. Feed Sci. Technol.* 138:118-136.
- Dreyer, J. H., R. T. Naude, J. W. N. Henning, and E. Rossouw. 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.
- Duckett, S. K., D. D. Snowden, and N. E. Cockett. 2000. Effect of the callipyge gene on muscle growth, calpastatin activity, and tenderness of three muscles across the growth curve. *J. of Anim. Sci.* 78:2836-2841.

- Engle, T. E., J. W. Spears, T. A. Armstrong, C. L. Wright, and J. Odle. 2000. Effects of dietary copper source and concentration on carcass characteristics and lipid and cholesterol metabolism in growing and finishing steers. *J. Anim. Sci.* 78:1053-1059.
- Enser, M., K. Hallett, B. Hewelt, G. A. Fursey, and D. J. Wood. 1996. Fatty acid content and composition of English beef, lamb and pork at retail. *Meat Sci.* 42:443-456.
- Essén-Gustavsson, B., K. Karlstrom, and K. Lundstrom. 1992. Muscle fibre characteristics and metabolic response at slaughter in pigs of different halothane genotypes and their relation to meat quality. *J. of Anim. Sci.* 86:3290-3299.
- FAO. 2013. Producción y sanidad animal. Carne y productos cárnicos. Recuperado de http://www.fao.org/ag/againfo/hemes/fr/meat/backgr_composition.html.
- Fiedler, I., U. Kuchenmeister, K. Ender, M. Wicke, and G. Lengerken. 1994. Fiber-type characteristics and meat quality in longissimus muscle of normal and halothane sensitive pigs. *Journal of Muscle Res. and Cell Motility.* 15:187-188.
- Forrest, J. C., E. D. Aberle, H. B. Hedrick, M. B. Judge, R. A. Merkel. 1979. Propiedades de la carne. En: *Fundamentos de ciencia de la carne*. Ed. Acribia. Zaragoza, España. pp. 364.
- Gaetke, L. M., and C. K. Chow. 2003. Copper toxicity, oxidative stress, and antioxidant nutrients. *Toxicology.* 189:147-163.
- 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.
- Garrido M. D., S. Bañón, and D. Álvarez. 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. INIA. pp. 206-215.
- Georgopoulos, P. G., A. Roy, R. E. Opiekun, P. J. Lioy, and M. J. Yonone-Lioy. 2002. *Environmental Dynamics and Human Exposure to Copper. Vol. 1, Environmental Dynamics and Human Exposure Issues.* New York. International Copper Association.
- Giese, J. 1995. Measuring physical properties of foods. *Food Technol.* 49:54-63.
- Gil, M., X. Serra, M. Gispert, M. A. Oliver, C. Sañudo, B. Panea, J. L. Olleta, M. Campo, M. Olivám, K. Osor, M. D. García-Cachán, R. Cruz-Sagredo, M. Izquierdo, M. Espejo, and J. Piedrafita. 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 Science*. 5:181-184.
- Goff, J. P. 2015. Minerals, bones, and joints. In: W. O. Reece, editor, *Duke's physiology of domestic animals*. John Wiley and Sons, Inc., Oxford, U. K. p. 581-583.
- Gooneratne, S. R., W. T. Buckley, and D. R. Christensen. 1989. Review of copper deficiency and metabolism in ruminants. *Can. J. Anim. Sci.* 69:819-845.
- Grobner, M. A., P. R. Cheeke, and N. M. Patton. 1986. Effect of dietary copper and oxytetracycline on growth and mortality of weanling rabbits. *J. Appl. Rabbit Res.* 9:46-53.
- Guerrero, L. I., A. E. Ponce, y Pérez, M. L. 2002. *Curso práctico de tecnología de carnes y pescado*. Universidad Metropolitana. Unidad Iztapalapa. D.F. México. p.171.
- Hambridge, K. M., C. E. Casey, and N. F. Krebs. 1986. Zinc. In: W. Mertz, editor, *Trace elements in human and animal nutrition*. Academic Press, New York, NY. p. 1-138.
- 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.
- Hansen, S. L., A. J. Moeser, H. C. Liu, N. Trakooljul, and J. W. Spears. 2009. Iron transporters are differentially regulated by dietary iron, and modifications are associated with changes in manganese metabolism in young pigs. *J. Nutr.* 139:1474-1479.
- Harris, E. D. 1997. Copper. In: *Handbook of Nutritional Essential Mineral Elements*, B.L. O'Dell and R.A. Sunde, eds. Marcel Dekker. New York, USA. Pp. 231-273.
- Hastad, C.W., Dritz, S.S., Nelssen, J.L., Tokach, M.D., and Goodband, R.D. 2001. Evaluation of different copper sources as a growth promoter in swine finishing diets. *Kansas Agric. Exp. Sta.*
- Hedges, J. D., and E. T. Kornegay. 1973. Interrelationship of dietary copper and iron as measured by blood parameters, tissue stores and feedlot performance of swine. *J. Anim. Sci.* 37:1147-1154.
- Heinze, P. H., M. C. Smitt, R. T. Naude, and R. L. Boccadr. 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., R. G. Cassens, G. G. Suess, V. H. Brungardt, and E. J. Briskey. 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.
- Hill, F. 1966. The solubility of intramuscular collagen in meat animals of various ages. *J. Food Sci.* 31:161-166.
- Hill, G. M., G. J. Brewer, N. D. Hogikyan, and M. A. Stellini. 1984. The effect of depot parenteral zinc on copper metabolism in the rat. *J. Nutr.* 114:2283-2291. doi:10.1093/jn/114.12.2283.
- Hill, G.M., and Spears, J.W. 2001. Trace and ultratrace elements in swine nutrition. In: Lewis AJ, Southern LL, Eds. *Swine Nutrition*. 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press. 1:229-261.
- Hill, G.M., G.L., Cromwell, T.D. Crenshaw, C.R. Dove, R.C. Ewan, D.A. Knabe, A.J. Lewis, G.W. Libal, D.C. Mahan, G.C. Shurson, L.L. Southern, and T.L. Veum. 2000. Growth promotion effects and plasma changes from feeding high dietary concentrations of zinc and copper to weanling pigs. *J. of Anim. Sci.* 78: 1010-1018.
- Hoffmann, K. 1990. Definition and measurement of meat quality. Proc. 36th ICoMST. La Habana, Cuba. pp. 941-954.
- Holownia, K., M. S. Chinnan, A. E. Reynolds, and P. E. Koehler. 2003. Evaluation on induced color changes in chicken breast during simulation of pink color defects. *Poultry Science.* 82:1049-1059.
- Honikel, K. O. 1998. Reference Methods for the assessment of physical characteristics of meat. *Meat Science* 49:447-457.
- Howell, J. M., and S. R. Gooneratne. 1987. The pathology of copper toxicity in animals. In: *Copper in Animals and Man*. Vol. II, J. M. Howell and J. M. Gawthorne. (Eds.). Boca Raton, FL. CRC Press.
- Hyun, C., and L. J. Philippich. 2004. Inherited copper toxicosis with emphasis on copper toxicosis in Bedlington terriers. *J. Exp. Anim. Sci.* 43:39-64.
- Izquierdo, O. A., and D. H. Baker. 1986. Bioavailability of copper in pig feces. *Can. J. Anim. Sci.* 66:1145-1148.
- Jackson, N., and M. H. Stevenson. 1981. A study of the effects of dietary added cupric oxide on the laying, domestic fowl and a comparison with the effects of hydrated copper sulfate.

- Br. J. Nutr. 45:99-110.
- Justel, F. J., M. Claros, and M. E. Taboada. 2015. Solubilities and properties of saturated solutions in the copper sulfate + sulfuric acid + seawater system at different temperatures. *Braz. J. Chem. Eng.* 32:629-635.
- Kamunde, C. N., M. Grosell, J. N. A. Lott, and C. M. Wood. 2001. Copper metabolism and gut morphology in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during chronic sublethal dietary copper exposure. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 58:293-305.
- Karlsson, A. H., R. E. Klont, and X. Fernandez. 1999. Skeletal muscle fibers factors for pork quality. *Livestock Prod. Sci.* 60:255-269.
- Karlsson, A., A. C. Enfalt, B. Essen-Gustavsson, K. Lundstrom, I. Rydhmer, and S. Stern. 1993. Muscle histochemical and biochemical-properties in relation to meat quality during selection for increased lean tissue-growth rate in pigs. *J. of Anim. Sci.* 71:930-938.
- Kegley, E. B., and J. W. Spears. 1994. Bioavailability of feed-grade copper sources (oxide, sulfate, or lysine) in growing cattle. *J. Anim. Sci.* 72:2728-2734.
- Klont, R. E., L. Brocks, and G. Eikelenboom. 1998. Muscle fiber type and meat quality. *Meat Sci.* 49: Suppl I S219-S229.
- Kong, C., C. S. Park, and B. G. Kim. 2015. Effects of an enzyme complex on in vitro dry matter digestibility of feed ingredients for pigs. *Springerplus.* 4:261.
- Konjufca, V.H., Pesti, G.M., and Bakalli, R.I. 1997. Modulation of cholesterol levels in broiler meat by dietary garlic and copper. *Poult. Sci.* 76:1264-1271.
- Koohmaraie, M. 1992. Muscle proteinases and meat aging. In 38th International Congress of Meat Science and Technology. Clermont-Ferrand. France. Proc. 1:61.
- Kramer, A. 1994. Use of color measurements in quality control of food. *Food Technol.* 48:63-71.
- Krishnamoorthy, L., Cotruvo, Jr. J. A., Chan, J., Kaluarachchi, H., Muchenditsi, A., Pendyala, V.S., Jia, S., Aron, A. T., Ackerman, C. M., Vander, W. M. N., Guan, T., Smaga, L. P., Farhi, S. L., New, E. J., Lutsenko, S., and Chang, C. J. 2016. Copper regulates cyclic-AMP-dependent lipolysis. *Nature Chemical Biology.* 12: 586-592.
- Larzul, C., L. Lefacheur, P. Ecolan, J. Gogué, A. Talmant, P. Sellier, P. Le Roy, and G. Monin. 1997. Phenotypic and genetic parameters for longissimus muscle fiber characteristics in relation to growth, carcass, and meat quality traits in Large White Pigs. *J. Anim. Sci.*

75:3126-3137.

- Lawrie, R. A. 1998. Composición química y bioquímica del músculo. En: Ciencia de la carne. Ed. Acribia S.A. Zaragoza, España. pp. 67-109.
- Lebel, A., J. J. Matte, and F. Guay. 2014. Effect of mineral source and mannan oligosaccharide supplements on zinc and copper digestibility in growing pigs. *Arch. Anim. Nutr.* 68:370-384. doi:10.1080/1745039X.2014.954357.
- Lebret, B., L. Lefaucheur, J. and Mouro. 1999. La qualité de la viande de porc. Influence des facteurs d' élevage non génétiques sur les caractéristiques du tissu musculaire. *INRA Prod. Anim.* 22:11-28.
- Lefaucheur, L. 1989. Les différents types de fibres musculaires chez le porc. *INRA. Prod. Anim.* (Francia). 2:205-213.
- Lemus, F. C., A. A. Mejía, C. L. Meza, y G. G. Salazar. 2002. Perfil de ácidos grasos de la grasa dorsal en las cruzas de CPM con razas comerciales. *Memorias de la VI Reunión de Investigación Científica, Nayarit, México.*
- Linder, M. C. 2002. Biochemistry and molecular biology of copper in mammals. Pp. 3–32 in *Handbook of Copper Pharmacology and Toxicology*, E. J. Massaro, ed. Totowa, NJ: Humana Press.
- Linschneer, W. G., and A. J. Vergroesen. 1988. Lipid digestion and metabolism. In: *Modern Nutrition in Health and Disease*. V. Young y M. Shills (Eds.). Lea and Fediger, Philadelphia.
- Lister, D. 1980. Hormones, metabolism and growth. *Reprod. Nutr. Develop.* 20: 225-233.
- Liu, Y., Y. L. Ma, J. M. Zhao, M. Vazquez-Añón, and H. H. Stein. 2014. Digestibility and retention of zinc, copper, manganese, iron, calcium, and phosphorus in pigs fed diets containing inorganic or organic minerals. *J. Anim. Sci.* 92:3407-3415.
- Liu, Z., M. M. Bryant, and S. D. A. Roland. 2005. Layer performance and phytase retention as influenced by copper sulfate pentahydrate and tribasic copper chloride. *J. Appl. Poult. Res.* 14:499-505.
- Lo, G. S., S. L. Settle, and F. H. Steinke. 1984. Bioavailability of copper in isolated soybean protein using the rat as an experimental model. *J. Nutr.* 114:332-340.
- Lønnerdal, B., J. Bell, and C. Keen. 1985. Copper absorption from human milk, cow's milk, and

- infant formulas using a suckling rat model. *Am. J. Clin. Nutr.* 42:836-844.
- MacPherson, A., E. M. Milne, and A. J. MacPherson. 1997. Copper poisoning in ewes. *Vet. Rec.* 141:631.
- Mahan, D.C., T.R. Clint, and B. Richert. 1999. Effects of dietary levels of selenium-enriched yeast and sodium selenite as selenium sources fed to growing-finishing pigs on performance, tissue selenium, serum glutathione peroxidase activity, carcass characteristics, and loin quality. *Journal of Animal Science.* 77:2172-2179.
- Maltin, C. A., C. C. Warkup, K. R. Matthews, C. M. Grant, A. D. Porter, and M. I. Delday. 1997. Pig muscle characteristics as a source of variation in eating quality. *Meat Sci.* 47:237-248.
- Manto, M. 2014. Abnormal copper homeostasis: Mechanisms and roles in neurodegeneration. *Toxics.* 2:327-345.
- Martin, C. J., and W. J. Evans. 1986. Phytic acid: divalent cation interactions: III. A calorimetric and titrimetric study of the pH dependence of copper(II) binding. *J. Inorg. Biochem.* 28:39-55.
- McDowell, L. R. 1992. Copper and molybdenum. In: T. J. Cunha, editor, *Minerals in animal and human nutrition.* Academic Press Inc., San Diego, CA. p. 176-202.
- Miller, E. R., H. D. Stowe, P. K. Ku, and G. M. Hill. 1979. Copper and zinc in swine nutrition. In: *Natural Feed Ingredients Association Literature Review on copper and zinc in animal nutrition.* Wes Des Moines, IA. Natural Feed Ingredients Association.
- Milligan, D., and H. Moyer. 1975. Crystallization in the copper sulphate- sulphuric acid- water system. *Eng. Min. J.* 176:85-89.
- Mills, C. F., and I. Bremner. 1980. Nutritional aspects of molybdenum in animals. In: *Molybdenum and Molybdenum Containing Enzymes,* M. Coughlan. Ed. New York. Pergamon Press.
- Minson, D. J. 1990. *Forage in Ruminant Nutrition.* New York: Academic Press.
- Moreno-Camarena, L. 2015. Evaluación de la respuesta productiva, metabólica, de la calidad de la canal y de la carne de ovinos suplementados con cromo orgánico. Tesis de Doctorado. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Autónoma del Estado de México. 183p.
- Murray, A. C. 1989. Factors affecting beef colour at time of grading. *Can. J. Anim. Sci.* 69, 347-

355.

- Murray, R., Mayes, P., Granner, D., and Rodwell, V. 1997. *Bioquímica de Harper*. Ed. Manual moderno. México. pp.65-76.
- Nielsen, F. H. 1984. Ultratrace elements in nutrition. *Annu. Rev. Nutr.* 4:21-41. doi:10.1146/annurev.nutr.4.1.21.
- Norman, J. L., E. P. Berg, H. Hetmann, and Lorenzen. 2003. Pork loin relative to sensory and instrumental tenderness and consumer acceptance. *Meat Sci.* 65:927-933.
- NRC (National Research Council). 1980. *Mineral Tolerance of Domestic Animals*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- NRC. 2005. *Mineral tolerance of animals*. Second revised edition. National Research Council of de National Academies. The National Academies Press. Washington, D.C. USA. 495p.
- NRC. 2012. *Nutrient Requirements of Swine: Eleven Revised Edition*, Subcommittee on Swine Nutrition, Committee on Animal Nutrition, National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C., USA. 400p.
- O'Dell, B. L. 2000. Role of zinc in plasma membrane function. *J. Nutr.* 5:1432S-1436S. doi:10.1093/jn/130.5.1432s.
- Offer, G., and P. Knight. 1988. The structural basis of water-holding in meat; Part 2: Drip Losses. In: *Developments in Meat Science 4*, Ed. R. Lawrie, p. 173-241. Elsevier, Oxford.
- Olivas, J. A., L. M. Díaz-Tenorio, J. Munguía-Xóchihua¹, R. M. Molina-Barrios, J. F. Hernández-Chávez. 2017. Indicadores de calidad en carne de cerdo de diferentes centros comerciales de Ciudad Obregón, Sonora Quality indicators in pork meat from different commercial center of Ciudad Obregón, Sonora (México). *Nacameh.* 11:50-57.
- Oliver M. A., M. Gispert, J. Tibau, and A. Diestre. 1991. The measurement of light scattering and electrical conductivity for the prediction of pig meat at various times postmortem. *Meat Science.* 29:141-151.
- Ondřej, B., K. Vavrišínová, J. Petrák, O. Debrecéni, and D. Hellová. 2013. The analysis of pork quality affected by diet containing organic chromium. *Acta Fytotechnica et Zootechnia.* 16:19-24.
- Pang, Y., and T. J. Applegate. 2006. Effects of copper source and concentration on in vitro phytate phosphorus hydrolysis by phytase. *J. Agric. Food Chem.* 54:1792-1796.

- Pang, Y., and T. J. Applegate. 2007. Effects of dietary copper supplementation and copper source on digesta pH, calcium, zinc, and copper complex size in the gastrointestinal tract of the broiler chicken. *Poult. Sci.* 86:531-537.
- Park, C. S., and B. G. Kim. 2016. In vitro solubility of copper (II) sulfate and dicopper chloride trihydroxide for pigs. *Asian Australas. J. Anim. Sci.* 29:1608-1615.
- Payne, C. G., D. C. Martens, E. T. Kornegay, and M. D. Lindemann. 1988. Availability and form of copper in three soils following eight annual applications of copper-enriched swine manure. *J. Environ. Qual.* 17:740-746.
- Pearson, A. M., and R. B. 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.
- Pearson, A. M., J. D. Love, and F. B. Shorland. 1977. Warmed-over flavor in meat, poultry and fish. *Adv. Food Res.* 23:1.
- Pena, M. M., J. Lee, and D. J. Thiele. 1999. A delicate balance: homeostatic control of copper uptake and distribution. *J. Nutr.* 129:1251-1260.
- Perez, V. G., A. M. Waguespack, T. D. Bidner, L. L. Southern, T. M. Fakler, T. L. Ward, M. Steidinger, and J. E. Pettigrew. 2011. Additivity of effects from dietary copper and zinc on growth performance and fecal microbiota of pigs after weaning. *J. Anim. Sci.* 89:414-425. d
- Perez-Alvarez, J. A., J. Fernandez-Lopez, M. E. Sayas-Barberá, y R. Cartagenagracia. 1998. Caracterización de los parámetros de color de diferentes materias primas usadas en la industria cárnica. *Eurocarne.* 63:115-122.
- Pesti, G. M., and R. I. Bakalli. 1996. Studies on the feeding of cupric sulfate pentahydrate and cupric citrate to broiler chickens. *Poult. Sci.* 75:1086-1091.
- Pette, D. and R. S. Staron. 1990. Cellular and molecular diversities of mammalian skeletal muscle fibres. *Reviews in Physiology. Biochemistry and Pharmacology.* 116:2-76.
- Pettigrew, J.E., and Esnaola, M.A. 2001. Swine nutrition and pork quality: A review. *Journal of Animal Science.* 2001. 79(E-Suppl.): E316-E342.
- Poto, A., B. Peinado, y F. Gil, 2004. El Chato Murciano. Materia prima de calidad (y II). *Mundo Ganadero.* 162:50-56.

- Powell, J. J., M. W. Whitehead, C. C. Ainley, M. D. Kendall, J. K. Nicholson, and R. P. H. Thompson. 1999. Dietary minerals in the gastrointestinal tract: hydroxypolymerisation of aluminium is regulated by luminal mucins. *J. Inorg. Biochem.* 75:167-180.
- Prince, T. J., V. W. Hays, and G. L. Cromwell. 1984. Interactive effects of dietary calcium, phosphorus and copper on performance and liver copper storage of pig. *J. of Anim. Sci.* 58:356-361.
- 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., Z. L. Carpenter, and G. E. Smith. 1976. Age-related traits affecting the tenderness of the bovine longissimus muscle. *J. Anim. Sci.* 43:1198.
- Richards, J. D., J. Zhao, R. J. Harrell, C. A. Atwell, and J. J. Dibner. 2010. Trace mineral nutrition in poultry and swine. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 23:1527-1534.
- Robbins, K. R., and D. H. Baker. 1980. Effect of sulfur amino acid level and source on the performance of chicks fed high levels of copper. *Poult. Sci.* 59:1246-1253.
- Rubio, M. S., E. J. Delgado, F. A. Iturbe, R. D. Méndez, L. Cassís, R. Rosiles. 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.
- Ruusunen, M. 1996. Composition and cross sectional area of muscle fiber types in relation to daily gain and fat content of carcass in Landrace and Yorkshire pigs. *Agric. and Food Sci.* 5:593-600.
- Ryu, Y. C., and B. C. Kim. 2005. The relationship between muscle fiber characteristics, postmortem metabolic rate, and meat quality of pig longissimus dorsi muscle. *Meat Sci.* 71:351-357.
- Ryu, Y. C., M. H. Lee, S. K. Lee, and B. C. Kim. 2006. Effect of muscle mass and fiber type composition of longissimus dorsi muscle on postmortem metabolic rate and meat quality in pigs. *Journal of Muscle Foods.* 17:343-353.

- Santos, S. J., R. J. N. Bessa, and S. F. Santos. 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. 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.
- Sargison, N. D., and P. R. Scott. 1996. The diagnosis and treatment of chronic copper poisoning in 4- to 12-week-old single-suckled calves. *Agri-Practice* 17:36-40.
- 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.
- Saylor, W. W., and R. M. Leach. 1980. Intracellular distribution of copper and zinc in sheep: effect of age and dietary levels of the metals. *J. Nutr.* 110:448-459.
- Saylor, W. W., F. D. Morrow, and R. M. Leach. 1980. Copper- and zinc binding proteins in sheep liver and intestine: effect of dietary levels of the metals. *J. Nutr.* 110:460-468.
- Sayre, R. N., and E. J. Briskey. 1963. Protein solubility as influenced by physiological conditions in the muscle. *J. Food Sci.* 28:675.
- Schiavon, S., Bailoni, L., Ramanzin, M., Vincenzi, R., Simonetto, A., and Bittante, G. 2000. Effect of proteinate or sulphate mineral sources on trace elements in blood and liver of piglets. *Animal Science.* 71:131-139.
- Serra, X., F. Gil, M. Perez-Enciso, M. A. Oliver, J. M. Vazquez, M. Gispert, I. Díaz, F. Moreno, R. Latorre, and J. L. Noguera. 1998. A comparison of carcass, meat quality and histochemical characteristics of Iberian (Guadyerbass line) and Landrace pigs. *Livest. Prod. Sci.* 56:215-223.
- Shackelford, S. D., M. Koomaraie, G. Whipple, M. Wheeler, M. F. Miller, J. D. Crouse, and J. O. Reagan. 1991. Predictors of beef tenderness: development and verification. *J. Food Sci.* 56:1130.
- Shelton, N. W., M. D. Tokach, J. L. Nelssen, R. D. Goodband, S. S. Dritz, J. M. DeRouche, G. M. Hill, R. G. Amachawadi, and T. G. Nagaraja. 2009. Effects of copper sulfate and zinc oxide on weanling pig growth and plasma mineral levels. In: *Swine Day*, Kansas State

University. p. 65-71.

- Sierra, I., C. Sañudo, J. L. Olleta, and F. Forcada. 1988. 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.
- Smith, J. D., R. M. Jordan, and M. L. Nelson. 1975. Tolerance of ponies to high levels of dietary copper. *J. Anim. Sci.* 41:1645-1649.
- Smulders, F. J. M., B. B. Marsch, D. R. Swartz, R. L. Rusell, and M. E. Hoenecke. 1990. Beef tenderness and sarcomere length. *Meat Sci.* 28:349.
- Solomon, M. B., G. P. Lynch, and D. S. Lough. 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.
- Spears, J. W. 2003. Trace mineral bioavailability in ruminants. *J. Nutr.* 133:1506S-1509S.
- Spears, J. W., E. B. Kegley, and L. A. Mullis. 2004. Bioavailability of copper from tribasic copper chloride and copper sulfate in growing cattle. *Anim. Feed Sci. Technol.* 116:1-13.
- Stenn, K. S., J. A. Madri, and F. G. Roll. 1979. Migrating epidermis produces ABZ collagen and requires continual synthesis for movement. *Nature.* 277:229.
- Suttle, N. F. 1974. Effects of organic and inorganic sulfur on the availability of dietary copper to sheep. *Br. J. Nutr.* 32:559-568.
- Suttle, N. F. 1991. The interactions between copper, molybdenum, and sulfur in ruminant nutrition. *Annu. Rev. Nutr.* 11:121-140.
- Suttle, N. F. 2007. A technique for measuring the biological availability of copper of sheep, single hypocupraemic ewes. *Br. J. Nutr.* 32:395-405.

- Suttle, N. F. 2010. Mineral nutrition of livestock. 4th ed. CABI Publishing, Oxfordshire, UK.
- Suttle, N. F., and J. Price. 1976. The potential toxicity of copper-rich animal excreta to sheep. *Anim. Prod.* 23:233-241.
- Suttle, N. F., P. Abrahams, and I. Thornton. 2009. The role of a soil \times dietary sulphur interaction in the impairment of copper absorption by ingested soil in sheep. *J. Agric. Sci.* 103:81-86.
- Swann, D. A., J. B. Caufield, and J. B. Broadhurst. 1976. The altered fibrous form of vitreous collagen following solubilization with pepsin. *Biochem. Biophys. Acta.* 427:365.
- Taylor, R. G. 2004. Muscle fibre types and meat quality. In: *Encyclopedia of Meat Science*. Editor-in-Chief: Werner Klith Jensen, Oxford. Pp. 618-623.
- Thompson, E. H., C. E. Allen, and R. J. Meade. 1973. Influence of copper on stearic acid desaturation and fatty acid composition in the pig. *J. Anim. Sci.* 36:868-873.
- Tokarnia, C. H., J. Dobereiner, P. V. Peixoto, and S. S. Moraes. 2000. Outbreak of copper poisoning in cattle fed poultry litter. *Vet. Human Toxicol.* 42:92-95.
- 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., P. E. Strydom, E. C. Webb, H. L. D. Kocka. 2003. Meat quality of designated South African indigenous goat and sheep breeds. *Meat Science.* 65:563-570.
- Underwood, E. J. 1977. *Trace Elements in Human and Animal Nutrition*, 4th ed. New York. Academic Press.
- Underwood, E. J. 1981. *The mineral nutrition of livestock*. 2nd ed. Commonwealth Agricultural Bureaux, Slough, UK.
- Underwood, E. J., and N. F. Suttle. 1999. *The mineral nutrition of livestock*. 3rd ed. CABI Publishing, Oxfordshire, UK.
- USGS (U.S. Geological Survey). 2004. *Mineral Commodity Summaries*. Available at <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper>.
- Van Hoof, J. 1981. Objective methods for texture evaluation of poultry meat. In *Proc. XI EUR. Symp. On the Quality of Poultry Meat*. Appeldoorn, the Netherlands. pp. 165-179.
- Velásco, S., V. Cañeque, C. Pérez, S. Lauzurica, M.T. Díaz, F. Huidobro, and J. González. 2001. Fatty acid composition of adipose depot of suckling lambs raised under different production system. *Meat Sci.* 59:325-333.

- Viarengo, A., B. Burlando, and C. Bolognesi. 2002. Cellular responses to copper in aquatic organisms. In: Handbook of Copper Pharmacology and Toxicology, E. J. Massaro. Ed. Totowa, NJ. Humana Press.
- Wada, K., K. Shirai, and A. Kawamura. 1980. Properties of collagens from pigskins of different ages. *J. Am. Leather Chem. Assoc.* 75:90.
- Wang, J., S. R. Rogers, and G. M. Pesti. 1987. Influence of choline and sulfate on copper and toxicity and substitution of an antagonism between methionine and copper supplements to chick diets. *Poult. Sci.* 66:1500-1507.
- Wapnir, R. 1998. Copper absorption and bioavailability. *American Journal Clinic Nutrition.* 67:1054S-60.
- Ward, J. D., J. W. Spears, and E. B. Kegley. 1996. Bioavailability of copper proteinate and copper carbonate relative to copper sulfate in cattle. *J. Dairy Sci.* 79:127-132.
- Warris, P.D., S. N. Brown, and S. J. M. Adams. 1990. Variation in heam pigment concentration and color in meat from British pigs. *Meat Sci.* 28:321-329.
- WHO (World Health Organization). 1998. Copper. Environmental Health Criteria 200. Geneva. World Health Organization.
- Wideman, R. F., Jr., Y. K. Kirby, T. L. Barton, D. Clark, G. R. Bayyari, W. E. Huff, P. A. Moore, and P. A. Dunn. 1996. Excess dietary copper triggers enlargement of the proventriculus in broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 5:219-230.
- Windisch, W. M., G. G. Gotterbarm, and F. X. Roth. 2001. Effect of potassium diformate in combination with different amounts and sources of excessive dietary copper on production performance in weaning piglets. *Arch. Anim. Nutr.* 54:87-100.
- Wood, J. D., G. R. Nute, R. I. Richardson, F. M. Whittington, O. Southwood, G. Plastow, R. Mansbridge, N. K. Da Costa, C. N. Chang. 2004. Effects of breed, diet and 16 muscles on fat deposition and eating quality in pigs. *Meat Sci.* 67:651-667.
- Yu, S., C. E. West, and A. C. Beynen. 1994. Increasing intakes of iron reduces status, absorption and biliary excretion of copper in rats. *Br. J. Nutr.* 71:887-895.
- Zervas, G., E. Nikolaou, and A. Mantzios. 1990. Comparative study of chronic copper poisoning in lambs and young goats. *Anim. Prod.* 50:497-506.
- Zhao, J., G. Allee, G. Gerlemann, L. Ma, M. I. Gracia, D. Parker, M. Vazquez-Anon, and R. J.

Harrell. 2014. Effects of a chelated copper as growth promoter on performance and carcass traits in pigs. *Asian Australas. J. Anim. Sci.* 27:965-973.

3. CAPÍTULO III. ARTÍCULO CIENTÍFICO 1. EFECTO DE LA INCLUSIÓN DE PROTEINATO DE COBRE EN LA DIETA SOBRE EL COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO, CARACTERÍSTICAS DE LA CANAL Y CALIDAD DE LA CARNE DE CERDOS EN FINALIZACIÓN

3.1 RESUMEN

El objetivo fue evaluar el efecto de incluir 0, 75, 150 y 225 mg Cu kg⁻¹ MS de proteinato de cobre (P-Cu) en el alimento sobre el crecimiento, las características de la canal y la calidad de carne de cerdos para abasto. Se emplearon 24 porcinos (12 hembras y 12 machos), peso inicial 60.3±0.55 kg, alimentados con dieta basal (DB) durante 46 días, distribuidos en un diseño completamente aleatorizado, factorial 4x2 (niveles de P-Cu y sexo): T1=DB (0 mg de P-Cu kg⁻¹ MS), T2=DB+75 mg de P-Cu, T3=DB+150 mg de P-Cu y T4=DB+225 mg de P-Cu. La dosis de 225 mg de P-Cu aumentó la ganancia de peso (GDP) y la eficiencia alimenticia (EFA) ($P<0.05$). El P-Cu aumentó el área de chuleta (ACH) en hembras y redujo la grasa dorsal (GD) en machos ($P<0.05$). El P-Cu aumentó (12.6%) el rendimiento de cortes primarios (RCP) ($P<0.05$). En los tratamientos 3 y 4 se redujo la pérdida de agua 58.5 y 82.2% ($P<0.05$). El P-Cu afectó ($P<0.01$) el pH final y el índice a* ($P<0.05$) del músculo *Longissimus thoracis*. En conclusión, el P-Cu mejoró la GDP, la EFA, el ACH y el RCP, y redujo la GD en la canal.

Palabras clave: Proteinato de Cobre, Porcinos, Características de Canal, Calidad de carne.

3.2 SUMMARY

The objective was to evaluate the effect of including 0, 75, 150 and 225 mg Cu kg⁻¹ MS of copper proteininate (P-Cu) in the feed on growth, carcass characteristics and meat quality of pigs for market. Twenty-four pigs (12 females and 12 males) were used, initial weight 60.3±0.55 kg, fed with basal diet (BD) during 46 days, distributed in a completely randomized design, factorial 4x2 (levels of P-Cu and sex): T1=DB (0 mg of P-Cu kg⁻¹ MS), T2=DB+75 mg of P-Cu, T3=DB+150 mg of P-Cu and T4=DB+225 mg of P-Cu. The dose of 225 mg of P-Cu increased the daily weight gain (DWG) and the food efficiency (FE) ($P<0.05$). The P-Cu increased the area of chop (CHA) in females and reduced the dorsal fat (DF) in males ($P<0.05$). The P-Cu increased (12.6%) the yield of primary cuts (YPC) ($P<0.05$). In treatments 3 and 4 the water loss was

reduced 58.5 and 82.2% ($P<0.05$). The P-Cu affected ($P<0.01$) the final pH and the a^* index ($P<0.05$) of the *Longissimus thoracis* muscle. In conclusion, the P-Cu improved the DWG, the FE, the CHA and the YPC, and reduced the DF in the carcass.

Key words: Copper proteinate, Pigs, Carcass traits, Meat quality.

3.3 INTRODUCCIÓN

El Cobre es un elemento importante en muchos procesos fisiológicos por que interviene en la regeneración de células dañadas por radicales libres, actúa en la síntesis de hemoglobina, elastina, mielina y colágeno. En general, concentraciones de 5 a 25 mg de Cu kg^{-1} MS en la dieta cubren los requerimientos de cerdos para estos procesos (NRC, 2012). Sin embargo, cuando se suministran cantidades mayores (100 a 250 mg de Cu kg^{-1} MS) este micromineral mejora el crecimiento de los cerdos (Cromwell *et al.*, 1989; Dove, 1993; Hill *et al.*, 2000; Hill and Spears, 2001), reduce la grasa en la canal y aumenta el contenido de ácidos grasos insaturados en la carne (Amer y Elliot, 1973; Pettigrew y Esnaola, 2001); no obstante, la respuesta disminuye con la edad y con el suministro durante períodos prolongados de tiempo (Hastad *et al.*, 2001). Por otro lado, la absorción del Cu en el intestino es baja y varía dependiendo de la fuente (inorgánico u orgánico), el Cu inorgánico se absorbe poco, de 0.5 a 4.0% (Wapnir, 1998); mientras que el Cu orgánico tiene una mayor absorción y retención tisular. En este sentido, el proteinato de cobre es un quelato orgánico que resulta de la unión de una sal de cobre soluble con aminoácidos. Esto lo hace más biodisponible y bioactivo reduciendo su eliminación hacia el ambiente (Murray *et al.*, 1997; Sciavon *et al.*, 2000). Son pocos los estudios que han evaluado el efecto de dosis altas de Cu orgánico sobre la respuesta en el crecimiento y la calidad de la carne de cerdos para el abasto, por lo que el objetivo del presente estudio fue evaluar la eficiencia en el crecimiento, las características de la canal y la calidad de la carne de cerdos en finalización suplementados con proteinato de Cu en la dieta.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

El Comité de Bioética y Bienestar Animal de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma del Estado de México revisó y aprobó el estudio, el cual se realizó en la Unidad Experimental en Producción Animal de la misma Institución, localizada

en el Campus Universitario “El Cerrillo”, Toluca, México. Los procedimientos de manejo de los cerdos se realizaron según los lineamientos oficiales para el cuidado de los animales en México (SAGARPA, 1995); cuidado humanitario del animal durante la movilización (SAGARPA, 2014), sacrificio de animales domésticos y silvestres.

Animales, manejo y tratamientos

Un total de 24 cerdos (12 hembras y 12 machos castrados) F1 Landrace X Duroc, con 60.3 ± 0.55 kg PV y 120 ± 4 días de edad fueron alojados en corraletas de piso elevado, con dimensiones de 1.5x2 m, equipados con bebedero y comedero automáticos. El periodo experimental duró 61 días, de los cuales 15 se consideraron para la adaptación a una dieta basal que cubrió los requerimientos nutricionales (NRC, 2012) (Cuadro 1) y 46 fueron de evaluación. Previo al inicio el estudio, los cerdos fueron vitaminados con 1 ml de vitaminas A, D y E (Vigantol; Bayer, México) y desparasitados con 0.5 mL de Ivermectina (laboratorio Sanfer, México). Los cerdos fueron pesados de forma individual y asignados al azar a los tratamientos, bajo un diseño experimental completamente aleatorizado, factorial 4x2 (4 niveles de P-Cu y machos y hembras). Los tratamientos fueron: T1=DB (0 mg proteinato de Cu (P-Cu) kg^{-1} MS), T2=DB+75 mg P-Cu kg^{-1} MS, T3=DB+125 mg P-Cu kg^{-1} MS, T4=DB+225 mg P-Cu kg^{-1} MS. El P-Cu se suministró diariamente a través de la premezcla (Bioplex Cu, Alltech, Inc., Nicholasville, KY[®]) que contiene 1000 mg de Cu kg^{-1} , dispersada con la técnica “top dressing”, extendiendo el producto sobre el alimento para asegurar su consumo de la dosis diaria.

Comportamiento animal

La dieta se suministró a libre acceso, pesando y registrando el alimento ofrecido y rechazado diariamente para calcular el consumo de materia seca (CMS). Se colectaron muestras de alimento dos veces por semana, cada muestra se secó en estufa de aire forzado a 60 °C durante 24 h para analizar su composición química: MS, cenizas, extracto etéreo, proteína cruda y fibra cruda (métodos con números 930.15, 942.05, 945.16, 984.13 y 962.09 de la AOAC (2007); así como el contenido de Ca, Cu, Zn y Fe, por espectrofotometría de absorción atómica (Fick *et al.*, 1979). Los cerdos se pesaron cada 15 días, al finalizar la prueba del comportamiento productivo se suspendió el suministro de alimento y se trasladaron (25 km) al rastro municipal de Toluca,

Estado de México, en donde se pesaron previo ayuno de 12 h, se sacrificaron por métodos humanitarios (SAGARPA, 2014) y faenaron bajo las normas comerciales del rastro.

Evaluación de la canal

Después del aturdimiento eléctrico, los cerdos fueron desangrados y las canales escaldadas en agua a 65 °C; posteriormente, se registró el peso y el rendimiento de la canal caliente. Después se hizo un corte transversal en la canal, a nivel de la última costilla para obtener una porción del músculo *Longissimus thoracis*, en el que se midió el área de ojo de chuleta por planimetría. El espesor de la grasa dorsal fue medido sobre la línea media, a nivel de la 10^a costilla de la media canal derecha. La pérdida por goteo se evaluó con el método de Honikel (Honikel, 1998). El rendimiento de los cortes primarios (RCP) de la canal se estimó a partir de la ecuación de predicción RCP (kg)=10.069+0.459xPCxGD, desarrollada por el INIFAP (Cuarón, 1990); en esta ecuación se basa la Norma Mexicana Productos pecuarios. Carne de porcino en Canal-Calidad de la Carne-Clasificación (SAGARPA, 2003).

Calidad de la carne

El pH se midió, en tres diferentes puntos, a 45 minutos y 24 horas post sacrificio en el músculo *Longissimus thoracis*, a nivel de la última costilla con un potenciómetro equipado con termómetro y electrodo de penetración (Oakton, Vernon Hills, IL, USA) (Honikel, 1998).

El color de la carne (Cie L*, a*, b*) se midió con un colorímetro (Chroma Meter CR-300 Konika Minolta Osaka, Japan), 45 minutos, 24 y 48 h *post mortem* sobre las muestras de carne refrigerada (4 °C), en cinco zonas homogéneas representativas libres de grasa intramuscular y sangre, que fueron seleccionadas al azar. Para esto, se extrajo una porción del músculo *Longissimus thoracis* a nivel de la última costilla, según recomendación de la American Meat Science Association (Hunt *et al.*, 1991; AMSA, 1992).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron bajo el Modelo Lineal General en un diseño experimental completamente al azar, con arreglo factorial 4 X 2 (4 tratamientos y 2 sexos) con Proc Mixed, el análisis del crecimiento de los cerdos se efectuó con medidas repetidas (SAS, 2006) y para

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

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación del crecimiento

La administración de P-Cu a los animales influyó ($P \leq 0.05$) en su crecimiento, ya que los cerdos que recibieron el tratamiento con 225 ppm de P-Cu tuvieron una mayor GDP ($P < 0.05$) y mejor conversión alimenticia ($P < 0.04$), por lo que lograron una alta eficiencia en la transformación del alimento consumido en peso vivo ganado ($P < 0.05$); sin embargo, el P-Cu no tuvo efecto ($P > 0.05$) en el CMS. No hubo diferencias entre machos y hembras, ni efecto de la interacción entre el P-Cu y el sexo de los animales ($P > 0.05$) en las variables mencionadas anteriormente (Cuadro 2). En estudios realizados con cerdos en crecimiento se observó que la ganancia diaria promedio (GDP) de los animales suplementados con 25, 50 y 100 mg de P-Cu kg^{-1} MS fue mayor que la de los cerdos tratados con 250 mg de P-Cu kg^{-1} MS. Asimismo, se observó que el CMS en los cerdos del grupo control fue mayor que en los cerdos de los otros tratamientos, ya que la dosis de 225 mg de P-Cu kg^{-1} MS lo redujo un 36.3% con respecto al grupo control y esto pudo afectar su crecimiento (Veum *et al.*, 2004). En contraste, en otros trabajos realizados en cerdos en la etapa de crecimiento, la suplementación con 100, 150 y 200 mg kg^{-1} MS del complejo Cu-lisina aumentó linealmente el CMS (Apgar *et al.*, 1995); asimismo, se ha informado que la complementación con 40 mg de P-Cu kg^{-1} MS aumentó la GDP y el CMS de cerdos en la fase de crecimiento (Smith and Henman, 2000). En estudios realizados a través de 17 experimentos se observó que los cerdos suplementados con 250 mg de CuSO_4 kg^{-1} MS, tuvieron mayor GDP y mejor CA que los tratados con 125 mg de Cu kg^{-1} MS (Braude, 1967). En el presente estudio, la complementación de la dieta con P-Cu 225 mg kg^{-1} MS mejoró 20% la GDP, 8.3% la CA y 10.8% la eficiencia de uso del alimento, con un ahorro de alimento de 8.3% con respecto al grupo control.

En cerdos jóvenes, el efecto positivo de niveles altos de Cu (por encima de su requerimiento fisiológico), se atribuye primordialmente a su acción antimicrobiana en el tubo digestivo, lo que repercute en una mayor cantidad de nutrientes absorbidos. En este sentido, un

grupo de investigación determinó que un alto contenido de Cu (283 mg kg^{-1} de dieta) mejoró el crecimiento y la conversión alimenticia, así como la relación entre la altura de las vellosidades y la profundidad de las criptas en lechones criados de forma convencional (Shurson *et al.*, 1990). Asimismo, otro estudio concluyó que la suplementación de cantidades moderadas de Cu en la dieta ($<50 \text{ mg kg}^{-1}$), redujeron la población de clostridios y coliformes, incluso concentraciones más altas ($>170 \text{ mg kg}^{-1}$) disminuyeron la población de lactobacillus (Jensen, 2016).

Evaluación de las características de la canal

El P-Cu no afectó ($P>0.05$) el peso y el rendimiento de la canal caliente, tampoco hubo diferencia significativa ($P>0.05$) entre machos y hembras, ni efecto de la interacción entre el P-Cu y el sexo sobre esas variables ($P>0.05$). En contraste, el área del ojo de la chuleta fue 9 % mayor ($P<0.05$) en las hembras que en los machos. El P-Cu por sí sólo no influyó en el depósito de grasa dorsal ($P>0.05$), pero la interacción entre el P-Cu y el sexo fue significativa ($P\leq 0.05$) con 12.2% menor depósito de grasa dorsal en los machos. Los tratamientos que proporcionaron P-Cu a los cerdos, originaron 16.7% más rendimiento de los cortes primarios de la canal (en promedio) que el grupo control ($P<0.05$); también, se observó un efecto significativo ($P=0.02$) del sexo sobre los cortes primarios de la canal, siendo 6.8% mayor en las hembras que en los machos, pero no hubo efecto de la interacción del P-Cu con el sexo ($P>0.05$) (Cuadro 3). La falta de efecto del Cu orgánico sobre el área del ojo de chuleta coincide con los resultados de algunos autores, quienes observaron que el aumento de Cu dietario (CuSO_4) de 125 a 200 mg kg^{-1} MS no tuvo efecto ($P>0.05$) en esta variable (Castell y Bowland, 1968).

Por su parte, la grasa dorsal fue 10.9% menor en los machos suplementados con Cu, esta disminución en la grasa coincide con lo observado por otros autores, quienes indicaron que cerdos suplementados con altas dosis de CuSO_4 en la dieta, redujeron la cantidad de grasa dorsal y modificaron su perfil lipídico, aumentando el contenido de ácidos grasos (AGI) monoinsaturados como el palmitoléico (16:1) y oléico (18:1) y redujeron la proporción de ácidos grasos saturados como el palmítico (16:0) y el esteárico (18:0) (Castell *et al.*, 1975). Por otro lado, se ha demostrado que alimentar pollos en engorda con $180 \text{ mg de Cu kg}^{-1}$ MS en su dieta se reduce 25% el colesterol en hígado, la pechuga y las piernas; contrariamente, un nivel bajo de Cu en la dieta puede causar hipercolesteremia, con aumento del nivel de la enzima glutatión

peroxidasa hepática (Konjufca *et al.*, 1997). Recientemente, se ha publicado que la disminución de la grasa corporal se explica por la función que tiene el Cu como regulador endógeno de la lipólisis a nivel del segundo mensajero, AMP cíclico (cAMP), alterando la actividad de la fosfodiesterasa PDE3B degradante de cAMP (Krishnamoorthy *et al.*, 2016).

Calidad de la carne

Respecto a la capacidad de retención de agua (CRA), la carne de los cerdos que consumieron 150 y 225 mg de P-Cu Kg⁻¹ MS, perdió 58.5 y 82.2 % menos agua (P<0.01) que la del tratamiento control; en los mismos tratamientos el P-Cu redujo 18.7 % el contenido de proteína (P<0.10). No hubo efecto del P-Cu, del sexo o interacción Cu con sexo (P>0.05) en los contenidos de humedad y grasa de la carne (Cuadro 4).

La menor PG en la carne de los cerdos suplementados con 150 y 225 mg de Cu kg⁻¹ MS vs el grupo de cerdos control puede deberse a la función del Cu como cofactor de la enzima citocromo oxidasa, la cual es esencial en la producción de ATP en la cadena respiratoria (Lim and Paik, 2006); por lo tanto, la mayor bio actividad del Cu orgánico, favorece la disponibilidad de ATP en la célula y mantiene más tiempo la integridad de las proteínas del músculo, con menor pérdida de agua en el proceso de transformación del músculo en carne.

Se observó un efecto significativo (P<0.01) del P-Cu en los valores de pH del músculo *Longissimus thoracis* (LT), en los dos tiempos de medición (45 m y 24 h post mortem), conforme aumentó la dosis de P-Cu mg P-Cu kg⁻¹ MS en la dieta de los cerdos el pH del músculo se incrementó; los valores de pH más bajos se observaron en el tratamiento control, en contraste, en la dieta con 225, mg P-Cu kg⁻¹ MS los valores de pH, en ambos tiempos, fueron mayores a 6.4 (Cuadro 5). Según la norma NMX-EF-081-2003 (SAGARPA, 2003), cuando el valor del pH del músculo *Longissimus thoracis* de los cerdos es menor a 5.8, medido a los 45 m post mortem, tiene un grado de aceptabilidad bajo, tal como ocurrió en los tratamientos testigo y en los que recibieron 75 y 150 mg P-Cu kg⁻¹ MS, y si el pH tiene valores entre 5.9 y 6.8, a los mismos 45 m, el grado de aceptación es bueno, tal como aconteció en el tratamiento con la dosis más alta, 225 mg de P-Cu kg⁻¹ MS. Asimismo, cuando el pH muscular declina rápidamente (< de 5.8 a 6.0 en las primeras horas post mortem) debido al exceso de ácido láctico acumulado, la fuerte acidez

muscular, si se combina con temperatura muscular alta, puede resultar en una desnaturalización proteica y en consecuencia desarrollar una carne (PSE) suave de textura, pálida de color y exudativa; la rápida disminución del pH muscular puede atribuirse a predisposición genética, estrés pre sacrificio, o una combinación de ambos.

Inversamente, cuando el glucógeno muscular de reserva está bajo, la concentración de ácido láctico acumulado es menor y en consecuencia como el valor de pH es mayor a 6 en el período post mortem, se puede producir una carne DFD de color oscuro, textura firme y seca. La acumulación intramuscular excesiva de ácido láctico puede causar que el pH muscular final alcance valores menores a 5.5, entonces la carne virtualmente es normal, de color rojo, textura suave y exudativa, sin embargo, el pH extremadamente bajo causa que las proteínas musculares pierdan su afinidad por el agua, causando pérdida de agua en exceso por una menor capacidad de retención de la misma (Apple, 2002).

No se observó efecto del P-Cu, sexo o su interacción ($P>0.05$) en la luminosidad (L) del músculo *Longissimus thoracis* en ninguno de los tiempos de medición *post mortem*; en cambio, el P-Cu si tuvo efecto ($P<0.01$) en el índice de rojo (a^*) en los tres tiempos de medición, y en el índice de amarillo (b^*) hubo tendencia a cambiar ($P=0.06$) por efecto del P-Cu en los tres tiempos de medición *post mortem* (Cuadro 5). El color de la carne de cerdo puede ser “extremadamente pálido” hasta “extremadamente oscuro”; por lo general, la carne muy pálida, presenta el defecto de ser suave y exudativa, por lo que no es apta para elaborar productos procesados por su baja capacidad para retener el agua, lo cual reduce el rendimiento y al cocinarla se seca mucho; en contraste, la carne muy oscura tiene una apariencia no deseable y causa rechazo por el consumidor; por lo tanto, no se recomienda para venta en fresco o elaboración de productos procesados (Rubio *et al.*, 2013).

De acuerdo con las categorías para la clasificación cualitativa de la carne magra de la canal caliente de la norma NMX-EF-081-2003 (SAGARPA, 2003), cuando el color del músculo *Longissimus thoracis* de los cerdos es pálido y rosa grisáceo, el grado de aceptación es bueno y cuando el color es rojo oscuro, rojo claro o ligeramente rosa, su grado de aceptación es bajo, es decir se rechaza. El aumento de la dosis de P-Cu en la dieta de los cerdos redujo, consistentemente, los valores del índice a^* ; por lo tanto, en el presente estudio, las dosis

crecientes de P-Cu en la dieta de los cerdos pudieron haber influido en el color para un grado mayor de aceptación.

3.6 CONCLUSIÓN

La adición de P-Cu a la dieta mejoró el crecimiento y la eficiencia alimenticia de los cerdos en finalización, las hembras mostraron mayor área de ojo de chuleta, en tanto que los machos que consumieron el P-Cu tuvieron menor espesor de grasa dorsal, por lo tanto, el P-Cu mejoró las características de la canal.

El P-Cu aumentó el rendimiento de los cortes primarios de la canal y redujo la pérdida de agua en la carne; el aumento de la dosis de P-Cu en la dieta también influyó en el pH del músculo y se redujeron los índices a* y b* del músculo *Longissimus thoracis*, por lo tanto, el P-Cu mejoró la calidad de la carne de los cerdos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Estado de México, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, y la Secretaría de Educación Pública del Gobierno de México.

Cuadro 1. Ingredientes usados y composición nutrimental de la dieta basal suministrada a los cerdos.

Ingrediente/Composición química	(g/1000 g)
Sorgo molido	789.0
Soya	176.0
Premezcla de minerales y vitaminas ¹	35.0
Fosfato de calcio	5.0
Total	1000.0
Análisis calculado (% BS)	
EM, Mcal kg ⁻¹ MS	3.4
Proteína cruda, g/100g	14.2
Extracto etéreo, g/100g	2.9
Fibra cruda, g/100g	3.5
Calcio, g/100g	0.85
Fósforo, g/100g	0.75
Cobre, ppm ²	15.0
Zinc, ppm	35.0
Hierro, ppm	50.0

¹Premezcla de minerales y vitaminas (Multitec, Malta Cleyton): Ca 4500 g; Zn 1.5 g; Fe 140 g; K 90 g; Co 500 g; Mg 36 g; I 500 mg; Se 90 mg; Na 125 g; Vit. A 3000 UI/Kg; Vit. D3 750 UI/Kg; Vit. E 25 UI/Kg.

²La dieta basal aportó 15 mg Cu kg⁻¹ MS.

Cuadro 2. Efecto de la inclusión de proteinato de cobre en la dieta sobre el comportamiento productivo de cerdos en finalización.

Variable	P-Cu (mg kg ⁻¹ MS)				Sexo		EEM ¹	Efecto de:		
	0	75	150	225	Hembras	Machos		P-Cu	Sexo	CuxSexo
<i>n</i>	6	6	6	6	12	12				
Peso inicio, kg	59.5	60.5	60.8	60.3	60.6	60.10	1.021	----	----	----
Peso final, kg	102.2	100.0	101.2	105.5	102.8	100.8	4.697	ns	ns	ns
² GDP, kg/d	1.0	1.0	1.0	1.2	1.07	1.06	0.118	0.05	ns	ns
³ CMS, kg/d	2.4	2.5	2.6	2.6	2.50	2.50	0.083	ns	ns	ns
⁴ CA, kg	2.4	2.5	2.6	2.2	2.30	2.40	0.384	0.04	ns	ns
⁵ EFA, %	41.7	40.0	38.5	46.2	42.8	42.4	4.144	0.05	ns	ns

¹Error Estándar de la Media.

²GDP=Ganancia de peso, ³CMS=Consumo de materia seca, ⁴CA=Conversión alimenticia,

⁵EFA=Eficiencia alimenticia.

ns= No significativo ($P>0.05$),*=($P\leq 0.05$).

Cuadro 3. Efecto de la inclusión de proteinato de cobre en la dieta sobre variables de la canal de cerdos en finalización.

Variable	P-Cu (mg kg ⁻¹ MS)				Sexo		EEM ¹	Efecto de:		
	0	75	150	225	Hembras	Machos		P-Cu	Sexo	P-Cu x Sexo
² PVS, kg	102.2	100.0	101.2	105.5	102.8	100.8	4.697	ns	ns	ns
³ PCC, kg	82.1	80.2	81.5	84.1	82.3	81.6	2.524	ns	ns	ns
⁴ RC, %	80.3	80.2	80.5	79.7	80.0	80.9	2.344	ns	ns	ns
⁵ ACH, cm ²	56.7	55.8	57.8	57.8	59.1	54.2	3.014	ns	0.05*	ns
⁶ GD, cm	1.3	1.7	1.5	1.43	1.6	1.4	0.104	ns	ns	0.05*
⁷ RCP, kg	59.8	70.8	64.3	65.3	69.0	62.1	4.516	0.05*	0.02*	ns

¹Error Estándar de la Media.

ns= No significativo ($P>0.05$), *= ($P\leq 0.05$).

²PVS=Peso vivo a sacrificio, ³PCC=Peso canal caliente, ⁴RC=Rendimiento de canal, ⁵ACH=Área de chuleta, ⁶GD=Grasa dorsal.

⁷Rendimiento de cortes primarios; estimado a partir de la ecuación de predicción RCP (kg)=10.069+0.459xPCxGD, desarrollada por el INIFAP, y en la cual se basa la Norma Mexicana NMX-FF-81-2003-SCFI. Dónde: PC=Peso Canal (kg), GD=Grasa Dorsal (cm).

Cuadro 4. Efecto del proteinato de cobre sobre la capacidad de retención de agua y la composición química de la carne de cerdos en finalización.

Variable	P-Cu (mg kg ⁻¹ MS)				Sexo		EEM ¹	Efecto de:		
	0	75	150	225	Hembras	Machos		P-Cu	Sexo	Cu x Sexo
Pérdida por goteo, %	6.75	5.92	2.80	1.20	4.2	4.2	0.205	0.01*	ns	0.03*
Humedad, %	69.6	68.8	68.5	66.5	69.2	67.7	1.834	ns	ns	ns
Grasa, % BH	2.92	2.72	2.73	2.97	2.81	2.85	0.512	ns	Ns	ns
Proteína, % BH	15.5	15.3	12.8	12.4	15.9	12.6	0.818	0.10 [¥]	Ns	ns

¹Error Estándar de la Media.

ns= No significativo ($P > 0.10$), * ($P \leq 0.05$), ** ($P \leq 0.01$), [¥]= con tendencia a cambio ($P \geq 0.05$ y ≤ 0.10).

Cuadro 5. Efecto del proteinato de Cu sobre el pH final y el color del músculo *Longissimus thoracis* de cerdos en finalización.

Variable	Cu (mg kg ⁻¹ MS)				Sexo		EEM ¹	Efecto de:		
	0	75	150	225	Hembras	Machos		Cu	Sexo	CuxSexo
pH 45 min	5.11	5.36	5.63	6.70	6.20	6.20	0.172	0.01	ns	ns
pH 24 h	5.23	5.30	5.45	6.47	5.53	5.67	0.043	0.01	ns	ns
Colorimetría										
L*45 min	49.95	50.86	48.56	52.82	50.21	50.77	4.903	ns	ns	ns
L*24 h	55.14	49.02	50.86	48.98	53.18	49.45	4.781	ns	ns	ns
L*48 h	54.77	50.39	53.01	50.14	53.87	50.79	4.634	ns	ns	ns
a*45 min	10.29	9.89	6.73	7.71	8.80	8.55	0.796	0.01	ns	ns
a*24 h	9.22	6.90	5.46	5.32	6.22	7.08	0.745	0.01	ns	ns
a*48 h	9.57	7.35	6.02	6.11	6.99	7.46	0.548	0.01	ns	0.01
b*45 min	4.92	4.40	4.03	4.49	4.66	4.31	0.731	0.06	ns	ns
b*24 h	7.75	5.50	5.51	5.99	6.07	5.84	0.902	0.06	ns	ns
b*48 h	8.29	6.85	6.74	5.91	7.42	6.61	0.578	0.06	ns	0.01

¹Error Estándar de la Media.

ns= No significativo ($P>0.10$), *($P\leq 0.05$), **($P\leq 0.01$), †= con tendencia a cambio ($P\geq 0.05$ y ≤ 0.10).

3.7 LITERATURA CITADA

- Amer, M.A., and Elliot, J.I. 1973. Influence of supplemental dietary copper and vitamin E on the oxidative stability of porcine depot fat. *Journal of Animal Science*. 1973. 37:87-90.
- American Meat Science Association. 1992. Guidelines for meat color evaluation. American Meat Science. Assoc. Nat. Livestock and Meat Board. Chicago IL, USA.
- AOAC. 2007. Official Methods of Analysis. 18th ed. Association of Official Analysis Chemists. Arlington, VA, USA.
- Apgar, G.A., Kornegay, E.T., Lindemann, M.D., and Notter, D.R. 1995. Evaluation of copper sulfate and a copper lysine complex as growth promoters for weanling swine. *Journal of Animal Science*. 73:2640-2646.
- Apple, J.K. 2002. Nutritional effects on pork quality in swine production. National swine nutritional guide. Factsheet. Pork Information Gateway. 1-13.
- Braude, R. 1967. Copper as a stimulant in pig feed (cuprum pro pecunia). *World Review. Animal Productio*. 3:69-81.
- Castell, A.G., and Bowland, J.P. 1968. Supplemental copper for swine: growth, digestibility and carcass measurements. *Canadian Journal of Animal Science*. 48:403-413.
- Castell, A.G., Allen, R.D., Beames, R.M., Bell, J.M., Belzile, R., Bowland, J.P., Elliot, J.I., Ihnat, M., Larmond, E., Mallard, T.M., Spurr, D.T., Stothers, S.C., Wilton, S.B., and Young, L.G. 1975. Copper supplementation of Canadian diets for growing-finishing pigs. *Canadian Journal of Animal Science*. 55:113-134.
- Cromwell, G.L., Stahly, T.S., and Monegue, H.J. 1989. Effects of source and level of copper on performance and liver copper stores in weanling pigs. *Journal of Animal Science*. 67:2996-3002.
- Cuarón, I.J.A. 1990. Composición de la Canal. Análisis por Rangos de Peso al Sacrificio. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, SARH, México.
- Dove, C.R. 1993. The effect of adding copper and various fat sources to the diets of weanling swine on growth performance and serum fatty acid profiles. *Journal of Animal Science*. 71:2187-2192.
- Fick, K.R., McDowell, L.R., Wilkinson, N.S., Funk, D.J., Conrad, J.H., and Valdivia, R. 1979. Métodos de análisis de minerales para tejidos de plantas y animales. Florida, USA:

Departamento de Ciencia Animal, Universidad de Florida.

- Hastad, C.W., Dritz, S.S., Nelssen, J.L., Tokach, M.D., and Goodband, R.D. 2001. Evaluation of different copper sources as a growth promoter in swine finishing diets. *Kansas Agric. Exp. Sta. Prog. Rep.* 880; 2001; 880:111-117. Available at: <http://www.ksre.ksu.edu/library/lvstk2/srp880.pdf>. Accessed 6 January 2018.
- Hill, G.M., and Spears, J.W. 2001. Trace and ultratrace elements in swine nutrition. In: Lewis AJ, Southern LL, Eds. *Swine Nutrition*. 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press. 1:229-261.
- Hill, G.M., Cromwell, G.L., Crenshaw, T.D., Dove, C.R., Ewan, R.C., Knabe, D.A., Lewis, A.J., Libal, G.W., Mahan, D.C., Shurson, G.C., Southern, L.L., and Veum, T.L. 2000. Growth promotion effects and plasma changes from feeding high dietary concentrations of zinc and copper to weanling pigs. *Journal of Animal Science*. 78:1010-1018.
- Honikel, K.O. 1998. Reference methods for assessment of physical characteristics of meat. *Meat Science*. 60:103-109.
- Hunt, M.C., Acton, J.C., Benedict, R.C., Calkins, C.R., Cornforth, D.P., Jeremiah, L.E. 1991. AMSA guidelines for meat colour evaluation. In: *Proceedings of the 44th annual reciprocal meat conference*.
- Jensen, B.B. 2016. Extensive Literature Search on the Effects of Copper intake levels in the gut microbiota profile of target animals, in particular piglet. European Food Safety Authority (EFSA) supporting publication. EN-1024:68.
- Konjufca, V.H., Pesti, G.M., and Bakalli, R.I. 1997. Modulation of cholesterol levels in broiler meat by dietary garlic and copper. *Poultry Science*. 76:1264-1271.
- Krishnamoorthy, L., Cotruvo, Jr. J.A., Chan, J., Kaluarachchi, H., Muchenditsi, A., Pendyala, V.S., Jia, S., Aron, A.T., Ackerman, C.M., Vander, W.M.N., Guan, T., Smaga, L.P., Farhi, S.L., New, E.J., Lutsenko, S., and Chang, C.J. 2016. Copper regulates cyclic-AMP-dependent lipolysis. *Nature Chemical Biology*. 12: 586-592.
- Lim, K.S. and Paik, I.K. 2006. Effects of dietary supplementation of copper chelates in the form of methionine, chitosan and yeast in laying hens. *Asian-Australasian Journal Animal Science*. 19:1174-1178.
- Murray, R., Mayes, P., Granner, D., and Rodwell, V. 1997. *Bioquímica de Harper*. Ed. Manual

- moderno. México. pp.65-76.
- NRC. 2012. Nutrient Requirements of Swine: Eleven Revised Edition, Subcommittee on Swine Nutrition, Committee on Animal Nutrition, National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C., USA. 400p.
- Pettigrew, J.E., and Esnaola, M.A. 2001. Swine nutrition and pork quality: A review. *Journal of Animal Science*. 2001. 79(E-Suppl.):E316-E342.
- Rubio, L.M.S., Braña, V.D., Méndez, M.R.D., y Delgado, S.E. 2013. Composición de la carne mexicana. INIFAP. SAGARPA. p.62.
- SAS. 2006. User's Guide. Statistics, Version 9. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1995. Norma Oficial Mexicana NOM-051-ZOO-1995, trato humanitario en la movilización de animales. Dirección General Jurídica. SAGARPA. México. p.23.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2003. Norma Oficial Mexicana NMX-FF-081-2003. Productos pecuarios. Carne de porcino en canal-Calidad de la carne-Clasificación. Dirección General Jurídica. SAGARPA. México. p.12.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2014. Norma Oficial Mexicana NOM-033-SAG/ZOO-2014. Métodos para dar muerte a los animales domésticos y silvestres. Dirección General Jurídica. SAGARPA. México.
- Schiavon, S., Bailoni, L., Ramanzin, M., Vincenzi, R., Simonetto, A., and Bittante, G. 2000. Effect of proteinate or sulphate mineral sources on trace elements in blood and liver of piglets. *Animal Science*. 71:131-139.
- Shurson, G.C., Ku, P.K., Waxler G.L., Yokoyama, M.T., and Miller, E.R. 1990. Physiological relationships between microbiological status and dietary copper levels in the pig. *Journal of Animal Science*. 68:1061-1071.
- Smith, R.J., and Henman, D.J. 2000. Practical experiences with bioplexes in intensive production. *In: Lyons, T.P., and Jacques, K.A. (Eds.). Biotechnology in the Feed industry. Proc. Alltech's 16th Annu. Symp., Nottingham Univ. Press, UK. pp.293-300.*
- Steel, R.G.D., Torrie, J.H., and Dickey, D.A. 1997. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. 3rd ed., McGraw-Hill Series in Probability and Statistics. USA. p.600.

- Veum, T.L., Carlson, M.S., Wu, C.W., Bollinger, D.W., and Ellesieck, M.R. 2004. Copper proteinate in weanling pig diets for enhancing growth performance and reducing fecal copper excretion compared with copper sulfate. *Journal of Animal Science*. 82:1062-1070.
- Wapnir, R. 1998. Copper absorption and bioavailability. *American Journal Clinic Nutrition*. 67:1054S-60.

4. CAPÍTULO IV. ARTÍCULO CIENTÍFICO 2. EFECTO DEL PROTEINATO DE COBRE EN EL CRECIMIENTO, CARACTERÍSTICAS DE LA CANAL, CALIDAD DE LA CARNE Y COMPOSICIÓN DEL TIPO DE FIBRAS DEL *LONGISSIMUS THORACIS* DE CERDOS PELÓN MEXICANO.

4.1 RESUMEN

El objetivo fue evaluar 0, 75, 150 y 225 mg Cu kg⁻¹ MS, proteinato de Cu, en la dieta de cerdos Pelón Mexicano (CPM) sobre el crecimiento, características de la canal, calidad de la carne y composición de fibras musculares. Se usaron 24 cerdos, 6/tratamiento, en un diseño completamente al azar. El Cu aumentó ($P<0.05$) la ganancia de peso (GDP) pero redujo ($P<0.05$) el consumo (CMS) y la conversión alimenticia (CA). El Cu aumentó ($P<0.05$) el pH y peso de la canal (PC), redujo ($P<0.05$) la grasa dorsal (GD), la pérdida por goteo (PG) y la temperatura (T). El Cu afectó ($P<0.05$) los índices de coloración *b* a 48 h, y el índice *h* a 24 y 48 h. El Cu afectó ($P<0.05$) el número, composición y área relativa de las fibras tipo I y BII. El Cu mejoró el crecimiento y PC, redujo la GD, la PG y T, y modificó la composición de fibras tipo I y IIB.

Palabras claves: Cobre, cerdos, canales, calidad carne, fibras musculares, histoquímica.

4.2 INTRODUCCIÓN

En la oxidación de lípidos influyen factores relacionados con la dieta, por ejemplo, el grado de insaturación de los lípidos ingeridos y el contenido de antioxidantes y pro oxidantes (Buckley, Morrissey, & Gray, 1995). El cobre (Cu) es un micronutriente esencial, participa en múltiples funciones bioquímicas (Davis & Mertz, 1987); como ion metálico, cataliza la peroxidación de lípidos (Apte & Morrissey, 1987), y es cofactor de la enzima citocromo oxidasa en la cadena respiratoria productora de ATP (Lim & Paik, 2006). Varios estudios han abordado como mejorar, a través de la dieta, la calidad de la carne, los perfiles de antioxidantes y de ácidos grasos (AG), en músculo y grasa de cerdos, para hacerla más saludable (Mahan, Clint, & Richert, 1999).

Se ha demostrado que la adición de altas dosis de Cu en la dieta de cerdos (>200 mg kg⁻¹ MS) aumenta los AG instaurados (Amer & Elliot, 1973). El requerimiento de Cu en la dieta de

cerdos, según el (NRC, 2012) es de 25 mg Cu kg⁻¹ MS, pero algunos estudios indican que suplementar 250 mg kg⁻¹ (CuSO₄) mejora su crecimiento (Cromwell, Stahly, & Monegue, 1989; Dove, 1993; Hill et al., 2000). Castell et al. (1975) aumentaron el Cu de 125 a 200 mg kg⁻¹ MS y mejoraron el crecimiento de cerdos y también aumentaron los AG insaturados. El Cu inorgánico sólo se absorbe de 0.5 a 4.0% (Wapnir, 1998), en contraste, el Cu orgánico, como el proteinato de Cu, tiene mayor absorción y retención tisular, por lo tanto, es más biodisponible y bioactivo (Murray, 1997; Schiavon et al., 2000). El cerdo Pelón Mexicano (CPM) es una raza local, derivó de cerdos mediterráneos que originaron las variedades célticas e ibéricas; la raza conserva rasgos genéticos (*loci* S0355, S0215 y SW632) del cerdo Ibérico Español (Canul et al., 2005), se caracteriza por su lento crecimiento, pobre conversión alimenticia, abundante grasa subcutánea y poca masa muscular; actualmente está en riesgo de extinción (FAO, 2000; Méndez et al., 2002); su carne tiene excelente sabor, asociado al tipo de grasa dorsal depositada (72.2% de AG insaturados), y es apta para elaborar embutidos tipo ibérico (Montiel, López, & Méndez, 1997; Lemus et al., 2002).

El músculo esquelético tiene diferentes tipos de fibras; según sus características histoquímicas, se clasifican en tres tipos: i) fibras lentas-oxidativas o tipo I (β -rojas), ii) rápidas oxidativas-glucolíticas o tipo IIA (α -rojas), y iii) rápidas-glucolíticas o tipo IIB (α -blancas). La clasificación representa a los dos extremos del perfil metabólico (tipo I y IIB) y al metabolismo energético intermedio (tipo IIA) (Brooke & Kaiser, 1970a). Dos factores que influyen en la calidad de la carne de cerdo, y que están relacionados con las alteraciones en el metabolismo postmortem del músculo, son la composición fibrilar y el tamaño de los miositos, esto determina el curso bioquímico del músculo, influyendo así en la transformación del músculo en carne (Fiedler et al., 2003; Chang et al. 2003; Ryu & Kim, 2006). Por lo tanto, los cambios en el grado o frecuencia de la glicolisis pueden producir un pH muscular desfavorable; la rápida disminución del pH puede llegar a un pH último bajo que resulta en desnaturalización de la proteína con menores parámetros de calidad (Henckel et al., 2000; Hammelman et al., 2003). Un factor determinante de las vías bioquímicas del músculo es la composición del tipo de fibras; las cuales resultan de la expresión coordinada de los distintos conjuntos de proteínas estructurales y enzimas metabólicas (Schiaffino & Reggiani, 1996; Chang et al., 2003). Por lo tanto, la variación del tipo de fibra muscular puede explicar, en parte, la variación en algunas características de la

calidad de la carne (Essen-Gustavsson et al., 1994). La selección del cerdo por su tasa de crecimiento, tejido magro y masa muscular, produjo cambios en los tipos de fibras, en el número y tamaño, aumentando las de tipo IIB (Weiler et al., 1995; Rehfeldt et al., 1999). Pocos estudios han evaluado el efecto del Cu orgánico en la calidad de la canal y la carne de cerdos no mejorados, y menos aún aquellos dirigidos a evaluar el efecto del Cu en el tipo de fibras del músculo *Longissimus thoracis*. El objetivo del presente estudio fue evaluar el crecimiento, las características de la canal, la calidad de la carne y la composición del tipo de fibras del músculo *Longissimus thoracis*, usando como modelo biológico cerdos adipogénicos Pelón Mexicano en finalización suplementados con dosis altas de Cu orgánico en la dieta.

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue aprobado por el Comité de Bioética y se realizó en la Unidad Experimental en Producción Animal de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México. Los procedimientos de manejo de los cerdos se realizaron según los lineamientos oficiales para el cuidado de los animales en México (NOM-051-ZOO-1995: cuidado humanitario del animal durante la movilización; NOM-033-ZOO-1995: sacrificio de animales domésticos y silvestres).

Animales, manejo y tratamientos

Un total de veinticuatro cerdos machos castrados de la raza Pelón Mexicano (62 ± 5.2 kg PV y 120 ± 4 días de edad), fueron alojados durante 46-d en corrales de 2.5 x 3 m, equipados con bebedero y comedero automáticos, más un tiempo de adaptación de 15-d a una dieta basal que cubrió sus requerimientos nutricionales (NRC, 2012) (Cuadro 1). Antes de iniciar el estudio, los cerdos recibieron una inyección de 1 mL de vitaminas A, D y E (Vigantol; Bayer, México) y 0.5 mL de Ivermectina (laboratorio Sanfer, México). Los cerdos fueron pesados individualmente, estratificados por PV y asignados al azar a los tratamientos dentro de su grupo de PV bajo un diseño completamente aleatorizado. Los tratamientos fueron T1=DB (15 mg Cu kg^{-1} MS), T2=DB+75 mg Cu kg^{-1} MS, T3=DB+125 mg Cu kg^{-1} MS, T4=DB+225 mg Cu kg^{-1} MS. El Cu (proteinato de cobre) se suplementó a través de la premezcla (Bioplex Cu, Alltech, Inc., Nicholasville, KY) que contiene 1000 mg de Cu kg^{-1} , dispersada con la técnica “top dressing”,

extendiendo el producto sobre la dieta basal para asegurar su consumo diario.

Comportamiento del crecimiento

La fase de engorda duró 46 d y la DB se suministró a libre acceso. El alimento ofrecido y rechazado se pesó y registró diario para calcular el consumo. Se colectaron muestras de alimento dos veces por semana, la muestra compuesta se secó en horno de aire forzado a 60 °C durante 24 h y se analizó su composición química: MS, cenizas, extracto etéreo, proteína cruda y fibra cruda (método número 930.15, 942.05, 945.16, 984.13 y 962.09; AOAC, 2007). Los cerdos se pesaron cada 15-d, al finalizar la prueba de crecimiento se trasladaron (25 km) al rastro municipal de Toluca, donde se pesaron y sacrificaron, con ayuno de 12 h, bajo las normas del rastro.

Evaluación de la canal

El sacrificio se realizó por métodos humanitarios (NOM-033-ZOO-1995). Después del aturdimiento eléctrico, las canales fueron desangradas y escaldadas en agua a 65°C; posteriormente se registró su peso dentro de los 15 minutos post sacrificio y evisceración, así como su rendimiento. Dentro de los 30 minutos post sacrificio, se hizo un corte transversal en la canal, a nivel de la última costilla, se obtuvo una porción de *Longissimus thoracis*, y se midió el área de ojo de chuleta por planimetría. El espesor de la GD fue medido en la línea media de la media canal derecha, a nivel de la 10^a costilla. La pérdida por goteo se midió con el método de Honikel (1998), las muestras de carne se pesaron y suspendieron en bolsas de nylon durante 2 días a 4 °C, la diferencia de peso entre los días 0 y 2 indicó la merma.

Calidad de la carne

El pH y la temperatura se midieron, en tres puntos, a 45 minutos, 24 y 48 horas post sacrificio en el músculo *Longissimus thoracis* a nivel de la última costilla con un potenciómetro equipado con termómetro y electrodo de penetración (Oakton, Vernon Hills, IL, USA) (Honikel, 1997). El color, en la carne refrigerada (4 °C), se midió con un colorímetro calibrado (Minolta Chromameter CR-300 Osaka, Japan), a las 24 y 48 h postmortem, en cinco zonas homogéneas representativas, libres de grasa intramuscular y sangre, seleccionadas al azar, para lo cual se extrajo una porción del *Longissimus thoracis* a nivel de la última costilla, según las

recomendaciones de la American Meat Science Association (Hunt et al., 1991; AMSA, 1992). Se determinaron las coordenadas de: luminosidad (L^*), rojizo (a^* , rojo±verde) y amarillento (b^* , amarillo±azúl). El índice de saturación o croma (C^*), que refiere la claridad o vivacidad del color, y el ángulo matíz (h), se estimaron con las ecuaciones: $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$; $h = \tan^{-1}(b^*/a^*)$.

Análisis histoquímico

Dentro de 45 min post mortem, a nivel de la última costilla, se tomaron 5 muestras de 1 cm³ en corte paralelo al paquete miofibrilar del *Longissimus thoracis* para el análisis histoquímico. Las muestras se colocaron en alcohol 2Metil Butano enfriado con nitrógeno líquido, después se congelaron y conservaron a -80 °C hasta su análisis subsecuente. Se cortaron 10 secciones seriadas transversales del músculo (10 µm) en un criostato (CM1800 Leica, Germany) a -20 °C y se colocaron en portaobjetos de vidrio. Las secciones fueron teñidas por la reacción histoquímica de la actividad enzimática de la adenosin trifosfatasa miosínica (mATPasa) después de preincubación ácida (pH 4.6) (Brooke & Keiser, 1970b), combinando el análisis con la tinción de la nicotinamida adenin dinucleótido (reducida) tetrazolium reductasa (NADH-TR) (Gil et al., 2001), para demostrar la actividad metabólica de las fibras. Con las secciones teñidas se midió el número de fibras por mm² y el área de cada tipo de fibras según Brooke & Kaiser (1970b), usando el sistema de análisis de imágenes Sigma Scan Pro (Ver. 4 for Windows, Systat Software Inc, USA). Las porciones de las secciones analizadas no sufrieron daño por congelación. Por cada muestra, se evaluaron mínimo 300 fibras (1500 por cerdo); con los datos se calcularon las proporciones de los tres tipos de fibras, el área promedio y la superficie de área relativa ocupada por cada tipo de fibra; esta última se obtuvo al sumar las áreas individuales de cada tipo de fibra.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron bajo el Modelo Lineal General en un Diseño Experimental Completamente al Azar con Proc Mixed (SAS, 2006) para evaluar diferencias ($P \leq 0.05$) entre tratamientos, comparando las medias con la prueba de Tukey.

4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación del crecimiento

El Cu tuvo efecto cuadrático ($P<0.05$) en el peso vivo final (PVF) y la GDP; el CMS se redujo linealmente ($P<0.05$) al aumentar la dosis de Cu en la dieta; asimismo, la CA mejoró linealmente ($P<0.05$) por efecto del Cu. (Cuadro 2). Los cerdos del tratamiento con 75 mg de Cu kg^{-1} MS mostraron mayor eficiencia del crecimiento que el resto, su GDP fue 17.0% mayor que el grupo control. Veum et al. (2004) encontraron que la GDP de cerdos en crecimiento, suplementados con 25, 50 y 100 mg de Cu kg^{-1} MS, como proteinato de Cu, fue mayor que la de cerdos con 250 mg de Cu kg^{-1} MS. En los cerdos del grupo control el CMS fue mayor que en los otros tratamientos, pero la dosis de 225 mg de Cu kg^{-1} MS, parece afectar el CMS ya que se redujo 36.3 % con respecto al control y esto pudo afectar su crecimiento. Apgar et al. (1995) informaron que, en cerdos en crecimiento, la suplementación con 100, 150 y 200 mg de Cu kg^{-1} MS, del complejo Cu lisina, aumentó linealmente el CMS. Smith & Henman (2000) reportaron que 40 mg de Cu kg^{-1} MS, como proteinato de Cu, aumentaron la GDP y el CMS de cerdos en crecimiento. Braude (1967) observó, en 17 experimentos, que los cerdos suplementados con 250 mg de Cu kg^{-1} MS, como CuSO_4 , tuvieron mayor GDP y mejor CA que los tratados con 125 mg de Cu kg^{-1} MS. En el presente estudio, la suplementación con Cu mejoró, en todos los tratamientos, la eficiencia de uso del alimento, pero en particular en los cerdos con 75 mg de Cu kg^{-1} MS, con un ahorro de alimento de 31.6% con respecto al control.

Características de la canal

El Cu aumentó cuadráticamente ($P<0.05$) el PC; en contraste, la GD y la PG bajaron linealmente ($P<0.305$) por efecto del Cu en la dieta (Cuadro 3). El pH de la canal aumento linealmente ($P<0.05$) y la temperatura bajó linealmente ($P<0.05$) por efecto del Cu; el Cu afectó cuadráticamente ($P<0.05$) los índices de coloración b y h a 48 h; y el índice h aumento linealmente ($P<0.05$) a 24 h por efecto del Cu dietario (Cuadro 4). El PC fue 9.9% mayor en los cerdos suplementados con 75 mg de Cu kg^{-1} MS con respecto al grupo sin Cu; en contraste, no hubo efecto del Cu ($P<0.05$) en el rendimiento de la canal (RC) y área de ojo de la chuleta (AOCH). Lemus et al. (2002) indicaron que el RC de cerdos Pelón Mexicano fue de 44.2%,

valor inferior al promedio general (59.4%) del RC de los 4 tratamientos del presente estudio. En contraste, Serra et al. (1998) observaron valores medios mayores en el RC de cerdos Ibéricos y Landrace (78.6 y 72.4%). Respecto al AOC, Castell & Bowland (1968) no encontraron diferencia ($P>0.05$) en esta variable al aumentar el Cu dietario (CuSO_4) de 125 a 200 mg kg^{-1} MS. La GD fue menor en los cerdos suplementados con 225 mg de Cu kg^{-1} MS; respecto al testigo se redujo 13.7%. Lo anterior coincide con la función del Cu en el metabolismo de los lípidos; Castell et al. (1975) indicaron que cerdos suplementados con altas dosis de CuSO_4 en la dieta, redujeron la GD y modificaron su composición, aumentando el contenido de ácidos grasos (AGI) insaturados como el palmitoléico (16:1) y oléico (18:1) y redujeron el palmítico (16:0) y esteárico (18:0). En el CPM la GD puede tener 45.02% de AG esteárico, 4.3% de palmítico y 16.1% de oleico (Lemus et al., 2002). Konjufca, Pesti, & Bakalli (1997) demostraron que al alimentar pollos en engorda con 180 mg de Cu kg^{-1} MS, redujeron 25% el colesterol en hígado, la pechuga y la pierna; también concluyeron que el bajo nivel de Cu en la dieta puede causar hipercolesteremia, con aumento del nivel de la enzima glutatión peroxidasa hepática. La PG fue menor en la carne de los cerdos suplementados con 150 y 225 mg de Cu kg^{-1} MS; al comparar la dosis de 225 con el control, la merma se redujo 52% por efecto del Cu. Este efecto puede producir menor desnaturalización proteica, con menor PG, particularmente en condiciones de un lento pre-rigor mortis (Honikel, 1998); en el proceso, entre más lenta sea la pérdida de ATP, ayudará a mantener la integridad estructural de las proteínas, lo que retrasa su desnaturalización y aumenta la CRA (Sellier et al., 1988). Lo anterior puede deberse a la función del Cu como cofactor de la enzima citocromo oxidasa, que es esencial en la producción de ATP en la cadena respiratoria (Lim y Paik, 2006); por lo tanto, el Cu orgánico, al ser más bioactivo, favorece la disponibilidad de ATP en la célula y mantiene más tiempo la integridad de las proteínas, con menor pérdida de agua al transformarse el músculo en carne.

Calidad de la carne

En los tres tratamientos con Cu, en las tres mediciones (45 min, 24 y 48 h) el pH de la canal fue mayor al control, particularmente al suplementar 225 mg Cu kg^{-1} MS. Bidner et al. (2004) indican que la evolución y valor final del pH está correlacionado, genética y fenotípicamente, con los criterios de calidad de la carne como color, PG y atributos sensoriales

como terneza, jugosidad, sabor y olor. La temperatura de las canales del grupo control a los 45m fue mayor ($P<0.05$) que en los grupos con Cu. La combinación de temperatura alta con un pH bajo, como se observa en el grupo control, puede aumentar la desnaturalización de las proteínas sarcoplasmáticas y miofibrilares, reducir la PG y cambiar la coloración de la carne, lo cual predispone a la aparición de carnes pálidas, suaves en textura y exudativas (PSE) después de 18 a 24 h de enfriamiento; lo anterior reduce el rendimiento durante el procesado del producto cárnico (Warriss & Brown, 1987). Los resultados sobre la coloración de las canales indican mayor palidez en la carne del grupo control; asimismo, un pH final más alto a 48 h post sacrificio, se asocia a una menor PG, con mayor rendimiento en el procesado (Rubio, 2013), como pudo ocurrir en los tratamientos con Cu del presente estudio.

Análisis histoquímico

El Cu redujo linealmente ($P<0.05$) el número, la composición y el área relativa ocupada de las fibras tipo I; el Cu también afectó, pero cuadráticamente ($P<0.05$), el número y el área promedio de las fibras tipo IIB (Cuadro 5). El análisis histoquímico muestra, en los cuatro tratamientos, la distribución típica de las fibras musculares de contracción rápida glucolítica del musculo *Longissimus thoracis* del cerdo, con fibras tipo IIB en mayor número que las fibras tipo I y IIA (Figura 1). Los resultados coinciden con los obtenidos por Lefaucheur et al. (1991); en el *Longissimus thoracis* de cerdos adultos de líneas comerciales cuya área de las fibras aumentó en el orden del tipo IIA, I y IIB; por otro lado, en otra línea de cerdos comerciales Ryu & Kim (2006) informaron que las fibras aumentaron en el orden I, IIA y IIB. En los cerdos suplementados con 150 y 225 mg Cu kg⁻¹ MS se redujo el número de fibras tipo I pero aumentó el de tipo IIB; los cerdos control tuvieron más proporción de fibras tipo I que los cerdos suplementados con Cu. El área promedio de las fibras tipo I y IIA fue mayor en los cerdos tratados con 150 y 225 mg Cu kg⁻¹ MS; además, con las tres dosis de Cu suplementado se redujo el área relativa ocupada por las fibras tipo I, pero solo el nivel de 225 mg Cu kg⁻¹ MS en la dieta aumentó significativamente el área relativa ocupada de las fibras tipo IIA, y en las fibras tipo IIB no hubo diferencias en esta variable.

La evolución del pH ácido exhibido por los cerdos del grupo control vs el pH ligeramente ácido de los cerdos con Cu, en los tres tiempos de medición, puede ser explicado por la

composición del tipo de fibras encontrado en esta clase de cerdos sin selección genética; o sea que el *Longissimus Thoracis* tuvo mayor número, proporción, área promedio y área relativa ocupada por las fibras tipo IIB mismas que son de naturaleza anaerobia, glicolización rápida y mayor actividad de la ATPasa, las cuales, en el período post mortem temprano, siguen degradando el glucógeno en ácido láctico, con la consecuente reducción del pH en el proceso de transformación del músculo en carne (Bowker et al., 2004); por lo tanto, la velocidad de reducción del pH y su valor final, son determinantes en la desnaturalización de las proteínas, en la PG y en la coloración de la carne; si estos parámetros son afectados negativamente, la calidad de la carne será pobre, con tendencia a ser del tipo pálida, suave y exudativa (PSE) (Ryu & Kim, 2006). Además, se ha sugerido que las diferencias de la proteína muscular a través de las líneas genéticas porcinas resultan en diferentes susceptibilidades a la desnaturalización de proteínas dado las similares condiciones de pH muscular post mortem (Bowker et al., 1999). El menor pH de la carne de los cerdos control comparado con el de cerdos suplementados con Cu se atribuye a los cambios producidos por el Cu en el área promedio de los tres tipos de fibras, el Cu aumento el área media de las fibras tipo I y IIA, pero redujo el de las fibras IIB, por lo tanto, es posible esperar cambios en el metabolismo energético pos mortem inicial, que afectaran la tasa de decline y el pH final de la carne (Bowker et al., 2004; Ryu & Kim, 2006). En el presente estudio, la carne de los cerdos control tuvo mayor tasa de decline de pH en 45 min post mortem y el menor valor final de pH a 48 h comparado con los cerdos suplementados con Cu.

4.5 CONCLUSIÓN

El Cu mejoró el crecimiento y el peso de la canal de los cerdos Pelón Mexicano; también redujo la grasa dorsal y la pérdida de agua, pero aumentó el pH de la carne en los 45 min post mortem; asimismo, modificó la composición de los tipos de fibras musculares I, IIA y IIB del *Longissimus thoracis*. Los cambios causados por el Cu pueden mejorar los parámetros de calidad de la carne.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Estado de México, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, y a la Secretaría de Educación Pública del Gobierno de México, por financiar esta

investigación; al Departamento de Anatomía y Anatomía Patológica, Facultad de Veterinaria, Universidad de Murcia, España, por la asesoría en el análisis histoquímico.

4.6 LITERATURA CITADA

- Amer, M.A., & Elliot, J.I. (1973). Influence of supplemental dietary copper and vitamin E on the oxidative stability of porcine depot fat. *Journal of Animal Science*, 37, 87-90.
- American Meat Science Association. (1992). "Guidelines for meat color evaluation". American Meat Science. Association National Livestock and Meat Board. Chicago IL, USA.
- AOAC. (2007). Official Methods of Analysis. 18th ed. Association of Official Analysis Chemists. Arlington, VA, USA.
- Apgar, G.A., Kornegay, E.T., Lindemann, M.D., & Notter, D.R. (1995). Evaluation of copper sulfate and a copper lysine complex as growth promoters for weanling swine. *Journal of Animal Science*, 73, 2640-2646.
- Apte, S. & Morrissey, P.A. (1987). Effect of haemoglobin and ferritin on lipid oxidation in raw and cooked muscle system. *Food Chemistry*, 25, 127-124.
- Bidner, B.S., Ellis, M., Witte, D.P., Carr, N.S., & McKeith, F.K. (2004). Influence of dietary lysine level, pre-slaughter fasting, and rendement napole genotype on fresh pork quality. *Meat Science*, 68, 53-60.
- Braude, R. (1967). Copper as a stimulant in pig feed (*cuprum pro pecunia*). *World Rev. Animal Production*, 3, 69-81.
- Bowker, B.C., Botrel, C., Swartz, D.R., Grant, A.I., & Gerrard, D.E. (2004). Influence of myosin heavy chain isoform expression and post mortem metabolism on the ATPase activity of muscle fibers. *Meat Science*, 68, 587-594.
- Bowker, B.C., Wynveen, E.J., Grant, A.I. & Gerrard, D.E. (1999). Effects of electrical stimulation on early postmortem muscle pH and temperature declines in pigs from different genetic lines and halothane genotypes. *Meat Science*, 53, 125-133.
- Brooke, M.H., & Kaiser, K.K. (1970a). Muscle fiber types: how many and what kind?. *Archives of Neurology*, 23, 369-379.
- Brooke, M.H., & Kaiser, K.K. (1970b). Three myosin adenosine triphosphatase system: The nature of their pH liability and sulphhydryl dependence. *Journal Histochemical and*

Cytochemical, 18, 670-672.

- Buckley, D.J., Morrissey, P.A., & Gray, J.L. (1995). Influence of dietary vitamin E on the oxidative stability and quality of pig meat. *Journal of Animal Science*, 73, 3122-3130.
- Canul, S.M., Sierra, V.A., Martínez, M.A., Ortiz, J.O., Delgado, J.V., Vega-Pla, J.L., & Pérez, G.F. (2005). Genetic characterization of the Mexican hair-less pig by means of molecular markers. *Archivos de Zootecnia*, 54, 206-207.
- Castell, A.G., & Bowland, J.P. (1968). Supplemental copper for swine: growth, digestibility and carcass measurements. *Canadian Journal Animal Science*, 48, 403-413.
- Castell, A.G., Allen, R.D., Beames, R.M., Bell, J.M., Belzile, R., Bowland, J.P., Elliot, J.I., Ihnat, M., Larmond, E., Mallard, T.M., Spurr, D.T., Stothers, S.C., Wilton, S.B., & Young, L.G. (1975). Copper supplementation of Canadian diets for growing-finishing pigs. *Canadian Journal Animal Science*, 55, 113-134.
- Cromwell, G.L., Stahly, T.S. and Monegue, H.J. (1989). Effects of source and level of copper on performance and liver copper stores in weanling pigs. *Journal of Animal Science*, 67, 2996-3002.
- Chang, K.C., Da Costa, N., Blackley, R., Southwood, O., Evans, G., Plastow, G., Wood, J.D., & Richardson, R.I. (2003). Relationships of myosin heavy chain fibre types to meat quality traits in traditional and modern pigs. *Meat Science*, 64, 93-103.
- Davis, K.G., & Mertz, W. (1987). Copper. In: W. Mertz (Ed.). Trace Elements in Human and Animal Nutrition (5th Ed). Academic Press, New York. Pp. 301-364.
- Essen-Gustavsson, B., Karlsson, A., Lundstrom, K., & Enfalt, A.C. (1994). Intramuscular fat and muscle fibre lipid contents in halo-thane-gene-free pigs fed high or low protein diets and its relation to meat quality. *Meat Science*, 38, 269-277.
- Gil, F., López-Albors, O., Vazques, J. Ma., Latorre, R., Ramirez-Zarsosa, G., & Moreno, F. (2001). The histochemical profiles of the fibres types in porcine skeletal muscle. *Histological and Histopathological*, 16, 439-442.
- Hill, G.M., Cromwell, G.L., Crenshaw, T.D., Dove, C.R., Ewan, R.C., Knabe, D.A., Lewis, A.J., Libal, G.W., Mahan, D.C., Shurson, G.C., Southern, L.L., & Veum, T.L. (2000). Growth promotion effects and plasma changes from feeding high dietary concentrations of zinc and copper to weanling pigs. *Journal of Animal Science*, 78, 1010-1018.

- Honikel, K.O. (1998). Reference methods for assessment of physical characteristics of meat. *Meat Science*, 60, 103-109.
- Hunt, M.C., Acton, J.C., Benedict, R.C., Calkins, C.R., Cornforth, D.P., & Jeremiah, L.E. (1991). AMSA guidelines for meat colour evaluation. *In: Proceedings of the 44th annual reciprocal meat conference*, 9-12 July.
- FAO. (2000). Peligra la diversidad genética de los animales de granja. <<http://www.fao.org/ag/esp/revista/0011sp2.htm>.
- Fiedler, I., Nürnberg, K., Hardge, T., Nürnber, G., & Ender, K. (2003). Phenotypic variations of muscle fiber and intramuscular fat traits in *Longissimus* muscle of F2 population DurocxBerlin miniature pig and relationships to meat quality. *Meat Science*, 63,131-139.
- Hammelman, J.E., Bowker, B.C., Grant, A.I., Forrest, J.C., Schinckel, A.P. & Gerrard, D.E. (2003). Early postmortem electrical stimulation stimulates PSE pork development. *Meat Science*, 63, 69-77.
- Henckel, P., Karlsson, A., Oksbjerg, N., & Petersen, J. (2000). Control of post mortem pH decrease in pigs muscles: Experimental design and testing of animal models. *Meat Science*, 55, 131-138.
- Honikel, K.O. (1997). Reference methods supported by OECD and their use in Mediterranean meat products. *Food Chemistry*, 9, 573-582.
- Konjufca, V.H., Pesti, G.M., & Bakalli, R.I. (1997). Modulation of cholesterol levels in broiler meat by dietary garlic and copper. *Poultry Science*, 76, 1264-1271.
- Lefaucheur, L., Dividich, Le., Mourot, J., Monin, G., Ecolan, P., & Krauss, D. (1991). Influence of environmental temperature on growth, muscle and adipose tissue metabolism, and meat quality in swine. *Journal of Animal Science*, 69, 2844-2854.
- Lemus, F.C., Mejía, A.A., Meza, C.L., & Salazar, G.G. (2002). Perfil de ácidos grasos de la grasa dorsal en las cruzas de CPM con razas comerciales. *Memorias de la VI Reunión de Investigación Científica*, Nayarit, México.
- Lim, K.S., & Paik, I.K. (2006). Effects of dietary supplementation of copper chelates in the form of methionine, chitosan and yeast in laying hens. *Asian-Australasian Journal Animal Science*, 19, 1174-1178.
- Mahan, D.C., Clint, T.R., & Richert, B. (1999). Effects of dietary levels of selenium-enriched yeast and sodium selenite as selenium sources fed to growing-finishing pigs on

- performance, tissue selenium, serum glutathione peroxidase activity, carcass characteristics, and loin quality. *Journal of Animal Science*, 77, 2172-2179.
- Méndez, D., Becerril, M., Rubio, M.S., & Delgado, E. (2002). Características de la canal del cerdo Pelón Mexicano procedente de Mizantla, Veracruz, México. *Revista Veterinaria México*, 33, 27-37.
- Montiel, R.A., López, P.M., & Méndez, M.D. (1997). Composición de la canal del Cerdo Pelón Mexicano. *Memorias XXXIII Reunión Nacional de Investigación Pecuaria*. Veracruz, México. p.183.
- Murray, R., Mayes, P., Granner, D., & Rodwell, V. (1997). Bioquímica de Harper. Ed. Manual moderno. México. pp. 65-76.
- NRC. (2012). Nutrient Requirements of Swine: Eleven Revised Edition, Subcommittee on Swine Nutrition, Committee on Animal Nutrition, National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C., USA. 400p.
- Rehfeldt, C., Stickland, N., Fiedler, I., & Wegner, J. (1999). Environmental and genetic factors as sources of variation in skeletal muscle fiber number. *Basic Applied Myology*, 9, 235-253.
- Rubio, L.M. (2013). Calidad de carne porcina, vínculo con bienestar animal. *Memorias Simposio Bayer: Bioseguridad y bienestar animal. Congreso Nacional AMVEC*. p.9.
- Ryu, Y., & Kim, B. (2006). Comparison of histochemical characteristics in various pork groups categorized by postmortem metabolic rate and pork quality. *Journal of Animal Science*, 84, 894-901.
- SAS. (2006). *User's Guide. Statistics, Version 9*. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Schiaffino, S., & Reggiani, C. (1996). Molecular diversity of myofibrillar proteins: Gene regulation and functional significance. *Physiology Review*, 76, 371-423.
- Schiavon, S., Bailoni, L., Ramanzin, M., Vincenzi, R., Simonetto, A., & Bittante, G. (2000). Effect of proteinate or sulphate mineral sources on trace elements in blood and liver of piglets. *Animal Science*, 71, 131-139.
- Sellier, P., Mejenes-Quijano, A., Penka, M., Talmant, A., Jacquet, B., & Monin, G. (1988). Meat quality as influenced by halothane sensitivity and ultimate pH in three porcine breeds. *Livestock Production Science*, 18, 171-186.
- Serra, X., Gil, F., Pérez-Enciso, M., Oliver, M.A., Vázquez, J.M., Gispert, M., Díaz, I., Moreno,

- F., Latorre, R., & Noguera, J.L. 1998. A comparison of carcass, meat quality and histochemical characteristics of Iberian (Guadyerbas line) and Landrace pigs. *Livestock Production Science*, 56, 215-223.
- Smith, R.J., & Henman, D.J. (2000). Practical experiences with bioplexes in intensive production. *In: Biotechnology in the Feed industry*. T.P. Lyons & K.A. Jacques, Ed. Proc. Alltech's 16th Annu. Symp., Nottingham Univ. Press, UK. Pp.293-300.
- Veum, T.L., Carlson, M.S., Wu, C.W., Bollinger, D.W., & Ellesieck, M.R. (2004). Copper proteinate in weanling pig diets for enhancing growth performance and reducing fecal copper excretion compared with copper sulfate. *Journal of Animal Science*, 82, 1062-1070.
- Wapnir, R. (1998). Copper absorption and bioavailability. *American Journal Clinical Nutrition*, 67, 1054S-60.
- Warris, P.D., & Brown, S.N. (1987). The relationships between initial pH, reflectance and exudation in pig muscle. *Meat Science*, 20, 65-74.
- Weiler, U., Appell, H.J., Kermser, M., Hofaker, S., & Claus, R. (1995). Consequences of selection on muscle composition. A comparative study on Gracilis muscle in wild and domestic pigs. *Anatomica, Histologica, Embryologica*, 24, 77-80.

Cuadro 1. Composición y aporte nutrimental de la dieta basal suministrada a los cerdos.

Ingrediente	(g/1000g)
Sorgo	789.0
Soya	176.0
Minerales y vitaminas ¹	30.0
Fosfato de calcio	5.0
Total	1000.0
Análisis calculado (BS)	
EM, Mcal/kg	3.5
Proteína cruda, g/100g	14.5
Extracto etéreo, g/100g	2.7
Fibra cruda, g/100g	3.4
Calcio, g/100g	0.88
Fósforo, g/100g	0.76
Cobre, ppm ²	15.0
Zinc, ppm	94.0
Hierro, ppm	204.0

¹Premezcla de minerales y vitaminas (Multitec, Malta Cleyton): Ca, 4500 g; Zn, 1.5 g; Cu, 20 g; Fe, 140 g; K, 90 g; Co, 500 g; Mg, 36 g; I, 500 mg; Se, 90 mg; Na, 125 g; Vit. A, 3000 UI/Kg; Vit. D3, 750 UI/Kg; Vit. E, 25 UI/Kg

²El experimento contempló los 15 mg de Cu kg⁻¹ MS que proveía la dieta basal, añadiendo 75, 150 y 225 mg de Cu kg⁻¹ MS para los tratamientos 1, 2 y 3; para el grupo control la concentración de Cu fue el aporte nutrimental de la dieta basal (15 mg de Cu kg⁻¹ MS)

Cuadro 2. Efecto del cobre orgánico en el crecimiento de cerdos Pelón Mexicano en etapa de finalización.

Variable	Tratamientos (mg Cu kg ⁻¹ MS)				EEM ¹	Efecto ²
	Control	DB +75	DB+150	DB+225		
PVI, kg	61.75 ^a	62.25 ^b	61.00 ^a	61.25 ^b	1.85	ns
PVF, kg	92.25 ^{ab}	99.00 ^a	93.00 ^{ab}	87.50 ^b	2.52	Q
Consumo, kg d ⁻¹	4.43 ^a	3.65 ^{ab}	3.54 ^{bc}	2.82 ^c	0.20	L
GDP, kg d ⁻¹	0.663 ^b	0.799 ^a	0.696 ^b	0.571 ^b	0.06	Q
Conversion ³	6.68 ^a	4.57 ^b	5.08 ^{ab}	4.94 ^{ab}	0.41	L

¹Error Estándar de la Media

²Polinomio: ns= no significativo, Q= Cuadrático, L=Lineal ($P < 0.05$)

³Conversión Alimenticia: Relación entre el consumo de alimento y la ganancia diaria de peso

Cuadro 3. Efecto del cobre orgánico en las características de la canal de cerdos Pelón Mexicano en etapa de finalización.

Variable	Tratamientos (mg Cu kg ⁻¹ MS)				EEM ¹	Efecto ²
	Control	DB +75	DB+150	DB+225		
Peso canal, kg	53.25 ^b	58.50 ^a	55.75 ^b	53.25 ^b	1.93	Q
Rendimiento, %	57.76 ^a	59.15 ^a	59.94 ^a	60.80 ^a	2.16	ns
³ AOCH, cm ²	32.00 ^a	33.25 ^a	35.00 ^a	33.00 ^b	3.87	ns
⁴ GD, cm	4.75 ^a	4.50 ^a	4.40 ^{ab}	4.10 ^b	0.28	L
Pérdida goteo, %	1.25 ^a	1.22 ^a	0.92 ^b	0.60 ^c	0.03	L

¹Error Estándar de la Media

²Polinomio: ns= no significativo, Q= Cuadrático, L=Lineal ($P<0.05$)

³Área de ojo de chuleta

⁴Grasa dorsal

Cuadro 4. Efecto del cobre orgánico en la calidad del músculo *Longissimus thoracis* de cerdos Pelón Mexicano en etapa de finalización.

Variable	Tratamientos (mg Cu kg ⁻¹ MS)				EEM ¹	Efecto ²
	Control	DB +75	DB+150	DB+225		
pH 45min	5.65 ^c	5.97 ^{bc}	6.03 ^b	6.62 ^a	0.03	L
pH 24 h	5.53 ^c	5.82 ^b	5.88 ^b	6.51 ^a	0.03	L
pH 48h	5.45 ^c	5.77 ^b	5.84 ^b	6.48 ^a	0.03	L
Temper.45min	14.92 ^a	14.10 ^{ab}	14.13 ^{ab}	13.83 ^b	0.39	L
L24h	33.62 ^a	33.65 ^a	34.17 ^a	37.97 ^a	1.87	ns
L48h	34.00 ^a	34.21 ^a	35.27 ^a	37.83 ^a	1.56	ns
a24h	8.65 ^a	8.66 ^a	8.05 ^a	10.36 ^a	0.78	ns
a48h	8.90 ^a	9.06 ^a	8.85 ^a	11.24 ^a	0.95	ns
b24h	3.75 ^a	3.74 ^a	3.92 ^a	5.31 ^a	0.68	ns
b48h	4.57 ^{ab}	4.83 ^{ab}	4.01 ^b	7.23 ^b	0.49	Q
C *24h	8.75 ^a	9.45 ^a	8.97 ^a	11.68 ^a	0.62	ns
C*48h	10.12 ^a	10.41 ^a	9.79 ^a	13.44 ^a	0.86	ns
h 24h	22.25 ^b	23.00 ^b	26.19 ^a	28.31 ^a	0.13	L
h 48h	27.25 ^{ab}	28.49 ^{ab}	23.59 ^b	32.59 ^a	0.20	Q

¹Error Estándar de la Media

²Polinomio: ns= no significativo, Q=Cuadrático, L=Lineal ($P<0.05$)

Cuadro 5. Efecto del cobre orgánico en la composición del tipo de fibras musculares del *Longissimus thoracis* en el cerdo Pelón Mexicano en etapa de finalización.

Variable	Tratamientos (mg Cu kg ⁻¹ MS)				EEM ¹	Efecto ²
	Control	DB +75	DB+150	DB+225		
Fibras musculares (Número/mm²)						
Total	287.5 ^a	285.0 ^a	290.7 ^a	253.8 ^a	17.4	ns
Tipo I	82.5 ^a	77.2 ^a	56.7 ^b	31.3 ^c	5.4	L
Tipo IIA	63.5 ^a	63.0 ^a	64.0 ^a	69.5 ^a	2.8	ns
Tipo IIB	141.5 ^b	144.8 ^b	170.0 ^a	153.0 ^b	12.7	Q
Composición del tipo de fibra (%)						
Tipo I	28.7 ^a	27.1 ^b	19.5 ^b	12.3 ^c	3.8	L
Tipo IIA	22.1 ^a	22.1 ^a	22.0 ^a	27.4 ^a	2.5	ns
Tipo IIB	49.2 ^a	50.8 ^a	58.5 ^a	60.3 ^a	4.3	ns
Área promedio de las fibras (µm²)						
Tipo I	1290.8 ^b	1317.8 ^b	1657.0 ^a	1640.0 ^a	199.2	L
Tipo IIA	1115.4 ^b	1116.4 ^b	1472.6 ^a	1524.3 ^a	223.6	L
Tipo IIB	2800.1 ^a	3014.1 ^a	2756.4 ^b	2472.6 ^c	222.7	Q
Área relativa ocupada (µm²)						
Tipo I	24.0 ^a	21.6 ^a	15.2 ^b	10.8 ^c	6.7	L
Tipo IIA	2.5 ^b	2.9 ^b	5.4 ^b	17.6 ^a	1.1	L
Tipo IIB	73.5 ^a	75.5 ^a	79.4 ^a	71.6 ^a	3.3	ns

¹Error Estándar de la Media

²Polinomio: ns= no significativo, Q= Cuadrático, L=Lineal ($P < 0.05$)

^{abc}Medias con distinta literal en la misma hilera son diferentes ($P < 0.05$)

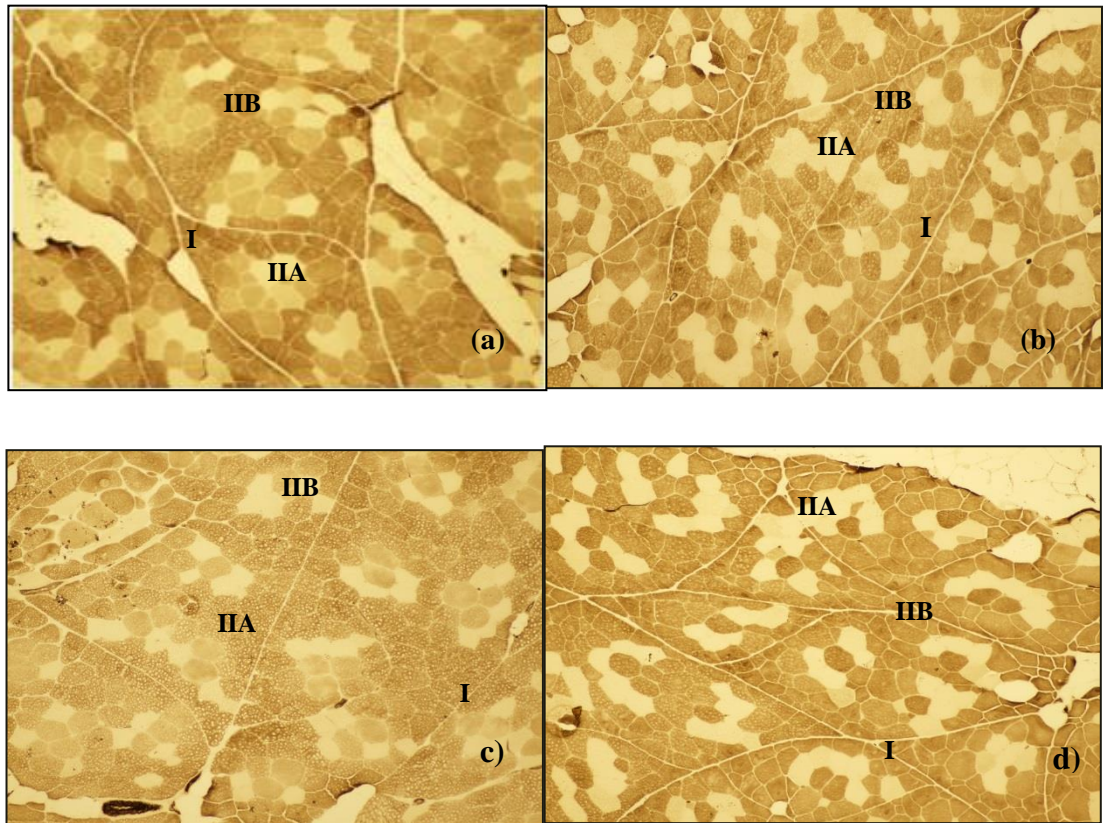


Figura 1. Fotografías (10x) que muestran los tres tipos de fibras musculares (I, IIA y IIB) en corte transversal del *Longissimus thoracis*, tinción con la técnica de ATPasa miosinica ácida, de cerdos Pelón Mexicano en finalización suplementados con 0 a), 75 b), 150 c) y 225 d) mg de Cu kg⁻¹ MS, como proteinato de cobre, en la dieta.

5. CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN GENERAL

La realización de presente proyecto de investigación, como requisito para obtener el grado de doctora en ciencias, en las condiciones, materiales y métodos utilizados, para evaluar el efecto de suplementar cobre, de proteinato de Cu, adicionado en la dieta de cerdos F1 Landrace X Duroc y cerdos Pelón Mexicano en etapa de finalización, permitió emitir las siguientes conclusiones:

- En el primer experimento, la adición de proteinato de Cu a la dieta mejoró el crecimiento y la eficiencia alimenticia de los cerdos en etapa de finalización, las hembras mostraron mayor área de ojo de chuleta, en tanto que los machos que consumieron el Cu tuvieron menor depósito de grasa dorsal, por lo tanto, el Cu mejoró las características de la canal. Además, El Cu aumentó el rendimiento de cortes primarios de la canal y redujo la pérdida de agua en la carne; el aumento de la dosis de Cu también influyó en el pH del músculo y se redujeron los índices de coloración a* y b* del músculo *Longissimus thoracis*, por lo tanto, el Cu mejoró la calidad de la carne de los cerdos.
- En el segundo estudio, el Cu mejoró el crecimiento y peso de la canal de los cerdos Pelón Mexicano; también redujo la grasa dorsal en la canal, así como la pérdida de agua en la carne, pero aumentó el pH de la carne en 45 min post mortem; con respecto al estudio histoquímico, el Cu influyó en la composición de los tipos de fibras musculares I, IIA y IIB del músculo *Longissimus thoracis*, por lo tanto, los cambios causados por el Cu pueden mejorar los parámetros de calidad de la carne.

6. CAPÍTULO VI. ANEXOS

6.1 Anexo 1. Memorias en congresos: LI Reunión Nacional de Investigación Pecuaria 2015. Toluca, Estado de México.



6.2 Anexo 2. Artículo científico publicado en la revista: Tropical and Subtropical Agroecosystems



The screenshot displays the homepage of the journal "Tropical and Subtropical Agroecosystems". At the top left is the UADY logo with the text "UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN" and the motto "Verdad, Ciencia y Vida". To its right, the text reads "Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias" and "Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia". The journal's logo, featuring a globe, is on the top right. A navigation menu includes links for HOME, ABOUT, LOGIN, REGISTER, SEARCH, CURRENT, and ARCHIVES. On the left side, there are sections for "Journal Help", "LANGUAGE" (with a dropdown menu set to "English" and a "Submit" button), and "FONT SIZE" (with icons for A+, A, and A-). The main content area shows "ANNOUNCEMENTS" and a breadcrumb "Home > Vol 20, No 2 (2017)". The journal title "Tropical and Subtropical Agroecosystems" is prominently displayed, followed by a description: "The Journal is an international peer-reviewed publication devoted to disseminate all information contributing to the understanding and development of agroecosystems in tropical and subtropical areas." Below this, there is an "Announcements" section, a "Previous Issues" section with a link to "Journal previous issues (Vol. 1-9)" and a "Posted: 2008-05-19" date, and a "More Announcements..." link. At the bottom, there are links for "Vol 20, No 2 (2017): (May - August)", "Table of Contents", and "Cover".



EFFECTO DE LA INCLUSIÓN DE PROTEINATO DE COBRE EN LA DIETA SOBRE EL COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO, LAS CARACTERÍSTICAS DE LA CANAL Y LA CALIDAD DE LA CARNE DE CERDOS EN FINALIZACIÓN*

[EFFECT OF COPPER PROTEINATE INCLUSION IN FOOD ON GROWTH PERFORMANCE, CARCASS TRAITS AND MEAT QUALITY OF FINISHING PIGS]

M.B. Colín-Álvarez¹, I.A. Domínguez-Vara^{1*}, J.L. Bórquez-Gastelum¹, J.A. Partida-De la Peña², J.E. Sánchez-Torres¹, E. Morales Almaraz¹ and D. Trujillo-Gutiérrez¹

¹Departamento de Nutrición Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México, Campus Universitario "El Cerrillo", Toluca, Estado de México. Email: tgy92@hotmail.com

²Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal, INIFAP, México.

*Corresponding author

RESUMEN

El objetivo fue evaluar el efecto de incluir 0, 75, 150 y 225 mg de proteinato de cobre .kg⁻¹ MS (P-Cu) en el alimento sobre el crecimiento, las características de la canal y la calidad de carne de cerdos para abasto. Se emplearon 24 porcinos (12 hembras y 12 machos), peso inicial 60.3±0.55 kg, alimentados con dieta basal (DB) durante 46 días, distribuidos en un diseño completamente aleatorizado, factorial 4x2 (niveles de P-Cu y sexo): T1=DB (0 mg de P-Cu kg⁻¹ MS), T2=DB+75 mg de P-Cu, T3=DB+150 mg de P-Cu y T4=DB+225 mg de P-Cu. La dosis de 225 mg de P-Cu mejoró la ganancia de peso (GDP) y la eficiencia alimenticia (EFA) (P<0.05). El P-Cu aumentó el área de chuleta (ACH) en hembras y redujo la grasa dorsal (GD) en machos (P<0.05). El P-Cu aumentó (12.6%) el rendimiento de cortes primarios (RCP) (P<0.05). En T3 y T4 se redujo la pérdida de agua 58.5 y 82.2% (P<0.05). El P-Cu afectó (P<0.01) el pH final y el índice a* (P<0.05) del músculo *Longissimus thoracis*. En conclusión, el P-Cu mejoró la GDP, la EFA, el ACH y el RCP, y redujo la GD en la canal.

Palabras clave: Proteinato de Cobre; Porcinos; Características de Canal; Calidad de carne.

SUMMARY

The objective was to evaluate the effect of including 0, 75, 150 and 225 mg Cu kg⁻¹ MS of copper proteinate (P-Cu) in the feed on growth, carcass characteristics and meat quality of pigs for market. Twenty four pigs (12 females and 12 males) were used, initial weight 60.3±0.55 kg, fed with basal diet (BD) during 46 days, distributed in a completely randomized design, factorial 4x2 (levels of P-Cu and sex): T1=DB (0 mg of P-Cu kg⁻¹ MS), T2=DB+75 mg of P-Cu, T3=DB+150 mg of P-Cu and T4=DB+225 mg of P-Cu. The dose of 225 mg of P-Cu increased the daily weight gain (DWG) and the feed efficiency (FE) (P<0.05). The P-Cu increased the area of chop (CHA) in females and reduced the back fat (BF) in males (P<0.05). The P-Cu increased (12.6%) the yield of primary cuts (YPC) (P<0.05). In T3 and T4 the water loss was reduced 58.5 and 82.2% (P<0.05). The P-Cu affected (P<0.01) the final pH and the a* index (P<0.05) of the *Longissimus thoracis* muscle. In conclusion, the P-Cu improved the DWG, the FE, the CHA and the YPC, and reduced the BF in the carcass.

Key words: Copper proteinate; Pigs; Carcass traits; Meat quality.

† Submitted April 19, 2018 – Accepted March 12, 2019. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International license.
ISSN: 1870-0162

INTRODUCCIÓN

El Cobre es un elemento importante en muchos procesos fisiológicos por que interviene en la regeneración de células dañadas por radicales libres, interviene en la síntesis de hemoglobina, elastina, mielina y colágeno. En general, concentraciones de 5 a 25 mg de Cu kg⁻¹ MS en la dieta cubren los requerimientos de cerdos para estos procesos (NRC, 2012). Sin embargo, cuando se suministran cantidades mayores (100 a 250 mg de Cu kg⁻¹ MS) este micro mineral mejora el crecimiento de los cerdos (Cromwell *et al.*, 1989; Dove, 1993; Hill *et al.*, 2000; Hill and Spears, 2001), reduce la grasa en la canal y aumenta el contenido de ácidos grasos insaturados en la carne (Amer y Elliot, 1973; Pettigrew and Esnaola, 2001); no obstante, la respuesta disminuye con la edad y con el suministro durante períodos prolongados (Hastad *et al.*, 2001). Por otro lado, la absorción del Cu en el intestino es baja y varía dependiendo de la fuente (inorgánico u orgánico), el Cu inorgánico se absorbe poco, de 0.5 a 4.0% (Wapnir, 1998); mientras que, el Cu orgánico tiene una mayor absorción y retención tisular. En este sentido, el proteinato de cobre es un quelato orgánico que resulta de la unión de una sal de cobre soluble con aminoácidos. Esto lo hace más biodisponible y bioactivo reduciendo su eliminación hacia el ambiente (Murray *et al.*, 1997; Sciavon *et al.*, 2000). Son pocos los estudios que han evaluado el efecto de dosis altas de Cu orgánico sobre la respuesta en el crecimiento y la calidad de la carne de cerdos para el abasto, por lo que el objetivo del presente estudio fue evaluar la eficiencia en el crecimiento, las características de la canal y la calidad de la carne de cerdos en finalización suplementados con proteinato de Cu en la dieta.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Comité de Bioética y Bienestar Animal de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma del Estado de México revisó y aprobó el estudio, el cual se realizó en la Unidad Experimental en Producción Animal de la misma Institución, localizada en el Campus Universitario "El Cerrillo", Toluca, México. Los procedimientos de manejo de los cerdos se realizaron según los lineamientos oficiales para el cuidado de los animales en México (SAGARPA, 1995); cuidado humanitario del animal durante la movilización (SAGARPA, 2014), sacrificio de animales domésticos y silvestres.

Animales, manejo y tratamientos.

Un total de 24 cerdos (12 hembras y 12 machos castrados) F1 Landrace X Duroc, con 60.3±0.55 kg PV y 120±4 días de edad fueron alojados individualmente en corraletas de piso elevado, con

dimensiones de 1.5x2 m, equipados con bebedero y comedero automáticos. El periodo experimental duró 61 días, de los cuales 15 se consideraron para la adaptación a una dieta basal que cubrió los requerimientos nutricionales (NRC, 2012) (Tabla 1) y 46 fueron de evaluación. Previo al inicio el estudio, los cerdos fueron vitaminados con 1 mL de vitaminas A, D y E (Vigantol; Bayer, México) y desparasitados con 0.5 mL de ivermectina (laboratorio Sanfer, México). Los cerdos fueron pesados de forma individual y asignados al azar a los tratamientos, bajo un diseño experimental completamente aleatorizado, factorial 4x2 (4 niveles de P-Cu y machos y hembras). Los tratamientos fueron: T1=DB (0 mg proteinato de Cu (P-Cu) kg⁻¹ MS), T2=DB+75 mg P-Cu kg⁻¹ MS, T3=DB+125 mg P-Cu kg⁻¹ MS, T4=DB+225 mg P-Cu kg⁻¹ MS. El P-Cu se suministró diariamente a través de la premezcla (Bioplex Cu, Alltech, Inc., Nicholasville, KY[®]) que contiene 1000 mg de Cu kg⁻¹ MS, dispersada con la técnica "top dressing", extendiendo el producto sobre el alimento para asegurar su consumo de la dosis diaria.

Tabla 1. Ingredientes usados y composición nutricional de la dieta basal suministrada a los cerdos.

Ingrediente/Composición química	(g kg ⁻¹ MS)
Sorgo molido	789.0
Soya	176.0
Premezcla de minerales y vitaminas ¹	35.0
Fosfato de calcio	5.0
Total	1000.0
Análisis calculado (% BS)	
EM, Meal kg ⁻¹ MS	3.4
Proteína cruda, g/100g	14.2
Extracto etéreo, g/100g	2.9
Fibra cruda, g/100g	3.5
Calcio, g/100g	0.85
Fósforo, g/100g	0.75
Cobre, ppm ²	15.0
Zinc, ppm	35.0
Hierro, ppm	50.0


¹Premezcla de minerales y vitaminas (Multitec, Malta Cleyton): Ca 4500 g; Zn 1.5 g; Fe 140 g; K 90 g; Co 500 g; Mg 36 g; I 500 mg; Se 90 mg; Na 125 g; Vit. A 3000 UI/Kg; Vit. D3 750 UI/Kg; Vit. E 25 UI/Kg.

²La dieta basal aportó 15 mg Cu kg⁻¹ MS.

Comportamiento animal.

La dieta se suministró a libre acceso, pesando y registrando el alimento ofrecido y rechazado diariamente para calcular el consumo de materia seca (CMS). Se colectaron muestras de alimento dos veces por semana, cada muestra se secó en estufa de aire forzado a 60 °C durante 24 h para analizar su


6.3 Anexo 3. Artículo científico enviado a la revista: Canadian Journal Animal Science



Canadian Journal of Animal Science

Growth performance, carcass traits, meat quality and muscle fiber composition in Mexican Hairless finishing pigs supplemented with organic copper

Journal:	Canadian Journal of Animal Science
Manuscript ID:	CJAS-2020-0135
Manuscript Type:	Article
Date Submitted by the Author:	13-Aug-2020
Complete List of Authors:	<p>Colín-Álvarez, Beatriz Meliza; Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Departamento de Nutrición Animal</p> <p>Domínguez-Vara, Ignacio Arturo; Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Departamento de Nutrición Animal</p> <p>Trujillo-Gutiérrez, Daniel; Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Departamento de Nutrición Animal</p> <p>Bórquez-Gastelum, José Luis; Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia</p> <p>Sanchez-Torres, Juan Edrei; Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Departamento de Nutrición Animal</p> <p>Morales-Almaraz, Ernesto; Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Departamento de Nutrición Animal</p> <p>Jiménez, Roberto; Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia</p> <p>Oliván, María Carmen; 2Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario, SERIDA</p> <p>Juan Manuel, Pinos-Rodríguez; Universidad Veracruzana, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia</p> <p>Grageola-Núñez, Fernando; Universidad Autónoma de Nayarit, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia</p>
Keywords:	Copper, pigs, performance, carcass, meat



<https://mc.manuscriptcentral.com/cjas-pubs>

1 Colin-Álvarez et al. Organic copper in Mexican Hairless finishing pigs
2
3 **Growth performance, carcass traits, meat quality and muscle fiber composition in Mexican**
4 **Hairless finishing pigs supplemented with organic copper**

5
6 B.M. Colin-Álvarez¹, I.A. Domínguez-Vara^{1*}, D. Trujillo-Gutiérrez¹, J.L. Bórquez-
7 Gastelum¹, J.E. Sánchez-Torres¹, R. Montes de Oca-Jiménez¹, C. Oliván-García², J.M.
8 Pinos-Rodríguez³, and F. Grageola-Núñez⁴

9 ¹Departamento de Nutrición Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad
10 Autónoma del Estado de México, Campus Universitario "El Cerrillo", Toluca, Estado de México,
11 50090.

12 ²Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario, SERIDA, Villaviciosa,
13 Asturias, España, 13, 33300.

14 ³Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Veracruzana, Veracruz, México,
15 91710.

16 ⁴Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Nayarit,
17 Ciudad de la Cultura "Amado Nervo", Compostela, Nayarit, México, CP. 63155.

18 *Correspondence author: lgv92@hotmail.com

19 Departamento de Nutrición Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad
20 Autónoma del Estado de México, Campus Universitario "El Cerrillo", Toluca, Estado de México,
21 México, C.P. 50090.

22 **Abstract**

23 Twenty four barrows (62±5.2 kg BW) were randomly assigned to dietary five levels of Cu (0, 75,
150 24 and 225 mg kg⁻¹ DM) with the aim to evaluate the effects of Cu proteinate supplementation on

1

<https://mc.manuscriptcentral.com/cjas-pubs>

25 DMI, DWG, FC, FE, carcass traits, meat quality and composition of muscle fibers of MHP. The
26 DMI was reduced linearly ($P \leq 0.05$) as Cu level supplementation increased in the diet. Growth
27 performance was modified quadratically as Cu level supplementation increased in the diet, where
28 the highest DWG and the lowest FC values were found in barrows supplemented with 75 mg Cu
29 kg^{-1} DM. Barrows supplemented with 75 and 150 mg Cu kg^{-1} DM had the highest ($P \leq 0.05$) CW
30 and LEA than the other treatments. BFT and DL decreased linearly ($P \leq 0.05$) as Cu
31 supplementation increased in the diet. The Cu supplementation affected ($P \leq 0.05$) the color index
32 *b* and *h* after 48h. The Cu affected ($P \leq 0.05$) the number, composition and relative area of the type
33 I, IIA and BII fibers of the *LT*. It is concluded that Cu supplementation improved the DWG, FC,
34 FE, BFT, DL, and composition of muscular fibers.

35 **Key words:** Copper, pigs, performance, carcass, meat, muscle fibers, histochemistry.

36 **Abbreviations:** Cu, copper; MHP, Mexican Hairless Finishing Pigs; DMI, dry matter intake; FC,
37 feed conversion; FE, feed efficiency; DM, dry matter; DWG, daily weight gain; BD, basal diet;
38 CW, carcass weight; LEA, loin eye area; BFT, backfat thickness; DL, drip loss; BW, body
39 weight; *LT*, *Longissimus thoracis*; FBW, final body weight; CCD, chilled carcass dressing; FA,
40 fatty acids; UFA, unsaturated fatty acids; DFD, dark firm dry; PSE, pale soft exudative.

41 **Introduction**

42 The nutritional composition of meat swine is often related to cardiovascular diseases due to
43 its high fat content, saturated fatty acids and cholesterol. Studies have demonstrated how to
44 improve through of the pig diet, the quality of the meat, and fatty acids (FA) profiles to make it
45 healthier (Mahan et al. 1999). The factors related to diet influence the oxidation of lipids, the
46 degree of unsaturation in the ingested lipids and the content of antioxidants (Buckley et al. 1995).

47 Copper (Cu) is an essential micronutrient, it participates in different biochemical pathways
48 and functions (Davis and Mertz, 1987); as a metal ion, it catalyzes lipid peroxidation (Apte and