



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**"CONTENIDO Y BIODISPONIBILIDAD DE MINERALES
TRAZA (Cu, Fe, Mn y Zn) EN LA CARNE DE CERDO"**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICO DE ALIMENTOS

PRESENTA

FELIPE DE JESÚS LÓPEZ RIOS



CIUDAD DE MÉXICO

AÑO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: EDUARDO MENDOZA MARTÍNEZ

VOCAL: ILIANA ELVIRA GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

SECRETARIO: LUIS HUMBERTO LÓPEZ HERNÁNDEZ

1er. SUPLENTE: EVERARDO TAPIA MENDOZA

2° SUPLENTE: JUAN CARLOS RAMÍREZ OREJEL

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DISCIPLINARIAS EN FISIOLOGÍA Y MEJORAMIENTO ANIMAL, DEL INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS. LABORATORIO CARNES. AJUCHITLÁN, COLÓN, QUERÉTARO.

ASESOR DEL TEMA:

M. EN B LUIS HUMBERTO LÓPEZ HERNÁNDEZ

SUPERVISOR TÉCNICO:

M. EN C. JUAN CARLOS RAMÍREZ OREJEL

SUSTENTANTE: FELIPE DE JESÚS LÓPEZ RIOS

ESTE TRABAJO FORMA PARTE DEL PROYECTO "EFECTO DE LA FUENTE DE MINERALES EN LA PROTECCIÓN ANTIOXIDANTE DE LA CARNE Y LA REGULACIÓN DE PROTEÍNAS ASOCIADAS A ESTRÉS DURANTE EL SACRIFICIO Y LA TRANSFORMACIÓN DE MÚSCULO A CARNE EN CERDOS" APOYADO POR ALLTECH DE MÉXICO, S.A. DE C.V. Y POR EL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA EN FISIOLOGÍA Y MEJORAMIENTO ANIMAL, ORGANISMO DEPENDIENTE DEL INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS DE LA SECRETARÍA DE AGÍCULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN.

AGRADECIMIENTOS

A **Mi Familia (Linda, Felipe, Mailo y Aranza)** por brindarme todo su apoyo, soportar mi mal humor, mi estrés, sarcasmo y que a pesar de las adversidades siempre confiaron en mí y me impulsaron a seguir adelante.

A mi hermosa **Universidad Nacional Autónoma de México** y a mi querida **Facultad de Química**, por brindarme varios de los mejores años de mi vida como estudiante, donde viví experiencias buenas y malas, adquirí conocimientos indispensables para la vida, porque me otorgó la oportunidad de conocer personas increíbles y me ayudó a formarme como persona y profesional.

Al **M. en C. Juan Carlos Ramírez Orejel**, por aceptarme en su plantilla de trabajo, por brindarme su confianza, apoyo y conocimiento, **Juanito** te admiro mucho por tu forma de compartir tu conocimiento con los alumnos, por ser un amigo y siempre tener esa paciencia para explicar y resolver problemas, gracias por apadrinarme, brindarme tu apoyo incondicional y guiarme en la última fase de la carrera las cuales me ayudaron a crecer como estudiante y persona.

A **AllTech México, S.A. de C.V.**, por financiar y hacer posible este proyecto y al **M. en B. Luis Humberto López Hernández**, porque me acepto en su equipo de trabajo, me brindo la confianza y el apoyo tanto académico como moral para poder llevar a cabo este proyecto. Gracias por los consejos, regaños, desveladas y sobre todo paciencia, en verdad muchas gracias por esta gran oportunidad y experiencia.

A mis otros papás **Doña Marce y Don Memo** que fueron un pilar en este trayecto de mi vida, que siempre me brindaron su apoyo y amor incondicionalmente, porque me robaron sonrisas y crearon momentos chéveres que nunca olvidare de la carrera. Estoy eternamente agradecido con ustedes y sé que no basta con decirles gracias por todo lo que hicieron por mí, los aprecio y quiero mucho son unas personas increíbles.

A mis hermanas preciosas **Viann, Adri y Cintli** que siempre estuvieron en las buenas y en las malas, gracias por aconsejarme, escucharme, soportarme, por robarme sonrisas, por las charlas y chismes interminables, por planes locos y absurdos además de hacer más amena mi vida en la facultad.

A mis hermanos **Mena y Néstor** que de igual manera me apoyaron en todo momento y nunca me dejaron caer, gracias por sus regaños sarcásticos y su inigualable forma de aterrizar mis pies en la tierra.

A mi hermana mayor **Cynthia** que no se tentaba el corazón para decirme las cosas, que siempre me hizo entrar en razón y brindo su amor, su apoyo incondicionalmente, por hacerme reír incontablemente en clases aunque me regañaran.

A **Sarita** mi compañera guerrera desde primer semestre, mi mejor equipo académico y para hacer tonterías, quien soportó todas mis quejas, sarcasmos, chistes, quien me acompañó en incontables desveladas, infinitas gracias por estos años en la facultad.

A mi otra familia que forme durante toda la carrera en los salones de clases y laboratorios: **Jocelyn Villalpando, Daniela Moreno, Jimena Segundo, Nicole Vargas (Nicky), Natalia LaFontaine, Montserrat González, Nadia, Fer, Silvia, Pato, Dany Zavalza y La Familia Ternurín: Nadia, Anita, Paco, Migue.**

A mis amigos que conocí en Ajuchitlán: **Sam, Marín, Isa, Diego, Mayra, Dennis, Dany, Enóc, René**, por hacer mi estadía de lo más chevere y compartir momentos inolvidables, me llevo cosas increíbles de cada uno de ustedes.

A mis amigos de la prepa, que a pesar de la distancia sé que aún puedo contar con ustedes: **Roberto, Charly, Chad, Brenda, Ana y Fanny.**

ÍNDICE

1. Resumen	1
2. Introducción.....	2
2. Marco teórico	4
2.1 Producción de la carne de cerdo.....	4
2.2 Composición química de la carne	7
2.2.1 Carbohidratos	7
2.2.2 Lípidos	8
2.2.3 Proteínas.....	10
2.2.4 Vitaminas.....	12
2.2.5 Nutrientes inorgánicos	13
2.3 Elementos traza inorgánicos.....	15
2.4 Biodisponibilidad de los nutrientes inorgánicos en el ser humano	23
2.5 Determinación cuantitativa de minerales	24
2.5.1 Espectrometría atómica	26
2.5.2 Espectroscopía de absorción atómica	28
2.5.3 Inducción de plasma acoplado a espectroscopía de absorción atómica (ICP-AES)	29
3 Hipótesis	31
3.1 Objetivo general	31
3.1.2 Objetivos específicos	31
4. Metodología	32
4.1 Producción de la carne	33
4.1.1 Tratamientos aplicado a los cerdos	33
4.1.2 Calidad en carne fresca.....	34

4.1.2.1 pH y Temperatura	34
4.1.2.2 Color	34
4.1.2.3 Pérdida de agua por goteo.....	34
4.1.2.4 Capacidad de retención de agua (CRA).....	35
4.2 Establecimiento del método de digestión.....	35
4.2.1 Digestión por horno de microondas	35
4.3 Biodisponibilidad de los minerales en la carne	36
4.4 Lectura de minerales por ICP-AES	36
4.5 Análisis estadístico	37
5. Resultados y Discusión	38
6. Conclusiones	50
7. Referencias	51

Resumen

Para el presente estudio se utilizaron cortes de *Longissimus dorsi* (lomo de cerdo), provenientes de un grupo de 84 cerdos (misma genética, alimentación controlada, peso y edad) dónde la duración experimental en granja fue de 84 días. La matanza se realizó en rastro TIF empacando los cortes en charolas de poliestireno cubiertos por una película permeable al oxígeno.

Se realizaron tres tratamientos en la alimentación de los porcinos: Trt 1 fue una dieta basal adicionando nutrimentos inorgánicos (Cu, Fe, Mn y Zn) de fuente orgánica al 50% de los requerimientos nutricionales, Trt 2 se suministró los mismos nutrimentos inorgánicos y la misma fuente orgánica pero excediendo el 100% de los requerimientos nutricionales y para el Trt 3 se suministró de igual manera que en el Trt 2 pero la fuente fue inorgánica. Posterior a la matanza se llevo a cabo las pruebas de calidad las cuales fueron: pH, temperatura, capacidad de retención de agua, color y pérdida de peso por goteo; una vez hechas las pruebas de calidad se cuantificaron los nutrimentos inorgánicos mediante un equipo de espectrometría de absorción atómica de acoplamiento a plasma inductivo (ICP-AES). Entre fuente de mineral (al nivel mayor de inclusión), no se encontraron diferencias ($P > 0.15$). Las medias para las variables fueron: $T = 6.49$ °C, $pH = 5.58$, $L^* = 57.48$, $a^* = 8.05$, $b^* = 16.13$, $PPG_{24} = 4.63\%$, $PG_{48} = 7.07\%$ y $CRA = 13.34\%$. La composición de minerales totales en la carne, existe significancia entre tratamientos para los cuatro minerales ($P < 0.0001$), al analizar por fuente no presentó diferencias en los cuatro minerales ($P > 0.93$). Entre tratamientos existe significancia en la biodisponibilidad ($P < 0.0001$) en todos los minerales, por fuente solo existe significancia ($P < 0.0001$) para Fe y Zn.

1 Introducción.

Los nutrimentos inorgánicos en ingredientes convencionales son a menudo de mayor concentración que los requerimientos para cerdos (NRC, 1998), aunque poseen una biodisponibilidad baja; mientras que los proteínatos (fuente orgánica) de estos nutrimentos pueden ser suficientes al 50% de las recomendaciones. El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de los niveles de Cu, Fe, Mn y Zn provenientes de fuentes inorgánicas y orgánicas, en la calidad de carne y su biodisponibilidad de estos nutrimentos mediante una técnica *in vitro*, con la finalidad de corroborar que para tener una producción animal eficiente se requiere de buenas prácticas desde la alimentación (lo que incluye el desarrollo e instrumentación de dietas de acuerdo a sus necesidades), para obtener así como producto final una carne saludable, de buena calidad y de valor agregado sin la necesidad adición de nutrimentos.

México ha logrado incrementar considerablemente el consumo per cápita por año de carne de cerdo, de 15.1 kg en 2007 a 16.6 kg al año 2014 (SAGARPA, 2014). En la actualidad, la producción de carne de cerdo va en constante crecimiento, en el año 2016, SAGARPA informó que la carne de cerdo está en tercer lugar de consumo por la población mexicana. Aunado a lo anterior la industria cárnica ha buscado opciones para obtener carne con valor agregado, incorporando erróneamente vitaminas y nutrimentos inorgánicos en exceso a las dietas de los animales. Hoy en día la producción animal eficiente requiere buenas prácticas que incluyen una alimentación adecuada (desarrollo e instrumentación de dietas de acuerdo a sus necesidades), cuidado de la salud, la selección y desarrollo de estirpes adaptadas a los entornos específicos de producción. Tradicionalmente, el requerimiento de los micro nutrimentos y principalmente los traza (Cu, Fe, Mn, Zn, Se, Ni, Co) en la alimentación porcina, se ha logrado cubrir mediante la adición de sales inorgánicas simples (sulfatos, fosfatos u óxidos) por arriba

de los requerimientos mínimos. En condiciones fisiológicas normales y con la ingesta adecuada, sólo del 5 al 15% de nutrimentos como Cu, Fe, y Zn de la dieta son absorbidos, mientras que para el Mn la biodisponibilidad es mucho más baja (McDowell, 2003). Debido a la biodisponibilidad relativamente baja de estos minerales traza, un alto porcentaje es excretado al suelo y al agua, lo que provoca serias preocupaciones ambientales (Kornegay y Vestergen, 2001). Las fuentes orgánicas de minerales traza (aunque erróneamente llamados), que son minerales unidos a proteínas o péptidos tienen una mejor biodisponibilidad en comparación con las sales inorgánicas.

Para el ser humano, la cantidad de minerales que se requiere es del orden de miligramos o microgramos diariamente, por lo que son llamados minerales traza, por lo cual se buscan distintas formas de adquirirlos o cubrir los requerimientos mediante los alimentos. Se ha demostrado que la carne de cerdo puede ser un excelente vehículo de nutrimentos que dará un valor agregado al producto.

A lo largo del tiempo, la carne ha sido considerada como un alimento de estatus socio-económico. Por su aporte de proteínas de alto valor biológico, lípidos, vitaminas y nutrimentos inorgánicos, es considerado un excelente alimento para la nutrición humana. Además, provee energía por su contenido de lípidos y una característica muy importante es el aporte de vitaminas del complejo B, y ciertos nutrimentos inorgánicos como hierro, zinc, cobre y fósforo de alta biodisponibilidad. Los nutrimentos presentes en la carne pueden ser parcialmente constantes dentro de cada especie animal y ligeramente diferente entre especies; dentro de la misma especie las variaciones son atribuidas a la región anatómica, la edad, el género y la alimentación (Lawrie,2006).

Durante el proceso de transformación a carne, hay ligeros cambios en la composición que pueden modificar los sistemas propios del músculo e impactar en sus características fisicoquímicas, sensoriales y en su estabilidad oxidativa. Algunos de estos cambios pueden ser debidos de acuerdo a moléculas que se usan en la nutrición animal como herramienta.

2 Marco teórico.

2.1 Producción de la carne de cerdo.

La producción de carne de cerdo en México (Figura 1.) creció a una tasa promedio anual de 2.2% durante la década reciente, y se estima que en 2017 se ubique en 1.43 millones de toneladas, lo que significaría un crecimiento anual de 3.8% y su nivel más alto desde 1984. Por otra parte, el consumo nacional de carne de cerdo (Figura 2.) presenta una tendencia creciente, y se prevé que se mantenga durante el 2017, para ubicarse en un máximo histórico de 2.11 millones de toneladas, lo que representa un crecimiento anual de 4.3%. Durante la década reciente las exportaciones mexicanas de carne de cerdo crecieron a una tasa promedio anual de 8.1%, para ubicarse en 105 mil toneladas, equivalente al 8.0% de la producción nacional. México cuenta con una participación del 1.3% de la producción mundial, por lo que se ubica en el noveno lugar de producción mundial, avanzando nueve lugares durante la última década (FIRA, 2017).

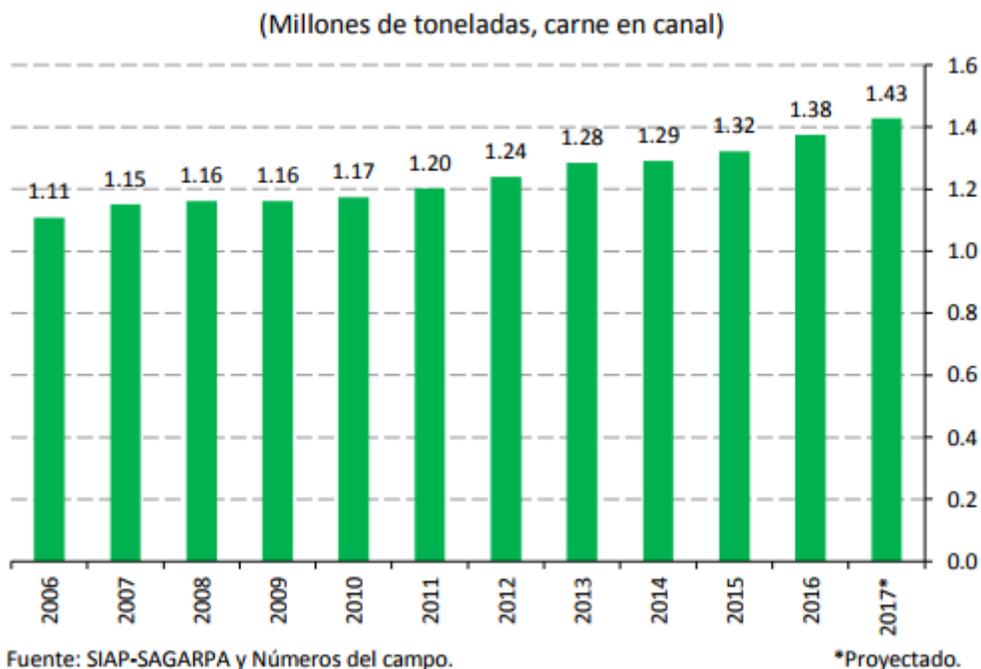


Figura 1. Producción de carne de cerdo en México, 2006-2017.

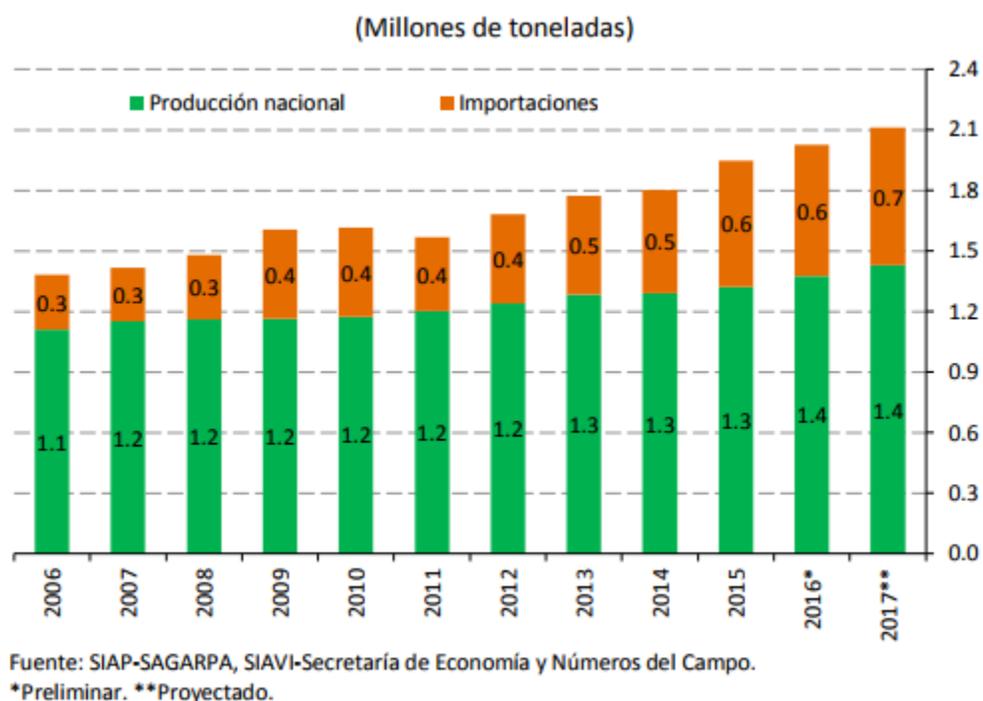


Figura 2. Consumo aparente de carne de porcino en México, 2006-2017.

Por su parte, las importaciones (Figura 3.) crecieron a una tasa promedio anual del 9.0% en el período 2006-2016, para situarse en 754.7 miles de toneladas. Así, se registró un saldo deficitario por 649.7 miles de toneladas. El déficit comercial de este tipo de carne se ha incrementado durante la última década, ya que en 2006 fue de 273.5 miles de toneladas. Para 2017, se espera que las importaciones crezcan a una tasa anual del 6.0%, mientras que las exportaciones registran un incremento anual del 10.0%. Actualmente, las importaciones netas de carne de cerdo representan el 32.0% del consumo nacional (FIRA, 2017).

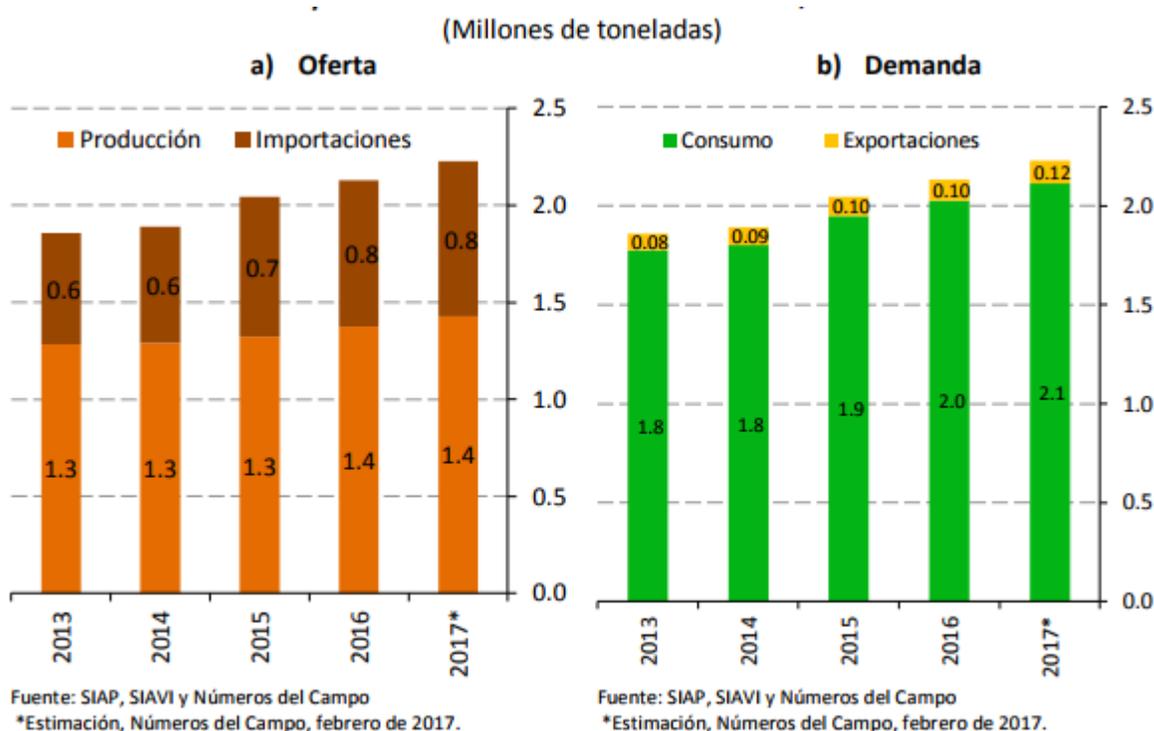


Figura 3. Oferta y demanda de carne porcina en México, 2013-2017.

2.2 Composición química de la carne.

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-009-ZOO-1994, Proceso sanitario de la carne, el concepto de carne está definido como: La estructura compuesta por fibra muscular estriada, acompañada o no de tejido conjuntivo elástico, grasa, fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos, de las especies animales autorizadas para el consumo humano. Además de estar constituida por otros compuestos importantes como son: carbohidratos, proteínas, lípidos, vitaminas y minerales. A continuación se hará una breve descripción de los grupos de nutrimentos presentes en la carne.

2.2.1 Carbohidratos.

El papel que juegan los carbohidratos en el proceso de conversión de músculo a carne es debido a la cantidad de glucógeno presente en la matanza y la velocidad de la glicólisis post-mortem. El glucógeno es un homopolisacárido ramificado de reserva formado por moléculas de D-glucosa unidas por enlaces tipo alfa 1-4 y alfa 1-6, encontrándose almacenado principalmente en el tejido hepático y muscular; el glucógeno muscular constituye una reserva energética para la contracción del músculo y únicamente puede ser metabolizada por la fibra muscular debido a la ausencia de glucosa-6-fosfatasa, enzima necesaria para liberar glucosa en su isómero glucosa 6-fosfato. Esto afectará al color del músculo, la textura, la firmeza, la capacidad de retención de agua, la capacidad de emulsificación, el pH y la vida útil de la carne. También hay pequeñas cantidades de glucoaminoglicanos y proteoglicanos (presentes en la matriz extracelular del tejido conectivo), además de glicoproteínas (presentes en la sangre), hormonas e intermediarios glucolíticos (el más abundante es la D-glucosa) y glicolípidos (Price et al., 1994).

2.2.2 Lípidos.

Los lípidos son el componente más variable de la canal de los animales (Cuadro 1.), estos comprenden entre el 20-25% del peso vivo de un animal listo para el mercado. La cantidad de lípidos varía en función de varios factores: especie, raza, edad, género, alimentación, ejercicio y parte anatómica del animal (Price et al., 1994).

Los triacilgliceroles son los principales constituyentes de la fracción lipídica, en los cuales se encuentran tanto ácidos grasos saturados como insaturados. Los ácidos grasos insaturados, linoléico (C 18:2), linolénico (C 18:3) son indispensables en la dieta, mientras que el ácido araquidónico se considera condicionalmente indispensable. Son constituyentes necesarios de las paredes celulares, las mitocondrias y otros sitios metabólicos intensamente activos. Aunque el cuerpo puede producir ácido oleico a partir de precursores saturados, el resto de los ácidos grasos no pueden producirse fácilmente, a menos que estén disponibles en la dieta. El ácido eicosapentaenoico (C20: 5, n-3) y el ácido docosahexaenoico (C22: 6, n-3) están normalmente presentes a muy bajas concentraciones (prácticamente no cuantificables) en tejidos cárnicos, pero hay concentraciones elevadas en pescado y aceites de pescado (Lawrie, 2006).

Cuadro 1. Contenido de ácidos grasos (%) del tejido muscular de diferentes especies (adaptado de Lawrie, 2006).

		Total de ácidos grasos %		
		Res	Cordero	Cerdo
Palmítico	C16:0	25.00	22.20	23.20
Esteárico	C18:0	13.40	18.10	12.20
Oleico	C18:1 (n-9)	36.10	32.50	32.80
Linoleico	C18:2 (n-6)	2.40	2.70	14.20
α-Linolénico	C18:3 (n-3)	0.70	1.37	0.95
Araquidónico	C20:4 (n-6)	0.63	0.64	2.21
Eicosapentaenóico	C20:5 (n-3)	0.28	0.45	0.31
Dodecosahexanóico	C22:6 (n-3)	0.05	0.15	0.39

Según su localización, los ácidos grasos de la carne se pueden agrupar en tres tipos: lípidos del tejido subcutáneo, grasa intermuscular y grasa intramuscular. Los lípidos del tejido subcutáneo y la grasa intermuscular están constituidos mayoritariamente por triacilgliceroles, neutros, con un bajo contenido de fosfolípidos y una pequeña cantidad de colesterol. Los lípidos intramusculares llamados comúnmente marmoleo están compuestos por triacilgliceroles (62-68%), fosfolípidos (17-34%) y una pequeña cantidad de fracción insaponificable (Rhee *et al.*, 1992).

Además, se ha observado la presencia de pequeñas cantidades de fosfolípidos en los tejidos animales, los cuales cumplen con un papel estructural y funcional en las membranas, con un efecto sobre el aroma y la calidad de la carne y los productos cárnicos. Cuando los fosfolípidos son expuestos al aire ocurren cambios marcados en el aroma, color, y sabor de la carne. Los cambios oxidativos son mucho más intensos en fracciones de tejido ricas en fosfolípidos, aunque sigue siendo variable dependiendo del corte y del contenido de la grasa en el músculo (Price et al., 1994).

2.2.3 Proteínas.

Se ha encontrado que la carne es una fuente importante de proteínas, aunque su proporción depende de la cantidad de grasa y agua. Las proteínas poseen un contenido importante de aminoácidos indispensables en la dieta, representando alrededor de 40% de proteína; dentro de estos aminoácidos se encuentran la lisina, la isoleucina, la treonina, la valina, la leucina, la metionina, la fenilalanina y el triptófano varían un poco o ligeramente en función de la especie. Además están en suficiente cantidad y proporción para cubrir las necesidades corporales, el crecimiento y la reconstitución de los tejidos, por ser muy similares a los que componen el tejido humano (Price et al., 1994).

Con respecto a los aminoácidos indispensables, la carne vacuna tiene un ligero contenido mayor de leucina, lisina y valina en comparación con la carne porcina o de cordero, y un contenido más bajo de treonina (Cuadro 2). Cabe mencionar que es muy factible que las diferencias más significativas se asocien a cortes específicos, raza, y edad del animal. Por ejemplo, los contenidos de arginina, valina, metionina, isoleucina y fenilalanina aumentan (con relación a las concentraciones de otros aminoácidos) a mayor edad del animal (Gruhn, 1965).

Cuadro 2. Contenido de aminoácidos (g de aminoácidos/100g proteína) en la carne de diferentes especies (adaptado de Lawrie, 2006).

	Res	Cerdo	Cordero
Isoleucina	5.10	4.90	4.80
Leucina	8.40	7.50	7.40
Lisina	8.40	7.80	7.60
Metionina	2.30	2.50	2.30
Cisteína	1.40	1.30	1.30
Fenilalanina	4.00	4.10	3.90
Treonina	4.00	5.10	4.90
Triptófano	1.10	1.40	1.30
Valina	5.70	5.00	5.00
Arginina	6.60	6.40	6.90
Histidina	2.90	3.20	2.70
Alanina	6.40	6.30	6.30
Á. Aspártico	8.80	8.90	8.50
Á. Glutámico	14.40	14.50	14.40
Glicina	7.10	6.10	6.70
Prolina	5.40	4.60	4.80
Serina	3.80	4.00	3.90
Tirosina	3.20	3.00	3.20

2.2.4 Vitaminas.

La carne es una excelente fuente de vitaminas del grupo B como la B1 (tiamina), B2 (riboflavina), B3 (niacina), B6 (piridoxina), B9 (ácido fólico) y B12 (cobalamina). El contenido de estas vitaminas (Cuadro 3) en la carne varía dependiendo de numerosos factores como la especie, tipo de músculo, edad, sexo y el estado general de salud de los animales. Además, al ser hidrosolubles se encuentran en gran cantidad en carne magra, sin embargo, no son muy estables y puede haber pérdidas durante el cocinado (Higgs, *et al.*, 2002).

Cuadro 3. Contenido de vitaminas en distintas especies de carne (adaptado de Lawrie, 2006).

	Res	Ternera	Cerdo	Tocino	Cordero
	mg/100g de carne				
Tiamina (B1)	0.07	0.10	1.00	0.40	0.15
Riboflavina (B2)	0.20	0.25	0.20	0.15	0.25
Ácido nicotínico	5.00	7.00	5.00	1.50	5.00
Ácido pantoténico	0.40	0.60	0.60	0.30	0.50
Biotina	3.00	5.00	4.00	7.00	3.00
Ácido fólico	10.00	5.00	3.00	0.00	3.00
Piridoxina (B6)	0.30	0.30	0.50	0.30	0.40
Cobalamina (B12)	2.00	0.00	2.00	0.00	2.00

*Para retinol (A), calciferol (D) y Ácido ascórbico (C) su composición es a nivel traza (debajo de 0.001 mg/100 g).

Está claro que el contenido de vitamina B1 en la carne de cerdo es considerablemente superior a la de otras carnes, y que existe una concentración relativamente alta de ácido fólico en la carne vacuna.

La inestabilidad de la vitamina B1 en el procesamiento de la carne ha sido ampliamente estudiado (Hallmark y Van Duyne, 1961). La vitamina B1 se pierde principalmente de la carne durante el exudado con pérdidas promedio de alrededor del 15-40% por hervor, del 40-50% en freidora, del 30-60% en ahumado y del 50-70% por enlatado (Harris y Von Loesecke, 1960). Las vitaminas B6, B12 y el ácido pantoténico tienen un orden similar a la vitamina B1 en las pérdidas por procesamiento.

2.2.5 Nutrimientos inorgánicos.

La carne constituye una fuente importante de nutrientes inorgánicos indispensables para la dieta (Fe, Cu, Mn, Zn) humana, además de otros elementos traza, como Se, Co y Mg (Cuadro 4).

Entre los nutrientes inorgánicos aportados por la carne destaca el Fe, no solo por la cantidad sino por la biodisponibilidad, la cual se modifica poco durante el proceso de cocción. Dos terceras partes del hierro se encuentran en forma hemo (presente en la hemoglobina y mioglobina), cuya eficiencia de absorción es de 2 a 3 veces mayor que la del hierro no hemo. La absorción del hierro no hemo es inhibida por la fibra, además de algunos minerales (zinc, cobalto, cobre) y es aumentada por la vitamina C (Price *et al.*, 1994).

Otro nutriente inorgánico importante que brinda la carne es el Zn, el cual participa en reacciones de síntesis o degradación de proteínas, hidratos de carbono, lípidos y ácidos nucleicos. Además interviene en la composición y actividad de más de 200 enzimas, participa en la estabilización de la estructura de proteínas y de los ácidos nucleicos, en

procesos de transporte, funciones inmunológicas y en la expresión de la información genética. La carne es la principal fuente de Zn ya que alrededor del 27% del Zn de la dieta es de origen cárnico (Hunt *et al.*, 1995).

Cuadro 4. Concentración de minerales en distintos cortes de carne de distintas especies (adaptado de Lawrie, 2006).

Carne	Contenido (mg/100g)							
	Na	K	Ca	Mg	Fe	P	Cu	Zn
Res, Filete (crudo)	69.00	334.00	5.40	24.50	2.30	276.00	0.10	4.30
Res, Filete (cocinado)	67.00	368.00	9.20	25.20	3.90	303.00	0.20	5.90
Cordero, Chuleta (crudo)	75.00	246.00	12.60	18.70	1.00	173.00	0.10	2.10
Cordero, Chuleta (cocinada)	102.00	305.00	17.80	22.80	2.40	206.00	0.20	4.10
Cerdo Chuleta (crudo)	45.00	400.00	4.30	26.10	1.40	223.00	0.10	2.40
Cerdo Chuleta (cocinado)	59.00	258.00	8.30	14.90	2.40	178.00	0.20	3.50
Tocino (crudo)	975.00	268.00	13.50	12.30	0.90	94.00	0.10	2.50
Tocino (frito)	2790.00	517.00	11.50	25.70	2.80	229.00	0.10	3.60

En comparación con los alimentos de origen vegetal, se considera que la carne roja es un buen vehículo para brindar dos de los nutrimentos inorgánicos de gran importancia: Fe y Zn, los alimentos de origen vegetal no brindan la misma cantidad de estos nutrimentos, además de que su biodisponibilidad es menor en comparación con los provenientes de la carne. (Prändl, 1994).

2.3 Elementos traza inorgánicos.

Existen aproximadamente más de 20 elementos inorgánicos que son considerados como indispensables para la vida animal, incluyendo peces y camarones; conocidos como microminerales o minerales traza, ya que se necesitan en menor proporción que los requerimientos de nutrición diaria (FAO, 2016). La función general de los nutrimentos inorgánicos se puede resumir a continuación:

- Los nutrimentos inorgánicos son constituyentes indispensables de las estructuras esqueléticas, tales como huesos y dientes.
- Juegan un papel clave en el mantenimiento de la presión osmótica y consecuentemente, regulan el intercambio de agua y solutos dentro del cuerpo animal.
- Sirven como constituyentes estructurales de tejidos blandos.

La función general de los elementos traza (Cu, Fe, Mn, I, Cr, Ni, Zn, Se y Co) puede ser más particular:

- Son indispensables para la transmisión de los impulsos nerviosos y para las contracciones musculares.
- Tienen un papel vital en el equilibrio ácido-base corporal y consecuentemente regulan el pH de la sangre y otros fluidos corporales.
- Son constituyentes indispensables de muchas enzimas, vitaminas, hormonas y pigmentos respiratorios, o como cofactores en el metabolismo, catálisis y como activadores enzimáticos (FAO, 2016).

A continuación se describirá la importancia que tienen el Cu, el Fe, el Mn y el Zn en la producción de la carne de cerdo y en el ser humano.

Cobre (Cu). El cerdo requiere cobre para la síntesis de la hemoglobina, y para la producción y activación de enzimas antioxidantes para un metabolismo. Un nivel recomendado para la alimentación de lechones es de 5-6 ppm; sin embargo, se llegan a usar entre 100 a 250 ppm, para estimular el crecimiento en los cerdos, aparentemente por su acción antimicrobiana. La deficiencia de cobre conlleva a una pobre movilización de hierro que, puede ocasionar una anemia de tipo microcítica hipocrómica, es decir, una disminución de la hemoglobina en los glóbulos rojos (Zhao, 2014).

Desde hace 60 años Smith y Larson descubrieron que existe un antagonismo biológico entre el Cu y el Zn, ya que encontraron que una dieta abundante en cobre puede aliviar los síntomas de una intoxicación por zinc. Más tarde, Van Reen (1953) demostró que una dieta abundante en zinc disminuye la actividad de la citocromo oxidasa, la cual es dependiente del cobre.

Se sabe que la carencia de cobre causa anemia en el ganado bovino, pero este riesgo no se ha reportado en los seres humanos adultos. Alguna evidencia sugiere que la carencia de cobre puede ocasionar anemia en niños prematuros, en personas con desnutrición energético-proteínica grave y en quienes se mantienen con nutrición parenteral. Una enfermedad congénita extremadamente rara y que se conoce como enfermedad de Menke, se debe a fallas en la absorción de cobre (Thomaz, 2014).

Hierro (Fe). En los porcinos el hierro es necesario para la formación de hemoglobina en las células rojas y la prevención de anemia nutricional, sirve como un acarreador de oxígeno a través del cuerpo. En el músculo el hierro se encuentra como parte de la mioglobina, en el suero forma parte de la transferrina, también se encuentra en la lactoferrina de la leche y como ferritina y hemosiderina en el hígado. Los niveles dietéticos se encuentran en un rango de 40 a 150 ppm (Martin, 2011).

Una vez destetados los lechones, estos comienzan a ingerir alimento, que contiene 80 ppm de Fe. Este nutrimento tiene un efecto adverso cuando se le administra a razón de 1000 ppm llegándose a ver que las heces de los cerdos oscurecen tras la administración por varias semanas, los animales comienzan a perder condición corporal, sufren raquitismo con dificultad para andar y adquieren una postura de perro sentado (NRC, 1998).

A nivel celular, el exceso de hierro es un veneno proto-plasmático capaz de inactivar metabolismos enzimáticos importantes. Se presenta una acidosis metabólica y la forma clínica de un profundo choque cardiovascular. El exceso de hierro también interfiere con el mecanismo de la coagulación aumentando y agravando cualquier proceso hemorrágico (Reinhold, 1988).

El contenido promedio de hierro en un adulto sano es solamente de 3 a 4 g (OMS, 2016); sin embargo, la deficiencia de hierro en el ser humano es muy común en el mundo, lo cual puede provocar anemia y otros efectos adversos. La mayor parte del hierro corporal está presente en los glóbulos rojos, sobre todo como componente de la hemoglobina; el resto se encuentra en la mioglobina de los músculos y como ferritina cuando es almacenado en hígado, bazo y médula ósea. Hay pequeñas cantidades adicionales ligadas a la proteína en el plasma sanguíneo y en las enzimas respiratorias (OMS, 2016).

La principal función biológica del hierro es el transporte de oxígeno a varios sitios del cuerpo. La hemoglobina en los eritrocitos es la que lleva el oxígeno de los pulmones a los tejidos. La mioglobina presente en el tejido muscular del esqueleto y del corazón capta el oxígeno de la hemoglobina. El hierro también está en enzimas como la peroxidasa, la catalasa y los citocromos (FAO, 2016).

El hierro es un elemento que no se agota o se destruye en un cuerpo que funciona de forma normal. A diferencia de algunos nutrimentos inorgánicos, el hierro no necesita excretarse, y sólo cantidades muy pequeñas aparecen en la orina y el sudor, más o menos 1 mg/día. La absorción del hierro se lleva a cabo sobre todo en la porción superior del intestino delgado, entrando al torrente circulatorio directamente y no a través del sistema linfático (OMS, 2016).

Las personas sanas, normalmente absorben sólo del 5 a 10% del hierro de sus alimentos, mientras que las personas con carencia pueden absorber el doble. Por lo tanto, en una dieta que aporta 15 mg, una persona normal absorbería de 0.75 a 1.5 mg, pero la persona con carencia absorbería hasta 3 mg. La absorción de hierro casi siempre aumenta durante el crecimiento y el embarazo, después de una hemorragia y en otras condiciones en las que la demanda de hierro es mayor (FAO, 2016).

Algunos ácidos orgánicos como el ácido ascórbico (AA), tienen la cualidad de aumentar la biodisponibilidad del Fe y su efecto se atribuye a la capacidad que estos compuestos tienen para reducir el Fe no hemo y mantener su solubilidad a pH alto, por lo tanto, aumentan la cantidad de Fe⁺² soluble en el lumen duodenal (Teucher, 2004).

Se ha observado que soluciones con concentraciones de AA de 1 a 10 ppm, aumentan la biodisponibilidad de Fe en forma proporcional (Lynch, 1980). Estudios realizados por el grupo de Hallberg (1986) en diferentes tipos de dietas sugieren que el efecto promotor del AA se observa más en alimentos que tienen un alto contenido de sustancias que ligan e inhiben la absorción del Fe no hemo como el ácido fítico. Sin embargo, en otras investigaciones se ha sugerido que el beneficio del AA es menor a lo esperado cuando se consume en una dieta mixta (Cook, 2001; Hunt, 1994).

En la década de los 60's se propuso que el consumo de carnes además de proporcionar Fe hemo aumentaba la biodisponibilidad del Fe no hemo (Layrisse, 1969). Con base a este hallazgo se propuso que la proteína de origen animal estaba implicada en este proceso. Sin embargo, estudios posteriores (Hurrell, 1988; Bjorn-Rasmussen, 1979) encontraron que este efecto positivo no se observaba con la proteína animal contenida en la clara de huevo o en la leche, la cual tiene grandes cantidades de albúmina (proteína quelante del metal) y caseína (proteína que oxida el Fe^{+2}); por lo tanto, al efecto de las proteínas sobre la absorción del Fe no hemo se le conoce como "factor cárnico".

El mecanismo mediante el cual el "factor cárnico" aumenta la absorción del Fe no hemo se relaciona con el contenido de histidina y de enlaces sulfhidrilos de la proteína ingerida; estos enlaces, promueven la solubilidad del Fe^{+2} y además facilitan la reducción del Fe^{+3} (Mulvihill, 1998), por esto, las carnes con alto contenido de actina y miosina son las que más aumentan la biodisponibilidad. También se ha evaluado en estudios in vitro el efecto de la cisteína, un aminoácido abundante en enlaces sulfhidrilos, encontrándose un aumento de la absorción del Fe no hemo (Baech, 2003). Para el caso del Fe hemo, se reconoce que cuando es consumido en conjunto con proteínas su biodisponibilidad aumenta. Se especula que las proteínas evitan la degradación del anillo de protoporfirina en el lumen gástrico manteniendo indemne el hemo o bien participan en el mecanismo de captación del hemo por el enterocito (McDowell, 2003).

Manganeso (Mn). En los porcinos participa en el metabolismo como constituyente de metaloenzimas, cofactor de las glicoproteínas, necesario en la síntesis de colesterol, tiroxina y colina, así como en la actividad de la insulina y procesos de oxidación en el metabolismo de los tejidos blandos y en el desarrollo de huesos. Un exceso de este mineral en la alimentación de los animales provoca una reducción tanto en la ingesta de alimento como en la ganancia de peso. El límite de tolerancia para el manganeso es de 400 ppm (NRC, 1998). Algunos signos de deficiencia en cerdos son: cojera, estructura débil de los huesos, agrandamiento de la articulación del corvejón, aumento del depósito graso, fetos reabsorbidos, estro irregular, lechones nacidos muertos, débiles o pequeños (Martin, 2011).

En los seres humanos el manganeso se encuentra distribuido en pequeñas cantidades en todo el organismo pero principalmente en los huesos, el hígado, el páncreas y los riñones. Aunque no es de los nutrimentos más conocidos, está considerado en medicina como un nutriente esencial ya que interviene activamente en el metabolismo del colesterol, los carbohidratos y las proteínas. Existe evidencia de que la deficiencia de manganeso puede provocar crecimiento lento en uñas y cabello, deformación de los huesos (junto con la enzima glicosiltransferasa, en la síntesis de proteoglicanos, componentes naturales necesarios para el crecimiento y la formación de huesos y cartílago en el cuerpo) y también estabilizar la síntesis de insulina y su secreción (OMS, 2016).

Otra de las funciones del manganeso en el cuerpo humano es prevenir el daño oxidativo celular. El manganeso está considerado como un antioxidante natural ya que estimula la actividad enzimática (piruvato carboxilasa y fosfoenolpiruvato carboquinasa) protegiendo las células del daño producido por los radicales libres (FAO, 2016).

Acelera la cicatrización de heridas al activar las enzimas que participan en la formación del colágeno de la piel, mejorando la absorción de vitaminas, especialmente la E, B1, C, biotina y colina. Además, aumenta la coagulación de la sangre y regula la actividad de la tiroides (OMS, 2016).

Zinc (Zn). El requerimiento de Zn en los cerdos es muy bajo y disminuye cuando hay dietas con niveles altos de calcio acorde a su requerimiento. Los niveles dietéticos recomendados de Zn son de 50 a 100 ppm, sin embargo éstos son mayores en cerdos más jóvenes (NRC, 1998).

Durante el cambio de fase de alimentación los cerdos destetados se enfrentan a un nuevo ambiente (factores de estrés, cambio de fase, alojamiento, etc.), por lo que presentan una demanda biológica extrema de antioxidantes como medida de defensa. Hill *et al.* (2014) demostraron que para maximizar el crecimiento, salud y bienestar animal con una mayor composición de tejido magro (carne), es necesario incluir 75 ppm de zinc de una fuente orgánica en una dieta para lechones.

La deficiencia de zinc en la dieta produce una condición en la piel llamada paraqueratosis (aparición de lesiones proliferativas no inflamatorias de la epidermis); generalmente inicia en la superficie ventral y se propaga a la cara interna de las extremidades presentando una distribución simétrica. También se puede encontrar un crecimiento pobre y baja conversión alimenticia; las cerdas producen camadas poco numerosas, lechones pequeños y los machos presentan retraso en el desarrollo testicular (Reinhold, 1988).

Con respecto al ser humano, el zinc es un elemento esencial en la nutrición. Este elemento se encuentra en segundo lugar (solo después del hierro) por su concentración en el organismo y su importancia para la salud ha recibido mucha atención recientemente. El cuerpo de un adulto humano sano contiene de 2 a 3 g de zinc y necesita alrededor de 15 ppm de zinc dietético

por día. La mayoría del zinc en el cuerpo se encuentra en el esqueleto, pero otros tejidos (como la piel y el cabello) y algunos órganos (sobre todo la próstata) tienen altas concentraciones (FAO, 2016).

El Zn es necesario para que el sistema de defensa del cuerpo (sistema inmunitario) funcione apropiadamente. Participa en la división y el crecimiento de las células, al igual que en la cicatrización de heridas y en el metabolismo de los carbohidratos. También es necesario para los sentidos del olfato y del gusto, además de aumentar el efecto de la insulina (OMS, 2016).

En las últimas dos décadas se han hecho numerosas investigaciones sobre este nutrimento, y se ha generado conocimiento sobre el metabolismo del zinc y su carencia en seres humanos. Algunas investigaciones recientes han demostrado que la carencia de zinc propicia un crecimiento defectuoso, reduce el apetito y detona otros problemas (cirrosis hepática, enfermedades renales y desórdenes metabólicos) contribuyendo a lo que ahora se denomina desnutrición energético-proteínica de forma secundaria (FAO, 2016).

La mayoría de la población presenta deficiencia de Zn, las evidencias apuntan a que hay un bajo consumo dietario de este. Un estudio de la organización mundial de la salud demostró la existencia de niveles bajos de zinc sérico (es el que se utiliza para el análisis en poblaciones) y una baja cantidad en muestras de cabello. Sin embargo, no existe a la fecha un indicador bioquímico específico y sensible para evaluar el estado de zinc de un individuo, identificado como un problema de salud pública importante para un gran número de países industrializados o en desarrollo (OMS, 2016).

2.4 Biodisponibilidad de los nutrimentos inorgánicos en el ser humano.

Existen varias definiciones para la biodisponibilidad de los nutrientes, pero en términos generales se refiere a la "proporción en la que un nutriente se absorbe sin sufrir transformaciones que ha pasado por el proceso de digestión y metabolismo siendo directamente almacenado en el cuerpo" (FAO, 2016). Dicho término puede ser confundido con digestibilidad, ya que este proceso comienza desde que se consume el alimento, siendo degradado en nutrientes y absorbido para ser utilizado en el metabolismo, pero la energía liberada por el alimento es utilizada por el cuerpo y termina el proceso al excretar el alimento en forma de heces.

La biodisponibilidad varía en las distintas etapas del proceso metabólico, que son las siguientes:

- Liberación fisicoquímica de los nutrimentos de la matriz alimentaria.
- Efectos de las enzimas digestivas en tubo gastrointestinal.
- Unión y absorción por la mucosa intestinal.
- Transferencia desde la pared del intestino (que pasa a través de las células, en medio de ellas o ambas) hacia la circulación sanguínea o linfática.
- La distribución sistémica.
- Deposición sistémica (almacén).
- Utilización metabólica y funcional.
- Excreción (a través de la orina o las heces).

En los distintos momentos del proceso metabólico la biodisponibilidad de un nutrimento depende tanto de factores externos como internos. Los factores externos comprenden la matriz del alimento y la forma química de cada nutrimento en cuestión. Por otra parte, los factores internos se refieren al

género, a la edad, al estado nutricional y a las peculiaridades del individuo en particular (por ejemplo mujeres gestantes) que determinarán en qué cantidad es usado, almacenado o excretado un nutrimento. La biodisponibilidad cambia dependiendo de si se trata de un macro o un micro nutrimento (OMS, 2016).

La biodisponibilidad de los macronutrientes como los hidratos de carbono, las proteínas y las grasas generalmente es muy alta; se absorbe más del 90% de la cantidad ingerida. Por otro lado, el aprovechamiento de los micronutrientes como las vitaminas, los minerales y los fitoquímicos bioactivos (por ejemplo, los flavonoides y los carotenoides) puede variar ampliamente (FAO, 2016).

2.5 Determinación cuantitativa de minerales.

Para poder determinar cualquier metal traza por un método analítico se usa la técnica de absorción atómica, en la que es conveniente que el analito de interés se encuentre libre en solución acuosa, sin formar parte de compuestos o complejos bio-inorgánicos. Como las muestras biológicas no son completamente solubles en agua o en disolventes orgánicos debido a su compleja composición de carbohidratos, proteínas y constituyentes lipídicos, es necesaria una digestión previa para descomponer el material orgánico y liberar a los metales de la matriz (Kingston, 1998).

Existen diferentes métodos de digestión para las muestras biológicas. Estos pueden variar en: procedimiento, tiempo, reactivos (en cuanto a posibles interferencias con otros metales) y el equipo durante el proceso. Entre algunos ejemplos de métodos de digestión están los siguientes:

a) Digestión convencional en medio ácido o digestión húmeda.

La digestión convencional en medio ácido es la más conocida y usada para liberar los metales de interés de la mayoría de las matrices sólidas ya sean minerales u orgánicas. Consiste en la adición de ácidos concentrados o mezclas de ellos a temperaturas de ebullición por un lapso de 12-24 h hasta la total transparencia de la muestra. Los ácidos empleados con mayor frecuencia son HNO_3 , mezcla de $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4$, H_2SO_4 , HCl y HF (Kingston, 1988).

b) Digestión parcial en medio ácido.

La digestión parcial en medio ácido consiste la adición de ácido nítrico a la muestra en un lapso de tiempo corto (20-30 minutos aproximadamente) a temperatura de ebullición. Esta técnica tiene la ventaja de que es un proceso rápido, sencillo, de bajo costo y puede utilizarse para un gran número de muestras (Kingston, 1988).

c) Secado a cenizas en horno programable o digestión seca.

La digestión seca es muy poco utilizada y consiste en calcinar la materia orgánica u otros materiales presentes en la muestra por medio de un programa de temperaturas para después solubilizar la muestra en medio ácido (HCl o HNO_3). Este método tiene la desventaja de que se pueden perder los analitos de interés, o bien, fragmentos de la muestra (Kingston, 1988).

En general, estos procesos de digestión pueden conducir a la pérdida del analito por la oxidación (combustión) incompleta y la volatilización, además de la contaminación que se puede generar a partir de reactivos o cristalería del laboratorio.

d) Digestión por microondas.

La digestión húmeda también puede realizarse en un sistema presurizado con vasos cerrados climatizados en un horno de microondas. La muestra es calentada en vasos cerrados de teflón junto con los ácidos recomendados. La temperatura máxima de trabajo normalmente está entre 180-220 °C y una presión máxima de 500 psi (Kingston, 1988).

Bajo las condiciones mencionadas y dependiendo del tipo de muestra se puede producir la degradación parcial o completa de la muestra. Los reactivos más usados para la digestión son: ácido nítrico, ácido clorhídrico y agua oxigenada; su elección depende del origen de la muestra y del equipo. El resultado tras la digestión es una disolución acuosa ácida (10% v/v) de la muestra. La gran ventaja de la digestión con horno de microondas frente a la digestión en vaso abierto convencional es el control de forma precisa de parámetros como la presión y la temperatura, así como la posibilidad de digerir la muestra en tiempos muy reducidos, ya que la velocidad de calentamiento dentro del horno es muy alta (AOAC, 2000). Además se reducen significativamente los riesgos de contaminación y pérdida de analitos volátiles. Con base en lo anterior, el método más adecuado para el tratamiento de las muestras es por medio de un digestor de microondas.

2.5.1 Espectrometría atómica

La espectrometría es una herramienta de apoyo en la química analítica, la cual es una disciplina que se encarga de identificar y cuantificar las especies químicas involucradas en un sistema, así como de estudiar su comportamiento. En algunos laboratorios, los espectroscopistas utilizan la emisión, dispersión o absorción de luz para identificar componentes de un sistema químico que se usa para inferir el contenido y concentración de especies atómicas o moleculares presentes (Skoog, 1986). La radiación

electromagnética es un flujo de partículas discretas de energía llamadas fotones que se transmiten por el espacio a grandes velocidades, tiene naturaleza ondulatoria y está acompañado de un campo de fuerza magnética dispuesta de manera perpendicular. Los campos eléctricos y magnéticos asociados con la radiación son magnitudes vectoriales que se pueden manejar con cálculos matemáticos y que además interactúan con la materia (Skoog, 1986). Se puede decir entonces que la radiación corresponde a la diferencia de energía entre el estado basal y estado excitado de un electrón, para ambos estados de un elemento la frecuencia de la radiación emitida será exactamente igual a la frecuencia de la radiación absorbida (Manning, 1997).

Actualmente las técnicas más usadas para la determinación de metales son las espectroscopías atómicas, las cuales se basan en la medida de la absorción, emisión o fluorescencia de la radiación electromagnética por parte de los átomos o iones elementales de un medio gaseoso. Los métodos atómicos se clasifican según el procedimiento para la atomización de la muestra, por el cual los constituyentes de una solución se convierten en átomos o iones elementales al estado gaseoso. La eficacia y reproducibilidad de la fase de atomización determinan en gran medida la sensibilidad, la precisión y la exactitud del método, es decir, la atomización es el paso crítico de la espectroscopia atómica (Manning, 1997). Puede considerarse como la fuente ideal de atomización aquella que cumpla con las características siguientes:

- a) Atomización del elemento removiéndolo completamente de la solución original, minimizando las interferencias de la matriz.
- b) Atomización total del analito presente con un mínimo de ionización de los demás elementos.

- c) Fuente de energía controlable y que pueda proporcionar la energía necesaria al excitar eficientemente al analito.
- d) Posibilidad de tener un ambiente inerte, el cual no favorezca la formación de moléculas o especies indeseables (óxidos, complejos, etc.) que afecten la precisión de la determinación.
- e) Ausencia de radiación de fondo, o bien, que no se presente radiación atómica o molecular indeseable que pueda interferir con la longitud de onda elegida.
- f) Manejo o uso de un grupo amplio de disolventes, tanto orgánicos como inorgánicos.
- g) Introducción de muestras líquidas o gaseosas.

En términos generales dependiendo de la fuente de excitación las técnicas de espectroscopía atómica se pueden considerar dentro de alguna de estas tres categorías: flama, electrotérmica y plasma (Manning, 1997).

2.5.2 Espectroscopía de absorción atómica (AES)

La absorción atómica consiste en hacer pasar el analito por una fuente de energía térmica (flama) para producir la disociación de los componentes químicos en átomos libres. Posteriormente, se hace incidir un haz de luz de cierta longitud de onda sobre el analito mediante una lámpara de cátodo hueco o de electrodos de descarga alineada de tal forma que se puede determinar la cantidad de radiación absorbida por el analito, la cual será proporcional a su concentración en la muestra (Skoog, 1986).

Esta técnica tiene amplias aplicaciones en el análisis elemental, usándose principalmente en la determinación de Na, K, Li y Ca, especialmente en tejidos biológicos. Por razones de conveniencia, rapidez, costo y relativa falta de interferencias con otros metales, además de su sensibilidad (en el orden de ppm), aún con la variación dependiendo del modelo del equipo es la mejor opción para la determinación de minerales.

2.5.3 Inducción de plasma acoplado a espectroscopía de absorción atómica (ICP-AES).

La ICP-AES (espectrometría de emisión atómica acoplamiento de plasma inductivo) es un método que permite el análisis simultáneo de un gran número de elementos (hasta 13 minerales traza). Se basa en la medición de la radiación de la línea espectral emitida por átomos excitados en un plasma de Ar generado por calentamiento inductivo con un campo electromagnético de alta frecuencia. El plasma es creado al hacer que el Ar sea conductivo al exponerlo a una descarga eléctrica que crea electrones e iones.

Las partículas cargadas calientan el Ar hasta que el plasma alcanza una temperatura de 5500-8000 K, esto lleva a una vaporización casi completa del analito y a una alta eficiencia de atomización (FAO, 2016). Los efectos de ionización de la muestra son pequeños al compararse con otras técnicas analíticas como la espectroscopía de emisión atómica, lo que puede deberse a que la concentración de los electrones provenientes de la ionización del Ar es mayor que la ionización por flama (FAO, 2016).

La sensibilidad que presenta este método en comparación con uno de absorción de emisión atómica es mucho mayor, pues llega a detectar y cuantificar partes por billón (ppb), en cambio la técnica de absorción atómica sólo permite cuantificar hasta partes por millón (ppm). Otra de las ventajas que presenta la ICP es que la atomización se produce de manera inerte desde el punto de vista químico, y la temperatura de la sección transversal del plasma es relativamente uniforme; en consecuencia, no se producen los fenómenos de autoabsorción y autoinversión; por lo que se pueden obtener curvas de calibración lineales en varios órdenes de magnitud de concentración del analito (FAO, 2016). Cabe mencionar que las variables físicas como la diferencia de densidades entre la muestra y los estándares, o bien la velocidad del flujo de inyección de la muestra juegan un papel importante en la determinación de la concentración de la muestra de estudio.

3. Hipótesis

La fuente dietética de Cu, Fe, Mn y Zn puede incidir sobre la concentración de estos nutrimentos en el músculo de los cerdos, en su biodisponibilidad así como en las características fisicoquímicas de la carne.

3.1. Objetivo general

Determinar el contenido y biodisponibilidad de nutrimentos inorgánicos (Fe, Cu, Mn y Zn) en la carne obtenida de cerdos alimentados con dos fuentes dietéticas y dos niveles de inclusión de nutrimentos inorgánicos.

3.1.2 Objetivos específicos

- Evaluar los efectos en las características fisicoquímicas de la carne de los cerdos alimentados con diferentes fuentes.
- Cuantificar a los nutrimentos Cu, Fe, Mn y Zn en la carne de cerdo por medio de la técnica de ICP-AES.
- Determinar la digestibilidad *in vitro* de los nutrimentos inorgánicos.

4 Metodología.

A continuación se presenta el esquema general del trabajo experimental. Después de la obtención de la carne se evaluó la calidad, se realizó la cuantificación total de minerales en carne y su biodisponibilidad *in vitro* de la carne cocinada. Los datos capturados se analizaron con el paquete estadístico SAS (9.3).



4.1. Producción de las muestras de carne.

Las muestras de *Longissimus dorsi* (lomo de cerdo), provinieron de un grupo de 84 cerdos (misma genética, peso y edad) que fueron manejados a partir de los 63 días de edad hasta alcanzar un peso de mercado (115 kg). La duración experimental en granja fue de 84 días.

4.1.1. Tratamientos aplicados a los cerdos.

Los tratamientos vía dieta que fueron suministrados a los animales fueron tres: Trt 1 consistió en una dieta basal con la adición de los nutrimentos inorgánicos (Cu, Fe, Mn y Zn) de fuente orgánica (la fuente "orgánica" consistió en minerales quelados a proteína proporcionada por Alltech® de México) con nivel bajo (50% de los requerimientos nutricionales del cerdo); el Trt 2 consistió en el suministro de la misma fuente orgánica pero en un nivel alto (arriba del 100% de los requerimientos nutricionales del cerdo) y el Trt 3 consistió en la adición del mismo nivel alto del nutrimento pero a partir de una fuente inorgánica de los nutrimentos (la fuente "inorgánica" fue la comúnmente usada en nutrición animal a base de sulfatos).

Cuadro 5. Contenido de minerales adicionados a las dietas.
Ppm

Tratamiento	Fuente	Cu	Fe	Mn	Zn
1	Orgánica	2	20	1	25
2	Orgánica	17	140	46	130
3	Inorgánica	17	140	46	130

Los animales se sacrificaron después de 84 días de experimentación, las muestras de carne (chuletas) se obtuvieron del músculo *Longissimus dorsi* (entre la 9ª y la última costilla) después de 24 h de frío. Las muestras para determinar el contenido de minerales fueron secadas en estufa convencional a 70°C por 16 h (AOAC, 2000), fueron empacadas al vacío y almacenadas en congelación (-20°C) hasta su análisis.

4.1.2. Calidad de la carne fresca.

En la carne fresca se evaluaron las siguientes características de calidad: pH, temperatura, color, pérdida de peso por goteo y capacidad de retención de agua por centrifugación.

4.1.2.1 Temperatura y pH.

Se midió directamente en el músculo con un electrodo de vidrio para punción conectado a un medidor de pH (HI 99163 HANNA Instruments Inc.). El medidor de pH se calibró a dos puntos de pH 4 y 7 (Honikel, 1998).

4.1.2.2 Color.

El color (L^* =luminosidad, a^* = índice rojo-verde, b^* = índice amarillo-azul, en escala CIE-LAB) se midió en las chuletas expuestas al oxígeno del aire durante 30 minutos (AMSA, 1992), con un colorímetro MiniScan HunterLab (con Iluminante D65 a 10° del observador).

4.1.2.3 Pérdida de peso por goteo.

Se cortaron chuletas de 100 g, removiendo la grasa periférica y se registró el peso. Posteriormente la muestra fue suspendida de un gancho de acero dentro de una bolsa de plástico de polietileno con cierre (Honikel, 1998). Las muestras se almacenaron a 4°C y se pesaron a las 24 y 48 h. La pérdida por goteo se calculó como: $(\text{peso inicial} - \text{peso final de la muestra}) / \text{peso inicial de la muestra} \times 100$.

4.1.2.4 Capacidad de retención de agua (CRA).

Se realizó por el método de centrifugación (Hamm,, 1975). Se pesaron 5 g de carne y se añadieron 8 mL de NaCl 0.6M, se agitó durante 1 min en frío. Se dejó reposar en refrigeración por 30 min con una posterior agitación (1 min). Transcurrido el tiempo, se centrifugó (centrifuga 5810R Eppendorf, Hamburgo, Alemania) a 10,000 rpm por 15 min. El sobrenadante fue medido para calcular el % de solución salina retenida.

4.2 Establecimiento del método de digestión para la cuantificación de minerales.

Para el proceso de digestión de la carne se llevó a cabo una selección y validación del método estableciendo las siguientes condiciones (Cuadro 6).

Cuadro 6. Condiciones del programa de digestión para la carne.

Etapa	1	2	3	4	5
Watts	1200	1200	1200	1200	1200
% Energía	100	100	100	100	100
Tiempo (min)	5	5	5	5	5
Psi	20	40	85	135	0
Temperatura (°C)	200	200	200	200	200
Mantenimiento (min)	5	5	5	10	0

Para la digestión se usó un horno de microondas (CEM, MARS5). Se pesaron 0.4 ± 0.04 g de muestra en vasos de teflón (HP-500) con 10 mL de HNO₃ (Puro Grado Instra, 68-70%), llevándolos a un aforo de 100 mL con agua grado HPLC después de la digestión.

4.3 Determinación de minerales por ICP-AES.

Para calcular el contenido de los minerales traza (Cu, Fe, Mn y Zn) se usó una curva patrón a partir de un estándar multielemental (Multielement standar solution 13 for ICP, Sigma-Aldrich Xalostoc México). Los puntos de la curva fueron 0.005, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5 y 1 ppm. El equipo usado fue el analizador de minerales acoplado a inducción de plasma (ICP-Thermo Scientific I-cap series 6000).

El equipo cuenta con un software (iTeva) que se programó para leer los cuatro minerales traza de interés al mismo tiempo con las siguientes longitudes de onda: Cu 224.7, Fe 259.9, Mn 257.6 y Zn 213.8 nm.

4.4 Biodisponibilidad de los minerales en la carne.

Para llevar a cabo la emulación de una digestión *in-vitro* se realizó previamente un proceso de cocción en la carne (Hemalatha, Platel, & Srinivasan, 2007; Rao & Prabhavathi, 1978) de la siguiente manera: se cortaron las chuetas de aproximadamente 2.5 cm de espesor sin grasa periférica, y se colocaron en una parrilla precalentada a 160°C. La temperatura al centro de las muestras de la carne fue vigilada con un termopar hasta llegar a una temperatura interna de 72°C. La carne se dejó reposar 2 minutos y posteriormente se dejó enfriar a 4°C durante toda la noche.

De las muestras de carne cocinada se pesaron 2 g y se colocaron en tubos cónicos con 25 mL de una solución 0.5% de pepsina-HCL 0.1M (Sigma-Aldrich, Xalostoc, México). El pH de cada tubo se ajustó a 1.35 con HCl al 1%, para ser incubados a 37°C en un baño María con agitación por 90 min. Posteriormente se ajustó la disolución a pH de 7.5 con NaOH al 20% más tripsina (5 mg/g de muestra) y se incubó bajo las mismas condiciones que con pepsina-HCl. Se llevó a cabo una centrifugación a 9000 rpm por 30 min. Los sobrenadantes fueron colectados para la determinación de Cu, Fe, Mn y Zn y la estimación de su biodisponibilidad. El porcentaje de Cu, Fe, Mn y Zn biodisponibles se calculó con la siguiente ecuación (Hemalatha, Platel, & Srinivasan, 2007; Rao & Prabhavathi, 1978).

$$\text{Biodisponibilidad (\%)} = \frac{\text{Fracción de la muestra digestión in vitro } \left(\frac{\text{mg}}{100\text{g}} \right)}{\text{Contenido total de minerales de la muestra } \left(\frac{\text{mg}}{100\text{g}} \right)} \times 100$$

4.5 Análisis estadístico.

El análisis estadístico de los datos se llevó a cabo empleando el paquete estadístico para SAS 9.3. Se aplicaron procedimientos para modelos lineales generales (GLM).

Las variables respuesta fueron los resultados de carne, contenido de minerales y biodisponibilidad. Para encontrar diferencias entre medias se usó una prueba de comparación múltiple (Tukey) con alfa=0.05. Los resultados se muestran como las medias de mínimos cuadrados y el error estándar de la media.

5. Resultados y discusión.

5.1 Calidad de la carne fresca.

Siempre que se hable de calidad de la carne se deben diferenciar los siguientes conceptos: calidad de la canal y calidad de la carne. La calidad de la carne se puede desglosar en dos tipos: tecnológica y sensorial. La evaluación de la carne porcina maneja indicadores claros y concisos de fácil medición, entre los que se pueden resaltar los siguientes: pH, color, capacidad de retención de agua, grasa intramuscular, grasa subcutánea o espesor de grasa dorsal, tejido muscular y terneza. En el presente estudio se utilizó el músculo *Longissimus dorsi* o lomo, que es un corte de alto valor y sensibilidad, por lo tanto es el más usado para los parámetros de calidad en la carne. Los parámetros evaluados para determinar la calidad de la carne con base a metodologías propuestas por SAGARPA fueron: temperatura, pH, CRA, pérdida de peso por goteo y color objetivo.

Los resultados presentados en el Cuadro 9 muestran que no existen diferencias significativas entre tratamientos en la variable temperatura a los 45 minutos mientras que a las 24 horas tampoco hubo diferencias entre tratamientos. Los datos corresponden a prácticas comunes en México y a valores dentro de lo normal. Al respecto, en México no se practica el manejo de la carne a temperaturas menores a 4°C antes de ser liberada para venta, pero es importante mencionar que el manejo inadecuado de temperaturas que están por arriba de los 4°C puede generar un riesgo por el crecimiento de microorganismos patógenos presentes en la carne para el ser humano tales como: *Salmonella*, *E. coli* O157:H7 y no-O157 productoras de shiga, *L. monocytogenes*, *Campylobacter*, *Clostridium perfringens* y *S. aureus* (Koochmaraie y col., 2005), por lo que es importante mantener la temperatura de almacenamiento entre 0°C y 4°C.

La temperatura es un factor importante con relación al pH en la conversión de músculo a carne, ya que el decaimiento del pH puede ser rápido o lento durante la glucólisis, provocando dos posibles defectos en la carne: 1.- carne pálida suave y exudativa (PSE) y 2.- carne oscura, firme y seca (DFD).

La medición del pH sobre los diferentes músculos de la canal tiene como finalidad comprobar la evolución de esta característica durante el proceso de transformación a carne. Por ello se utilizan para su medición tiempos cercanos a la obtención de la canal es decir, a los 45 minutos del sacrificio (pH45) y a las 24 horas post-mortem (pH24h), ya que éste es el momento en el que se alcanza el pH más bajo; a partir de este momento el pH se mantiene o comienza a subir según la temperatura y condiciones de almacenamiento (Lawrie, 2006).

Cuadro 9. Calidad en carne fresca por efecto de los tratamientos. ‡

	Orgánico		Inorgánico	EEM	P
	Bajos	Altos	Altos		
T45, °C	33.46	33.12	33.93	0.382	0.317
T24 h, °C	6.26	7.04	6.21	0.370	0.207
pH45	6.44	6.46	6.51	0.457	0.517
pH24 h	5.60	5.58	5.57	0.014	0.189
L*	56.34 ^a	57.94 ^{ab}	58.16 ^b	0.452	0.009
a*	8.32	8.13	7.71	0.274	0.251
b*	15.93	16.38	16.09	0.193	0.248
PPG24, %	4.54	4.70	4.65	0.374	0.956
PPG48, %	6.93	6.98	7.29	0.376	0.749
CRA, %	16.54 ^a	12.77 ^{ab}	10.90 ^b	1.408	0.015

‡ Medias de mínimos cuadrados (n= 28) y EEM= error estándar de la media.

^{ab} Superíndices diferentes en el mismo renglón indican diferencias significativas entre tratamientos.

T = Temperatura por punción a los 45 min (T45) y 24 h (T24h).

pH = pH por punción a los 45 min (pH45) y 24 h (pH24h).

Parámetros de color: Luminosidad (L*), rojos (a*) y amarillos (b*) por colorímetro Hunter.

PPG = pérdida de peso por goteo a las 24 h (PPG24) y 48 h (PPG48).

CRA = capacidad de retención de agua por centrifugación.

El pH de la carne es importante pues influye sobre las características de color, textura, sabor, capacidad de retención de agua y conservación. Como puede observarse en el cuadro 9, no hubo diferencia entre tratamientos en la variable pH a los 45 minutos ($P>0.52$) y a las 24 horas ($P>0.19$) del sacrificio (media general de 5.58). La formación de ácido láctico provoca un descenso del pH muscular que continúa hasta que se agotan las reservas de glucógeno o hasta que se inactivan las enzimas que rigen el metabolismo muscular (Lawrie, 2006). De acuerdo a la literatura (NPPC, 2001 y Lawrie, 2006) si una carne tiene un pH entre 5.5-6.1 se considera una carne normal, pero un pH menor a 5.5 a las 24 h, hay muchas posibilidades de tener carne PSE y la presencia de la condición DFD se puede presentar con un valor mayor o igual a 6.2. Para tener mayor certeza en la predicción de la calidad de la carne de acuerdo a los parámetros de pH y temperatura lo más recomendable es realizar las mediciones en tiempos posteriores pero cercanos al sacrificio (Lawrie, 2006). De acuerdo a la National Pork Producers Council (NPPC), los valores recomendados de pH de la carne a las 24 h oscilan entre 5.5-5.9. De acuerdo a lo anterior se puede concluir que en el presente estudio el producto de la conversión final de músculo a carne puede ser considerado como carne normal.

En relación al color, éste fue medido mediante un colorímetro Hunter en el que las unidades fueron las coordenadas L^* , a^* y b^* ; donde L^* representa el índice de luminosidad (desde 0 a 100, 100 corresponde al blanco absoluto y 0 al negro absoluto), a^* corresponde al índice de rojos a verdes, y b^* al índice de amarillos a azules. En general, se procuró tomar la medición en zonas homogéneas y representativas, libres de grasa intramuscular y de manchas de sangre. En las chuetas la variable L^* mostró significancia entre tratamientos ($P<0.01$), siendo la mayor luminosidad para la carne proveniente de animales alimentados con una fuente inorgánica (sulfatos) de minerales traza a un nivel de aproximadamente al 425% (porcentaje

excesivo al de los requerimientos nutricionales para porcinos), mientras que la carne de cerdos alimentados con la fuente "orgánica" al 50% de los requerimientos del animal produjo la carne menos luminosa. La variable L* está ligado, a la absorbancia que presenta la mioglobina impuesta sobre un espectro formado por la dispersión de la luz en la carne de cerdo, la cual se origina por la desnaturalización de proteínas sarcoplásmicas (Swatland, 1994). El contenido de grasa intramuscular podría ser otro factor responsable en parte de las diferencias en la luminosidad de la carne, además del espacio que existe entre las miofibrillas de la carne, lo que permite mayor o menor paso de la luz.

En las variables a* y b* no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Estas variables están relacionadas con el contenido de mioglobina y sus especies (desoximioglobina, oximioglobina y metamioglobina) que son responsables del color en el músculo (rojo vivo, púrpura, pardo) después del sacrificio, el cual está relacionado con el estado de oxidación del hierro de la mioglobina (oxidado o reducido) y con los elementos ligados al átomo del hierro. Por otro lado mientras que la hemoglobina y las flavinas definen el color intrínseco de la carne (Lawrie, 2006).

El contenido y distribución del agua influyen en las propiedades de la carne, ya que ésta debe conservar el agua durante la manipulación (Lawrie, 2006), puesto que las pérdidas pueden demeritar el valor económico de la misma. No se observaron diferencias en la pérdida de peso por goteo entre tratamientos a las 24 h (PPG24, P>0.96) y a las 48 h (PPG48, P>0.92), observándose una tendencia a un aumento en la pérdida de peso por goteo post-mortem en función del tiempo. Las pérdidas de peso como agua se producen por cambios en las miofibrillas las cuales son inducidos por la caída del pH pre-rigor y la fijación de las cabezas de miosina a los filamentos de

actina en el rigor, donde las miofibrillas se contraen (Lawrie, 2006). Para conocer la capacidad de retención de agua (CRA) se empleó un método por centrifugación después de incorporar una solución salina, encontrándose diferencias entre los tratamientos ($P < 0.02$), la mayor CRA (16.54 %) se observó en la carne de cerdo alimentados con la fuente orgánica al menor nivel de inclusión en la dieta y la menor CRA (10.90 %) se obtuvo con la dieta que contenía minerales inorgánicos en un alto nivel.

Lo anterior se podría explicar por el hecho de que la carne cuenta con proteínas miofibrilares con cargas en la superficie; cuando hay desintegración de las líneas Z por la acción de proteasas y por cambios en la permeabilidad de las membranas con una cierta difusión y redistribución iónica se presenta una sustitución de algunos iones divalentes (Ca^{++} y Mg^{++}), generando el debilitamiento de las interacciones proteína-proteína, por lo cual no permiten una mayor retención de agua.

Debido a que en el diseño del experimento no se contempló un nivel bajo de los minerales a partir de la fuente inorgánica, se optó por correr dos pruebas estadísticas más: entre las dos fuentes al mismo nivel (Cuadro 10) y entre los dos niveles de orgánicos (Cuadro 11). Al evaluar el efecto de la fuente de los nutrimentos (orgánica e inorgánica) a un nivel de inclusión alto, no se encontraron diferencias entre los tratamientos ($P > 0.15$), lo que sugiere que la fuente nutrimental a un nivel alto de inclusión no afecta las propiedades de la carne fresca.

Cuadro 10. Calidad de la carne fresca proveniente de animales alimentados con fuente orgánica e inorgánica a un nivel alto. ‡

	Orgánico	Inorgánico	EEM	P
	Altos	Altos		
T24 h, °C	7.04	6.21	0.413	0.153
pH24 h	5.58	5.57	0.011	0.506
L*	57.94	58.16	0.415	0.696
a*	8.13	7.71	0.264	0.249
b*	16.38	16.09	0.185	0.257
PPG24, %	4.70	4.65	0.390	0.929
PPG48, %	6.98	7.29	0.386	0.563
CRA, %	12.77	10.90	1.300	0.299

‡ Medias de mínimos cuadrados (n= 28) y EEM= error estándar de la media.

T = Temperatura por punción a las 24 h (T24h).

pH = pH por punción a las 24 h (pH24h).

Parámetros de color: Luminosidad (L*), rojos (a*) y amarillos (b*) por colorímetro Hunter.

PPG = pérdida de peso por goteo a las 24 h (PPG24) y 48 h (PPG48).

CRA = capacidad de retención de agua por centrifugación.

Por otro lado, en el Cuadro 11 se muestran los resultados al comparar los niveles (alto y bajo) de inclusión de minerales traza a partir de la fuente orgánica. Solo la variable de luminosidad fue significativa ($P < 0.01$) entre los niveles adicionados en la fuente orgánica, sugiriendo que un mayor consumo de minerales por parte de los cerdos podría inducir una mayor luminosidad a nivel superficial de las chuletas de cerdo, lo que el consumidor podría asociar a una carne: pálida y grisácea (entre valores 2 y 1 de escala NPPC). Por el contrario, con niveles bajos de los minerales, la carne podría tender a una luminosidad cercana al valor 3 (figura 3) en la escala NPPC. Este efecto puede ser debido a que la absorción total de los minerales (Cu, Fe, Mn y Zn) ingeridos a partir las dietas depende del estado de oxidación en el que se encuentran, si se encuentran ligados a otros compuestos (proteínas, fitato, taninos, ácidos grasos) o si generan sinéresis con algún antioxidante presente.



Figura 3. Escalas de color por la NPPC.

La CRA tiene una tendencia ($P < 0.07$) a favor de los niveles bajos de la fuente orgánica en comparación con el uso de niveles altos de la misma fuente.

Cuadro 11. Calidad en carne fresca por nivel de inclusión de los minerales traza de la fuente orgánica. †

	Orgánico		EEM	P
	Bajos	Altos		
T24h, °C	6.26	7.04	0.381	0.153
pH24h	5.60	5.58	0.047	0.731
L*	56.34	57.94	0.445	0.014
a*	8.32	8.13	0.297	0.651
b*	15.93	16.38	0.200	0.115
PPG24, %	4.54	4.70	0.369	0.768
PPG48, %	6.93	6.98	0.374	0.924
CRA, %	16.54	12.77	1.460	0.072

† Medias de mínimos cuadrados ($n = 28$) y EEM = error estándar de la media.

T = Temperatura por punción a las 24 h (T24h).

pH = pH por punción a las 24 h (pH24h).

Parámetros de color: Luminosidad (L*), rojos (a*) y amarillos (b*) por colorímetro Hunter.

PPG = pérdida de peso por goteo a las 24 h (PPG24) y 48 h (PPG48).

CRA = capacidad de retención de agua por centrifugación.

Complementando estos resultados, González et al. (2016 a) realizaron un estudio en el que incluyeron en la evaluación dos concentraciones intermedias de la fuente orgánica de los mismos nutrimentos entre el nivel alto y bajo de acuerdo al presente estudio. Los autores encontraron que la oxidación por la técnica de TBARS, actividad antioxidante por FRAP y de las

enzimas GPx, SOD y CAT no fueron diferentes entre sus tratamientos al ser medidas en carne fresca. Es posible que las condiciones de manejo en los cerdos y de la carne pos-mortem no se tuvieron condiciones de estrés que pudieran retar los sistemas antioxidantes de la carne en los que los minerales traza pueden tener un efecto.

5.2 Minerales y su biodisponibilidad en la carne de cerdo.

En este estudio se evaluó el contenido total de los nutrimentos Cu, Fe, Mn y Zn en carne de cerdo fresca y su biodisponibilidad después de la cocción. En relación al contenido total de estos nutrimentos, se encontró que, a excepción del Cu, el resto de los nutrimentos presentaron un contenido distinto al reportado en la literatura (CESNID, 2004). La carne tiene una importante contribución de nutrimentos indispensables como el Cu y el Mn, a la dieta humana en comparación con alimentos de origen vegetal (Higgs, 2000).

Cuadro 12. Resultados (ppm) de minerales totales y biodisponibles en muestras de carne de cerdo por tratamiento. ‡

		Orgánico		Inorgánico	EEM	P
		Bajos	Altos	Altos		
Cu	Total	1.82	2.26	2.30	0.191	0.052
	Biodisp	0.23 ^a	0.29 ^b	0.30 ^b	0.182	<0.001
Fe	Total	21.38 ^a	22.77 ^b	22.65 ^b	0.286	<0.001
	Biodisp	4.02 ^a	5.38 ^b	4.89 ^c	0.048	<0.001
Mn	Total	1.12 ^a	1.37 ^b	1.35 ^b	0.021	<0.001
	Biodisp	0.17 ^a	0.24 ^b	0.23 ^b	0.003	<0.001
Zn	Total	45.19 ^a	51.68 ^b	51.61 ^b	0.219	<0.001
	Biodisp	8.83 ^a	15.75 ^c	15.10 ^b	0.118	<0.001

‡ Medias de mínimos cuadrados (n= 20) y EEM= error estándar de la media.

^{ab} Superíndices diferentes en el mismo renglón indican diferencias significativas entre tratamientos.

Al analizar el efecto de los tratamientos (Cuadro 12) de acuerdo a la composición de minerales totales en la carne, se observa que hay diferencia significativa para los cuatro minerales ($P < 0.0001$), aunque en el caso del cobre la significancia fue de $P > 0.05$. Estos resultados corroboran las observaciones hechas por González *et al.*, (2016) puesto que no se encontraron efectos negativos en la producción de los cerdos (durante 84 días), aunque sí un aumento en la excreción de los nutrimentos (en heces), mientras que la concentración plasmática permaneció constante.

Martin *et al.*, (2011) encontraron que al suministrar Se, Cu, Fe, Mn y Zn en cerdos durante 35 días post destete a 50, 100 y 150% de los requerimientos nutricionales acorde a la NRC 1998, éstos nutrimentos se depositaban en el lomo de forma creciente en relación a los niveles, además de ser evaluados en hígados y plasma sanguíneo se encontró el mismo efecto. Sin embargo algunos investigadores (Coffey *et al.*, 1994, Zhou *et al.*, 1994) informaron que los cerdos alimentados con dietas que contenían concentraciones altas de una premezcla mineral traza orgánica tenían un mejor rendimiento productivo que los alimentados con fuentes inorgánicas.

Parte del contenido mineral de la carne se encuentra asociado a compuestos orgánicos; en la carne fresca sin cocinar el contenido en minerales es 1% mayor respecto a la carne cocinada, que corresponde a fosfatos y sulfatos de potasio, además de sodio, magnesio, calcio, cloro, hierro y zinc. Otros oligoelementos presentes en la carne son el flúor, el bromo, el yodo, el silicio, así como el manganeso y el cobre (Prändl, 1994).

Con respecto a la biodisponibilidad de los nutrimentos, se encontró una diferencia significativa ($P < 0.0001$) entre los tratamientos para todos ellos. La mayor biodisponibilidad se observó en los tratamientos con mayor nivel de inclusión, sin embargo el zinc proveniente de la fuente orgánica en un nivel alto de inclusión presentó un valor ligeramente mayor de biodisponibilidad a comparación de la fuente inorgánica.

Al comparar las fuentes administradas en una misma concentración (Cuadro 13), no se encontraron diferencias en el contenido total del nutrimento en la carne ($P > 0.93$).

Cuadro 13. Resultados (ppm) de minerales totales y biodisponibles en carne de cerdo por fuente del mineral al alto nivel de inclusión. †

		Orgánico	Inorgánico	EEM	P
		Altos	Altos		
Cu	Total	2.26	2.30	0.234	0.934
	Biodisp	0.29	0.30	0.226	0.920
Fe	Total	22.77	22.65	0.275	0.730
	Biodisp	5.38	4.89	0.053	<0.001
Mn	Total	1.37	1.35	0.019	0.431
	Biodisp	0.24	0.23	0.003	0.329
Zn	Total	51.68	51.61	0.207	0.804
	Biodisp	15.75	15.10	0.137	0.001

†Medias de mínimos cuadrados ($n=20$) y EEM= error estándar de la media.

Al comparar la biodisponibilidad de los nutrimentos después de haber suministrado la fuente orgánica e inorgánica al mayor nivel de inclusión, se encontró que tanto para el Fe como para el Zn, la fuente orgánica se asocia con una mayor biodisponibilidad de manera significativa ($P < 0.001$), lo que sugiere que la fuente mineral aún a un nivel alto de inclusión podría modificar la retención del mineral en la carne cocinada después de someter a una digestión. Sin embargo es importante mencionar que la pérdida de peso (principalmente por pérdida de agua) podría estar ocasionando una menor concentración de los nutrimentos.

Se sabe que la deficiencia de Fe es una de las deficiencias nutrimentales más frecuentes a nivel mundial y que este nutrimento es importante para diversas reacciones metabólicas, entre ellas el transporte de oxígeno. Se sabe que además existe una interacción importante del Fe con el Cu, pues un exceso de Cu reduce la absorción del Fe hémico (Zhao, 2014). En relación al Zn, su absorción aumenta a concentraciones altas, siendo la carne el alimento que cubre la mayoría de los requerimientos nutricionales diarios de ingesta para el ser humano. Sin embargo, la carne posee otros nutrimentos inorgánicos como el Mn y el Cu en bajas (Hill, 1983).

Respecto al nivel de inclusión en la fuente orgánica (Cuadro 14), se encontraron diferencias en el contenido total de minerales en la carne ($P < 0.0001$). Al tomar como referencia los valores de CESNID (2004), el Cu encontrado en el presente estudio fue mayor (2.3 ppm) que el reportado (1.3 ppm); en el caso del Fe este se encontró en mayor cantidad (22.8 ppm) que el reportado (9.0 ppm), en el caso del Mn se obtuvo de igual forma mayor cantidad (1.5 ppm) en comparación con lo reportado en la literatura (0.3 ppm), mientras que en el Zn sucedió el mismo efecto encontrándose una cantidad mayor en el estudio (51.7 ppm) con respecto a reportes previos (24.0 ppm).

Cuadro 14. Resultados (ppm) de minerales totales y biodisponibles en carne de cerdo por nivel de inclusión para la fuente orgánica. ‡

		Orgánico		EEM	P
		Bajos	Altos		
Cu	Total	1.82	2.26	0.165	0.018
	Biodisp	0.23	0.29	0.134	<0.001
Fe	Total	21.38	22.77	0.308	0.002
	Biodisp	4.02	5.38	0.054	<0.001
Mn	Total	1.12	1.37	0.024	<0.001
	Biodisp	0.17	0.24	0.003	<0.001
Zn	Total	45.19	51.68	0.225	<0.001
	Biodisp	8.83	15.75	0.079	<0.001

‡Medias de mínimos cuadrados (n=20) y EEM= error estándar de la media.

Al evaluar la biodisponibilidad de los nutrimentos estudiados en carne cocinada de acuerdo al nivel del mineral en la fuente orgánica, se observó que todos los minerales tuvieron alta biodisponibilidad ($P < 0.0001$) al mayor nivel de inclusión en la dieta del cerdo. En relación al Fe, la forma biodisponible es la que se encuentra en forma hémica, esta forma química es absorbida en un rango de 2.7–5.4 ppm en comparación con la no-hémica (0.36-2.70 ppm) (Hurrell, 1997). Se ha reportado que el intervalo de biodisponibilidad es de 38-87% para los valores del hierro hémico respecto al total, analizando las carnes de res, cerdo, cordero, ternera, caballo, avestruz, pollo y pavo (Lombardi-Boccia, Martínez-Domínguez y Aguzzi, 2002). Las proteínas de la carne pueden aumentar la absorción de ambos tipos de hierro, lo cual a veces se ha llamado "factor cárnico". El mecanismo exacto de este fenómeno no se conoce, pero se han postulado algunas hipótesis: las proteínas o los péptidos provocan la reducción del hierro de la dieta de la forma férrica a la ferrosa, lo que lleva a una mejor absorción del mismo; también se ha propuesto que los péptidos forman quelatos solubles con el Fe que son absorbidos dentro de las células intestinales (Higgs, 2000).

Con respecto a la biodisponibilidad de Mn, esta osciló entre 0.19-0.23 ppm y para el Cu sólo 0.09 ppm pueden ser absorbidos por adultos (Hurrell, 1997). En los estudios *in vitro* realizados en este estudio se alcanzaron 0.17-0.24 ppm en Mn y de 0.23-0.29 ppm para el caso del Cu.

La carne también es una de las mejores fuentes dietéticas de Zn, se ha estimado que el Zn biodisponible de la carne de cerdo se encuentra en un rango de 9-16 ppm en adultos (Gallaher, 1988). La biodisponibilidad del Zn aumenta cuando se consume con proteínas animales y disminuye por efecto de inhibidores como el fitato y el oxalato, que se encuentran en grandes cantidades en muchos vegetales (Higgs, 2000).

6. Conclusiones.

- Las características fisicoquímicas de la carne de cerdo que se vieron afectadas por los tratamientos o el nivel del mineral en la fuente orgánica fueron la luminosidad y la capacidad de retención de agua. Al usar niveles bajos de la fuente orgánica la luminosidad fue menor en la superficie del lomo de cerdo al retener mayor cantidad de agua.
- Si se modifican los niveles de inclusión de los nutrimentos inorgánicos en la dieta puede existir una relación directa con el contenido de éstos en la carne.
- El tipo de fuente de los minerales usados en las dietas de los cerdos no afectó el contenido total de minerales en la carne fresca.
- La biodisponibilidad de los nutrimentos de la carne cocinada se vio favorecida por los altos niveles de inclusión de los mismos; además se observó un aumento de 2.42% de biodisponibilidad por parte de la fuente orgánica en comparación con la fuente inorgánica.

7. Referencias.

- Baech SB, et al. (2003) Nonheme-iron absorption from a phytate-rich meal is increased by the addition of small amounts of pork meat. *Am. J. Clin. Nutr.* 77(1):173-9.
- Bjorn-Rasmussen E, Hallberg L. (1979) Effect of animal proteins on the absorption of food in man. *Nutr Metab* 23(3):192-202.
- CESNID. 2004. Tablas de composición de alimentos. Ed. Mc. Graw-Hill-Interamericana.
- Coffey, R. D., G. L. Cromwell, and H. J. Monegue. (1994). Efficacy of a copper-lysine complex as a growth promotant for weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 72, 2880–2886.
- Cook JD, Reddy MB. (2001). Effect of ascorbic acid intake on nonheme-iron absorption from a complete diet. *Am. J. Clin. Nutr.* 73(1):93-8.
- Creech, B. L., Spears, J. W., Flowers, W. L., Hill, G. M., Lloyd, K. E., Armstrong, T. A. and Engle, T. E. (2004). Effect of dietary trace mineral concentration and source (inorganic vs. chelated) on performance, mineral status, and fecal mineral excretion in pigs from weaning through finishing. *J. Anim. Sci.* 82:2140–2147.
- Eitenmiller, R. (2004) *Vitamin E, Food Chemistry, Composition and Analysis*, 1ª Edición, Marcel Dekker Inc., NY, USA. pp 23-27,172-197.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). [En línea] Disponible en <http://www.ugrpg.org.mx/pdfs/Panorama%20Agroalimentario%20Carne%20de%20cerdo%202017.pdf> [último acceso 03 de septiembre 2017].
- Gallaher, D. D. et al. (1988) Bioavailability in humans of zinc from beef: intrinsic vs extrinsic labels. *Am. J. Clin. Nutr.* 48, 350-354.
- González ME, López LH, Pettigrew J, Cuarón JA. (2016). Niveles de minerales orgánicos (Cu, Fe, Mn, y Zn) en el crecimiento y finalización de cerdos. VII Congreso CLANA, Cancún (a).

- González ME, López LH, Pettigrew J, Cuarón JA. (2016). Niveles pro-oxidantes de minerales y su interacción con vitamina E en la calidad de la carne de cerdo. VII Congreso CLANA 2016, Cancún (b).
- Greenberg SM, Tucker RG, Heming AE, Mathues JK. (1957). Iron absorption and metabolism. I. Interrelationship of ascorbic acid and vitamin E. *J Nutr* 63(1):19-31.
- Gruhn, H. (1965) *Sond. Nahrung*, 9, 325.
- Hallberg L, Brune M, Rossander L. (1986). Effect of ascorbic acid on iron absorption from different types of meals. Studies with ascorbic-acid-rich foods and synthetic ascorbic acid given in different amounts with different meals. *Hum. Nutr. Appl. Nutr.* 40(2):97-113.
- Hallmark, E. I. and Van Duyne, F. U. (1961) *J. Amer. Diet. Ass.* 45, 139.
- Hansen L.L., Claudi-Magnussen C., Jensen S.K. y Andersen H.J. (2006). Effect of organic pig production system on performance and meat quality. *Meat. Sci.* 74:605-615.
- Harris, R. E. and Von Loesecke, H. (1960). *Nutritional Evaluation of Food Processing*, Wiley, New York. 467 pp.
- Higgs, J. D. (2000). The changing nature of red meat: 20 years of improving nutritional quality. *Trends in Food Science and Technology.* 11(3): 85-95.
- Higgs, J. D., Mulvihill, B. (2002). *The nutritional quality of meat. Meat processing. Improving quality.* Editorial Woodhead Publishing. Inglaterra. Pp. 65-104.
- Hill, G. H., E. R. Miller, and H. D. Stowe. (1983). Effect of dietary zinc levels on health and productivity of gilts and sows through two parities. *J. Anim. Sci.* 57:114-122.
- Hill, G. H. (2014). Comparison of organic and inorganic zinc sources to maximize growth and meet the zinc needs of the nursery pig1. *Am. Anim. Sci.* 92:1582-1593.
- Hunt JR, Gallagher SK, Johnson LK. (1994). Effect of ascorbic acid on apparent iron absorption by women with low iron stores. *Am. J. Clin. Nutr.* 59(6):1381-1385.

- Hurrell RF, Lynch SR, Trinidad TP, Dassenko SA, Cook JD. (1988). Iron absorption in humans: bovine serum albumin compared with beef muscle and egg white. *Am. J. Clin. Nutr.* 47(1):102-7.
- Hurrell, R. F. (1997) Bioavailability of iron. *Eur. J. Clin. Nutr.* 51 (Suppl. 1), S4-S8.
- Hurrell RF, Reddy MB, Juillerat M, Cook JD. (2006). Meat protein fractions enhance nonheme iron absorption in humans. *J. Nutr.* 136:2808–12
- Jensen, C.; Flensted-Jensen, M.; Skibsted, L.H.; Bertelsen, G. (1998). Effects of dietary rape seed oil, copper (II) sulfate and vitamin E on drip loss, colour and lipid oxidation of chilled pork chops packed in atmospheric air or in a high oxygen atmosphere. *Meat. Sci.* 50, 211–221.
- Kanner, J.; Hazan, B.; Doll, L.; (1998). Catalytic “free” iron in muscle foods. *J. Agric. Food Chem.* 36, 412–415.
- Kingston, H.M., and Jassie, L.B., (1988). In *Introduction to Microwave Sample Preparation*, eds. Kingston, H.M. and Jassie, L.B., American Chemical Society, Washington DC, pp. 155- 166.
- Kornegay, E. T., and M. W. A. Vestergren. (2001). *Swine Nutrition*. 2nd ed. A. J. Lewis and L. L. Southern, ed. CRC Press, New York, pp 609-630.
- Layrisse M, Martinez-Torres C, Roche M. (1969). Effect of interaction of various foods on iron absorption. *Am. J. Clin. Nutr.* 21(10):1175-83.
- Lawrie, R. A. (2006) *Meat Science*, 7^a Edición, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, FL, USA. pp 57-67, 75-100,103-104,175-183, 345-349.
- Lombardi-Boccia, G.; Martínez-Domínguez, B. y Aguzzi, A. (2002) Total heme and nonheme iron in raw and cooked meats. *J. Food Sci.* 67, 1738.
- Lynch SR, Cook JD. (1980). Interaction of vitamin C and iron. *Ann N.Y. Acad. Sci.* 355:32-44.
- Maria C. Thomaz. (2014). Inorganic and organic trace mineral supplementation in weanling pig diets. *Ann. Braz. Acad. Sci.* 87, 1071-1081.

- Martin, R. E., D. C. Mahan, G. M. Hill, J. E. Link, and J. S. Jolliff. (2011). Effect of dietary organic microminerals on starter pig performance, tissue mineral concentrations, and liver and plasma enzyme activities. *J. Anim. Sci.* 89:1042–1055.
- McDowell, L. R. (2003). *Minerals in Animal and Human Nutrition*. 2nd ed. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Monahan, F.J.; Buckley, D.J.; Gray, J.I.; Morrissey, P.A.; Asghar, A.; Hanrahan, T.J.; Lynch, P.B.(1990). Effect of dietary vitamin E on the stability of raw and cooked pork. *Meat. Sci.* 27:99–108.
- Mulvihill B, Kirwan FM, Morrissey PA, Flynn A. (1998). Effect of myofibrillar muscle proteins on the in vitro bioavailability of non-haem iron. *Int J. Food. Sci. Nutr.* 49(3):187-92.
- NPPC. 2000. *Pork quality standards*. National Pork Producers Council publication, Des Moines, IA.
- NPPC. 1999. *Genetic evaluation: Maternal line program results*. National Pork Producers Council publication, Des Moines, IA.
- NRC. 1998. *Nutrient Requirements of Swine*. 10th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Official Methods Of Analysis of The Association Of Official Analytical Chemists (AOAC 999.10). 17th edition, 2000.
- Official Methods Of Analysis of The Association Of Official Analytical Chemists (AOAC 930.15) 15th, edition 1990.
- Organización de la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2016) *Minerales* [En línea] Disponible en <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab492s/ab492s04.htm> [último acceso 31 de octubre 2016].
- Organización de la Alimentación y la Agricultura (FAO) 2016 *Fundamento de ICP* [En línea] Disponible en <http://www.fao.org/docrep/010/ah833s/ah833s22.htm> [último acceso 19 de mayo 2017].
- Prändl O. (1994). Obtención de la carne. En: *Tecnología e Higiene de la Carne*, editado por Prändl O., Fischer A., Schmidhofer T. y Sinell H. pp. 5-7. Ed. Acribia S.A.

- Price, J. Schweigert, B. (1994). *Ciencia de la carne y de los productos cárnicos*. 2da Edición. Editorial ACRIBIA S. A., Zaragoza, España. Pp. 57-109, 175-188.
- Reinhold, J.G. (1988). In: *Trace Minerals in Foods*, ed. Smith, K.T., Marcel Dekler, New York pp. 1-55.
- SAGARPA. 2014. Consumo Per Cápita de Carne de Cerdo. [En línea] (actualizado 28 de noviembre 2014) Disponible en <http://sagarpa.gob.mx/saladeprensa/2012/Paginas/2014B942.aspx> [último acceso 12 de mayo 2017].
- SAGARPA/SIAP/ASERCA, SE y SHCP/SAT/AGA. Cosechando números del campo. [En línea] (actualizado febrero 2017) Disponible en <http://www.numerosdelcampo.sagarpa.gob.mx/publicnew/productosPecuarios/> [último acceso 03 de septiembre 2017].
- Secretaría de Economía (SE), Sistema de Información Arancelaria Vía Internet (SIAVI). [En línea] (actualizado febrero 2017) Disponible en <http://www.economia-snci.gob.mx/> [último acceso 03 de septiembre 2017].
- Swatland, H.J. (1994). Physical measurements of meat quality: optical measurements, pros and cons. *Meat. Sci.* 36:251-259.
- Teucher B, Olivares M, Cori H. (2004). Enhancers of iron absorption: ascorbic acid and other organic acids. *Int. J. Vitam. Nutr. Res.* 74(6):403-19.
- Zhou, W., E. T. Kornegay, H. van Laar, J. W. G. M. Swinkels, E.A. Wong, and M. D. Lindemann. (1994). The role of feed consumption and feed efficiency in copper-stimulated growth. *J. Anim. Sci.* 72:2385-2394.
- Zhao, J. 2014. Effects of a Chelated Copper as Growth Promoter on Performance and Carcass Traits in Pigs. *Asian-Australian J. Anim. Sci.* 27:965-973.