



RECIENA

Revista Científica Agropecuaria

LA IMPORTANCIA DEL ZINC EN EL DESARROLLO REPRODUCTIVO DEL CERDO MACHO: UNA REVISIÓN

Artículo Original

THE IMPORTANCE OF ZINC IN THE REPRODUCTIVE DEVELOPMENT OF THE MALE PIG: A REVIEW

Martínez-Velasco, Isis Yayoi ¹ *; De Loera-Ortega, Yasmin Guadalupe ²; Guevara-González, Jesús Alberto ²; García-Contreras, Adelfa del Carmen ³; López-López, María Isabel ⁴

Recibido: 14/01/2022 · Aceptado: 15/03/2022

RESUMEN

El macho porcino requiere una serie de nutrimentos esenciales para satisfacer sus necesidades de mantenimiento, crecimiento y reproducción; dentro de esos nutrimentos destaca el zinc (Zn), el cual es un micro mineral presente en la mayoría de las células, en el organismo desempeña funciones estructurales, catalíticas y reguladoras. Es sabido que este micro mineral contribuye en la producción y secreción de diversas hormonas, debido a su efecto a nivel del eje hipotálamo-hipófisis-gónadas. De igual manera favorece la producción y viabilidad espermática, además de prevenir su degradación. Se ha observado que dependiendo de la fuente de Zn (orgánica o inorgánica), el comportamiento de este mineral es biológicamente diferente, y produce efectos distintos en el organismo.

Es por lo anterior, que el objetivo de esta revisión es identificar la importancia reproductiva del mineral Zinc, enfatizando en las distintas fuentes y dosis utilizadas desde etapas tempranas de crecimiento hasta el desarrollo de la vida reproductiva del cerdo macho.

Palabras clave: Zinc, reproducción, macho porcino.

ABSTRACT

The male pig requires a series of essential nutrients to satisfy its needs for maintenance, growth and reproduction; among these nutrients, zinc (Zn) stands out, which is a micro mineral present in most cells, in the body, it performs structural, catalytic and regulatory functions. It is known that this micro mineral contributes to the production and secretion of various hormones, due to its effect on the hypothalamic-pituitary-gonad axis. Similarly, it favors sperm production and viability, as well as preventing their degradation. It has been observed that depending on the source of Zn (organic or inorganic), the behavior of this mineral is biologically different, and produces different effects in the body.

Therefore, the objective of this review is to identify the reproductive importance of the mineral Zinc, emphasizing the different sources and doses used from the early stages of growth to the development of the reproductive life of the male pig.

Keywords: Zinc, reproduction, male pig.

¹ División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Departamento de Producción Agrícola y Animal, Maestría en Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Xochimilco, Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Delegación Coyoacán, C.P. 04960, Ciudad de México, México.

² Departamento de Ciencias Pecuarias, Licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Campo Cuatro. Carretera Cuautitlán-Teoloyucan Km. 2.5, San Sebastián Xhala, C.P. 54714 Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

³ División de Ciencias Biológicas y de la Salud Departamento de Producción Agrícola y Animal, Licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Xochimilco, Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Delegación Coyoacán, C.P. 04960, Ciudad de México, México.

⁴ Recursos Genéticos y Productividad- Ganadería. Colegio de Posgraduados, Carretera México- Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco C.P. 56230, Estado de México, México.

Correspondencia: yayoivet@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9341-6854

1. INTRODUCCIÓN

Los cerdos durante las etapas de rápido crecimiento requieren una gran cantidad de nutrimentos para tener un buen desarrollo, uno de estos nutrientes es el Zinc (Zn), el cual es un micro mineral presente en la mayoría de las células del organismo, desempeña funciones estructurales, catalíticas y reguladoras. Se ha demostrado que, en la dieta de los cerdos este mineral es esencial, ya que actúa directamente en funciones reproductivas, metabólicas, inmunes y digestivas.

Durante las últimas décadas, la indiscriminada utilización de micronutrientes para la alimentación animal con el fin de obtener mayor rentabilidad ha ocasionado procesos de acumulación y excreción de éstos en grandes cantidades, causando disturbios metabólicos y desbalances nutricionales en los animales, además de estar relacionado con problemas ambientales debido a su elevado nivel de excreción. Es por ello por lo que, la industria alimentaria actualmente recurre al uso de fuentes minerales orgánicas, ya que han demostrado una reducción en la excreción de elementos como el Zn, debido a esto, los aspectos ambientales se han convertido en una prioridad para los nutriólogos, una exigencia para los porcicultores, y una demanda legal por parte de los gobiernos (normatividad).

Es por ello que, se hace necesario establecer estrategias que permitan tener un manejo más eficiente de las fuentes minerales y particularmente del Zn, así como, poder establecer los niveles que deben ser incorporados en las dietas porcinas, sin que haya efectos negativos a nivel reproductivo, siempre buscando potencializar la capacidad de los reproductores porcos por medio de la nutrición.

Los estudios realizados con Zn son amplios en aspectos productivos, pero el Zn como un elemento fundamental en la reproducción del semental porcino, no ha sido del todo estudiado. García *et al.* (2011), De Loera (2016), Rodríguez-Gaxiola *et al.* (2016) estudiaron el papel que desempeña el Zn, en el correcto funcionamiento y desarrollo del aparato reproductor del macho porcino, y su importancia en la presencia de la libido. Señalando aquella información que refieran las fuentes y dosis utilizadas del mineral, la biodisponibilidad, su repercusión medioambiental y los efectos en el bienestar general de los animales desde etapas tempranas de crecimiento, hasta el desarrollo de su vida reproductiva.

2. MÉTODOS

Para el desarrollo del presente artículo, se realizó una recopilación de diversos artículos, libros y revistas sobre el tema.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El mineral Zn en el organismo

El Zn es un elemento presente en la mayoría de las células, que pertenece a la familia de los metales en transición y

su principal vía de transporte (activo) en el organismo, es por difusión facilitada a través de la membrana celular (Bonaventura *et al.*, 2015).

Este micro mineral desempeña funciones catalíticas y reguladoras en una serie de procesos metabólicos (Ghaffari y Arabyaghuobi, 2018), actúa como ion estructural y genera estabilidad en las membranas biológicas, a través de la influencia que ejerce en la fluidez de los lípidos, asimismo, guarda una estrecha relación con la síntesis de proteínas (Aoki y Prado, 2008; Zhao *et al.*, 2016), además de que coactiva más de 300 enzimas (Cuadro 1), y aumenta la activación de otras como el glutatión peroxidasa, catalasa, superóxido dismutasa. Asimismo, reduce la actividad de enzimas promotoras de oxidantes como la ácido nítrico sintasa inducible, y la NADPH (nicotinamida adenina dinucleótido fosfato) oxidasa, desempeñando funciones importantes en el control de la producción de especies reactivas de oxígeno (detoxicador de radicales libres) (Prasad, 2014; Parra *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2016).

Cuadro 1. Enzimas que utilizan zinc como cofactor

Enzima	Localización	Función
Fosfolipasa C	Membrana plasmática (bacterias).	Cataliza la producción de dos segundos mensajeros. 4, 5 bifosfato de fosfatidil inositol 1, 4,5- trifosfato de inositol (IP ₃) + diacilglicerol.
Anhidrasa carbónica	Células parietales del estómago	Formación de Ácido Clorhídrico en el estómago.
Deshidrogenasa alcohólica	Citoplasma	Oxida el grupo hidroxilo a un aldehído.
Fosfatasa alcalina	<i>Escherichia coli</i>	Desfosforila o remueve un grupo fosforilo de un éster de fosfatos.
5'Nucleotidasa	Extracelular	Actúa sobre el proceso de degradación de los nucleótidos de purina, eliminando el grupo fosfato.
Ribonucleasas	ARN	Cataliza la hidrólisis de ARN en componentes más pequeños.
Colagenasa	Extracelular	Cataliza el rompimiento de la triple hélice de la colágena entre Gly 775 e Ile 776.
ARN polimerasa	Intracelular	Elonga las cadenas de ARN.
ADN transcriptasa	Intracelular	Hace una copia de ADN a partir de una molécula de ARN.
Aspartato transcarbamoilasa	Intracelular	Cataliza la reacción: Carbamoilfosfato + aspartato N-carbamoilaspartato.
Carboxilpeptidasa A y B	Extracelular	Es secretada por las células exocrinas del páncreas y sirve para degradar péptidos cortos a partir del carboxilo terminal.
Zn-proteasa	Extracelular	Fragmenta cadenas polipeptídicas.
Termolisina	Extracelular (en bacterias)	Escinde específicamente uniones peptídicas conteniendo aminoácidos como: leucina, isoleucina y valina.
Disulfuroisómeras de proteínas	Reticulo endoplásmico	Cataliza el intercambio o reacomodo de las uniones disulfuro.

Adaptado de: Church *et al.*, 2007; Aoki y Prado, 2008; Heo *et al.*, 2013; Romo-Valdez *et al.*, 2017.

El Zn también actúa como antibacteriano, desempeña funciones antivirales y se encuentra presente en la mayoría de fluidos del organismo: secreciones oculares, pulmonares,

nasales, en la orina y saliva, además de intervenir en el metabolismo energético, equilibrio ácido-básico, competencia inmune, metabolismo de ácidos nucleicos, integridad del tejido epitelial, reparación y división celular, transporte, así como en la utilización de la vitamina A y absorción de vitamina E (Kelleher *et al.*, 2011; McDonald *et al.*, 2013; Romo-Valdez *et al.*, 2018).

Es sabido que el cuerpo contiene de 1.5 a 2.5 g de Zn, destacando que se encuentra prácticamente en la totalidad de las células, sin embargo, existe con mayor abundancia en determinados tejidos animales. Un claro ejemplo de ello es el tejido óseo y el músculo esquelético, que en conjunto contienen el 90 % del Zn total del organismo. Mientras que, en el encéfalo, pulmones y corazón las concentraciones son relativamente estables y no responden a variaciones del contenido micro mineral de la dieta. En otros tejidos como huesos, testículos, próstata, pelo y sangre, el contenido de Zn es modificado por la cantidad ingerida a través de la dieta (Torres y Bahr, 2004).

Absorción y transporte del Zn en el organismo

La absorción y retención de este mineral es mayor durante los procesos de crecimiento que durante la etapa de desarrollo de un organismo. El proceso de homeostasis de Zn en las células es controlado a través de mecanismos de absorción, eliminación y retención intracelular, estando asociado con la expresión de genes y transportadores de Zn (Cousins *et al.*, 2006).

Para la absorción de Zn intervienen proteínas no enzimáticas llamadas Metalotioneínas (MT), las cuales son pequeñas y ricas en cisteína, éstas actúan unidas a metales y presentan varias isoformas (Bonaventura *et al.*, 2015; Zetzsche *et al.*, 2016), las cuales desempeñan un papel en la regulación de la homeostasis del Zn, ya que funciona como un depósito intracelular, lo que facilita el movimiento de Zn hacia las moléculas diana y permite que esté disponible para otros organelos como la mitocondria y el núcleo (Juárez-Rebollar y Méndez-Armenta, 2014; Ghaffari y Arabyaghuobi, 2018). El Zn en la dieta aumenta la expresión de las MT de una manera dependiente de la dosis, por lo que, su presencia en diferentes órganos también afecta a otros micro elementos como el cobre (Cu) (Zetzsche *et al.*, 2016).

El Zn se transporta en su forma iónica como un catión divalente (Zn²⁺), a través de membranas biológicas (Litchen y Cousins, 2009; Burgger y Windisch, 2017). Debido a sus características hidrofílicas (Bonaventura *et al.*, 2015), estos iones de Zn se unen principalmente a pequeños aminoácidos o péptidos en la luz del intestino, se liberan en las uniones estrechas y son absorbidos por el mecanismo portador (familia ZIP) (Ghaffari y Arabyaghuobi, 2018).

En el Cuadro 2, se observan los transportadores que controlan la homeostasis del Zn, regulando la concentración, distribución intracelular y extracelular (Cousins *et al.*, 2006; Litchen y Cousins, 2009).

Cuadro 2. Transportadores de Zn y su distribución en el organismo

<i>Transportadores ZIP</i>	<i>Distribución</i>
ZIP1	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos.
ZIP2	Próstata y células epiteliales uterinas.
ZIP3	Médula ósea, bazo, intestino delgado e hígado.
ZIP4	Riñón, intestino delgado, estómago, colon, yeyuno y duodeno.
ZIP5	Células del intestino, páncreas, hígado y riñón.
ZIP6	Próstata, placenta y glándula mamaria.
ZIP7	Glándula mamaria.
ZIP8	Fibroblastos y condrocitos.
ZIP9	Linfocitos.
ZIP10	Glándula mamaria, cerebro e hígado.
ZIP11	Testículos, tracto digestivo: estómago, íleon y ciego.
ZIP12	Cerebro y ojos.
ZIP13	Huesos, dientes y tejido conectivo.
ZIP14	Células mamíferas.
<i>Transportadores ZnT</i>	<i>Distribución</i>
ZnT1	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos, membrana plasmática.
ZnT2	Glándula mamaria, próstata, retina, células acinares pancreáticas, intestino delgado, hígado y riñón.
ZnT3	Cerebro (vesículas sinápticas), testículos y páncreas.
ZnT4	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos, membrana plasmática, intestino delgado.
ZnT5	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos, membrana plasmática de enterocitos.
ZnT6	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos, membrana plasmática, intestino delgado.
ZnT7	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos, membrana plasmática.
ZnT8	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos, citoplasma y núcleo.
ZnT9	Núcleo mediante mitosis.
ZnT10	Membrana plasmática.

Adaptado de: Cousins *et al.*, 2006; Litchen y Cousins, 2009; Bonaventura *et al.*, 2015.

Las proteínas transportadoras se clasifican en dos familias: SLC39 (ZIP) y SLC30 (ZnT) (Bonaventura *et al.*, 2015); por un lado, los transportadores ZIP que constan de 14 isoformas (ZIP1 a ZIP14), facilitan la entrada de Zn desde el espacio extracelular o desde las vesículas intracelulares hasta el citoplasma, mientras que los transportadores ZnT, que constan de 10 isoformas (ZnT1 a ZnT10), movilizan el Zn en dirección opuesta (Prasad, 2012; Bonaventura *et al.*, 2015).

Por lo tanto, la homeostasis de este elemento es óptima durante los períodos de escasa ingesta como resultado de una mayor absorción de éste en la dieta (Torres y Bahr, 2004).

El Zn en la dieta del macho porcino

El macho porcino requiere una serie de nutrimentos esenciales para satisfacer sus necesidades de mantenimiento, crecimiento y reproducción (FAO, 2018), basada en dietas adecuadas a la genética, etapa fisiológica-productiva (machos jóvenes o maduros), estado sanitario de los animales, condiciones ambientales en donde estén alojados, manejo y sistema de producción al que estén sometidos. Por otra parte, la formulación debe obedecer las normativas oficiales que rigen en cada país para el uso y fabricación de alimentos; los ingredientes utilizados para la formulación de dietas tienen diversas características fisicoquímicas, toxicológicas, perfil e interacciones nutritivas, que condicionan su nivel de inclusión, ocasionando con ello diversos efectos productivos, además de variar en costos que limitan o favorecen su utilización (García-Contreras *et al.*, 2012).

La diferencia en el nivel del mineral en las dietas para las distintas etapas fisiológicas de los cerdos refleja la necesidad de contar con fuentes con alta biodisponibilidad y costos asumibles para la industria, incluyendo la responsabilidad de evitar un alto grado de excreción que contamine al medio ambiente (Cromwell, 2018), ya que no todo el Zn disponible en la dieta es absorbido, por lo cual es eliminado vía las excretas, diseminándose en suelos con riesgos crecientes de “fitotoxicidad” de metales pesados, especialmente en áreas de producción intensiva de cerdos (Matte *et al.*, 2017). En un estudio realizado por Martínez *et al.* (2020) demostraron que no se afectaba el cultivo y producción de maíz, después de 12 años de aplicar purines con niveles altos de Zn en el suelo, en tanto que Clemente *et al.* (2020), señalaron que la concentración de Zn en los residuos de las granjas no necesariamente es fitotóxica, inclusive en etapas de germinación de plantas cultivadas. No obstante, Moretti *et al.* (2020), explica la pertinencia de no olvidar el efecto de lixiviación y eutrofización que produce la aplicación de los efluentes y purines porcinos, ya que esto agudiza los problemas de los mantos freáticos superficiales y profundos. Además, el Cu y Zn, así como otros metales pesados, se acumulan en la capa superior del suelo con posibles consecuencias para la salud animal (por ejemplo, intoxicación por cobre en ovinos), pero también a la población humana (Jongbloed *et al.*, 1997; Sabroso y Pastor, 2004).

En el Cuadro 3, se observan los niveles de inclusión de Zn para los cerdos macho, en distintas etapas productivas, recomendados por diferentes autores en los últimos 40 años. Se puede observar, que los niveles son distintos, según el autor que se consulte, pero lo que es evidente es que, con el transcurrir de los años, los niveles han ido en aumento, además que nuevas fuentes (orgánicas) han sido consideradas. También, se identifica, que, en los niveles recomendados para los lechones, no existe una diferenciación entre machos enteros o castrados y hembras. No obstante, García (2010) y FEDNA (2010), recomiendan un aumento de 20 mg.kg⁻¹ de dieta, siendo más bajos para machos de reemplazo (100 a 140 kg de peso vivo), que los recomendados para los verracos activos.

Cuadro 3. Recomendaciones de Zn para cerdos macho en distintas etapas fisiológicas - productivas (mg.kg⁻¹)

Transportadores ZIP	Distribución
ZIP1	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos.
ZIP2	Próstata y células epiteliales uterinas.
ZIP3	Médula ósea, bazo, intestino delgado e hígado.
ZIP4	Riñón, intestino delgado, estómago, colon, yeyuno y duodeno.
ZIP5	Células del intestino, páncreas, hígado y riñón.
ZIP6	Próstata, placenta y glándula mamaria.
ZIP7	Glándula mamaria.
ZIP8	Fibroblastos y condrocitos.
ZIP9	Linfocitos.
ZIP10	Glándula mamaria, cerebro e hígado.
ZIP11	Testículos, tracto digestivo: estómago, íleon y ciego.
ZIP12	Cerebro y ojos.
ZIP13	Huesos, dientes y tejido conectivo.
ZIP14	Células mamíferas.
Transportadores ZnT	Distribución
ZnT1	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos, membrana plasmática.
ZnT2	Glándula mamaria, próstata, retina, células acinares pancreáticas, intestino delgado, hígado y riñón.
ZnT3	Cerebro (vesículas sinápticas), testículos y páncreas.
ZnT4	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos, membrana plasmática, intestino delgado.
ZnT5	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos, membrana plasmática de enterocitos.
ZnT6	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos, membrana plasmática, intestino delgado.
ZnT7	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos, membrana plasmática.
ZnT8	Ubicuo, expresado en la mayoría de los tejidos, citoplasma y núcleo.
ZnT9	Núcleo mediante mitosis.
ZnT10	Membrana plasmática.

Adaptado de: National Research Council (NRC); Agricultural Research Council: the nutrient requirements of pigs (ARC); Institut National de la Recherche Agronomique (INRA); Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (GFE); Tablas Brasileñas para Aves y Cerdos (TBAYC); National Swine Nutrition Guide Tables on Nutrient Recommendations, Ingredient Composition, and Use Rates (NSNG); Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (FEDNA). *Primeras tablas en considerar las fuentes orgánicas e inorgánicas de minerales.

A nivel internacional, los niveles permisibles de Zn en la alimentación animal no están regulados (López *et al.*, 2015; Brugger y Windisch, 2017), excepto en la Unión Europea, la cual establece en el Reglamento de Ejecución (UE) 2016/1095 de la Comisión, los límites permisibles de suministro de Zn en la dieta de los cerdos, siendo para lechones y cerdas 150 mg.kg⁻¹, y en cerdos de engorda y verracos hasta 120 mg.kg⁻¹.

Las restricciones de inclusión de niveles de Zn, impuestas en los países de la Unión Europea, corresponden al impacto ambiental del mineral, producto de la deposición de excretas de

cerdos en los suelos, lo cual ha llevado a considerar al Zn como uno de los tres minerales más contaminantes para suelos, agua y aire. Por tal motivo, se restringió su uso a partir del año 2010 en la Unión Europea, aunque en el resto del mundo esto no sucede.

Una forma de contribuir a la reducción del daño causado por este mineral ha sido en primera instancia la utilización de minerales orgánicos en las dietas, lo cual permite que se reduzca la excreción del Zn a través de las excretas. Sin embargo, no existen suficientes estudios que indiquen cual es el nivel adecuado que se debe utilizar de Zn en dietas para las diferentes etapas productivas, al utilizar minerales con mayor biodisponibilidad (García, 2010).

La cantidad de un mineral que se absorbe y es utilizado por el animal, depende además de factores como la edad, el clima, la salud intestinal, el trabajo y potencial de crecimiento de los cerdos (Romo-Valdez *et al.*, 2018).

Así también, otros factores que influyen en la cantidad de Zn necesaria en las dietas, es la concentración unida a los compuestos en las células vegetales (fitatos), las interacciones antagónicas con otros minerales que pueden ocurrir dentro del tracto gastrointestinal y la forma química del mineral (García, 2010; Ghaffari y Arabyaghuobi, 2018). En el Cuadro 4, se indica el contenido y biodisponibilidad del Zn en diferentes fuentes del mineral.

Cuadro 4. Contenido y Biodisponibilidad relativa de Zn en distintas formas químicas

Forma química	Contenido de Zn (%)	Biodisponibilidad relativa
<i>Fuentes inorgánicas</i>		
Sulfato de Zn heptahidratado	22.2	100
Carbonato de Zn	54.0	-
Carbonato básico de Zn	58.5	100
Cloruro de Zn	54.8	-
Cloruro de Zn tetra básico	62.2	100
Óxido de Zn	72.5	50-80
Óxido de Zn GA ¹	73.4	74
Polvo metálico de Zn	98.3	-
Sulfato de monohidratado	35.0	-
Sulfato de monohidratado GA ¹	35.6	-
Sulfato de heptahidratado GA ¹	22.0	-
<i>Fuentes Orgánicas</i>		
Complejo Zn aminoácido	12	-
Complejo Zn lisina	7.20	95-100
Complejo Zn metionina	21.9	92
Quelato Zn aminoácido	9.42	-
Quelato Zn MHA ²	16.0	95-100
Propionato de Zn	27	-
Proteinato de Zn	14.8	100
Zn polisacárido	19.0	-

¹ grado alimenticio

² Metionina Hidroxi-Análoga.

Adaptado de: García, 2010; TBCyA, 2017.

Existen componentes del alimento que limitan la biodisponibilidad del Zn, tal es el caso de otros elementos inorgánicos como el cobre (Cu) y calcio (Ca), que en niveles elevados en la dieta bloquean la absorción de Zn en el

intestino (Borah *et al.*, 2014). Asimismo, un alto contenido de fósforo (P), reduce la biodisponibilidad del Zn (Gowanlock, 2012). Los quelatos orgánicos de Zn son más estables en el tracto digestivo, que los minerales inorgánicos, ya que se caracterizan por ofrecer una mejor retención y, por lo tanto, mayor biodisponibilidad (Formigoni *et al.*, 2011).

Así mismo, la biodisponibilidad también puede ser afectada por el tipo de alimentos consumidos, o por la presencia de agentes de intervención como los fitatos que se encuentran en la mayoría de los productos vegetales, incluidos los cereales y forrajes (Borah *et al.*, 2014; Ghaffari y Arabyaghuobi, 2018), y que de manera natural están unidos a la fibra soluble de algunos granos, en forma de ácido fítico, que al combinarse con el Zn forman complejos insolubles en el intestino, lo que impide su adecuada absorción y asimilación (McDowell, 2003). Se ha demostrado que las dietas porcinas pueden contener hasta 9 g·kg⁻¹ de ácido fítico (Brugger y Windisch, 2017), siendo la harina de girasol y el salvado de trigo los alimentos con mayor concentración, aportando hasta 7.9 g kg⁻¹ y 8.6 g kg⁻¹ de ácido fítico respectivamente (Martínez-Domínguez *et al.*, 2002). Por lo anterior, es que se deben considerar alternativas en la alimentación porcina para mejorar la biodisponibilidad del Zn, ya sea a través del uso de enzimas exógenas incluidas en las dietas (fitasas), las cuales pueden ser de origen vegetal o microbianas, o bien utilizando vitamina D3 hidroxilada (estimulación de la mineralización ósea) e incluso fuentes orgánicas de Zn unidas a agentes quelantes como los aminoácidos Lisina o Metionina de Zn, los cuales incrementan en gran medida la biodisponibilidad del mineral (Quiles, 2006).

El papel del Zn en las funciones reproductivas del macho porcino

Es sabido que este micro mineral contribuye en la producción y secreción de diversas hormonas (Cuadro 5), debido a su efecto a nivel del eje hipotálamo-hipófisis-gónadas; además de intervenir en el desarrollo de las células de Leydig, así como, en la producción de esteroides a nivel testicular (testosterona) (Roy *et al.*, 2013, Salazar *et al.*, 2016). De igual manera favorece la producción y viabilidad espermática, además de prevenir su degradación (Córdova-Izquierdo *et al.*, 2010; García, 2010; Al-Ani *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2016).

Rodríguez-Gaxiola *et al.* (2016), mencionan que el Zn mantiene la función adecuada de los órganos reproductores debido a que actúa como antioxidante, protegiendo al espermatozoide, al igual que a otras células contra el daño oxidativo y la oxidación de lípidos, inhibiendo la fosfolipasa y mejorando la calidad espermática.

Las células espermáticas exhiben gran capacidad para generar especies reactivas de oxígeno (ROS), tales como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂), el anión superóxido (O²⁻) y radical hidroxilo (OH); para defenderse del daño producido por las ROS, las células somáticas y espermáticas requieren de antioxidantes, entre los que se encuentran la superóxido dismutasa (SOD), sin embargo, para un buen funcionamiento

de este antioxidante se requieren moléculas de Zn (Celino *et al.*, 2011; Salazar *et al.*, 2016).

Estudios realizados para evaluar los componentes seminales han demostrado que la captación de Zn es necesaria para mantener el funcionamiento óptimo de los testículos, la próstata y el epidídimo. Se ha reportado que los niveles intracelulares de Zn en los espermatozoides epididimarios son más altos que los observados en los testículos, sin embargo, estos niveles son mucho más bajos que los reportados en los espermatozoides eyaculados (García, 2010). Hay que resaltar, que estas células alcanzan una acumulación final de Zn, debido al contacto con las secreciones prostáticas, las cuales son ricas en este mineral. Todos estos mecanismos son un requisito previo para que los espermatozoides maduros puedan llevar a cabo la capacitación, hiperactivación de motilidad y reacción acrosomal, debido a que los niveles de Zn disminuyen durante su tránsito en el tracto genital femenino. Es por ello que, la suplementación con Zn ha sido propuesta empíricamente para el tratamiento de la infertilidad masculina en humanos (Foresta *et al.*, 2014; Fallah *et al.*, 2018).

Cuadro 5. Hormonas donde interviene el Zn.

Hormona	Naturaleza	Origen	Órgano blanco	Funciones
Andrógenos (androstenediona y testosterona)	Esteroides	Células de Leydig, adrenales	Células de Sertoli, aparato reproductor, músculo esquelético, piel, hipotálamo y glándula pituitaria.	Desarrollo de órganos sexuales accesorios y caracteres sexuales secundarios, interviene en la libido, espermatogénesis y es anabólico.
Prostaglandinas (PGF2α)	Ácidos grasos no saturados	Vesículas seminales vida media 8 h	Hipotálamo y pituitaria	Liberación de LH y testosterona, mediado por la concentración de PGF2α en plasma
Glicosaminoglicanos (GAG)	Polisacáridos	Acrosoma	Membranas basales, componentes de las superficies celulares.	Interviene en la capacitación espermática
Hormona estimulante de la tiroides (TSH)	Glucoproteína	Células β de la adenohipófisis	Glándula tiroides	Aumenta la captación de yoduro en la sangre por las células tiroideas, síntesis de hormonas tiroideas, aumento del metabolismo basal.
Luteinizante (LH)	Glucoproteína	Células basófilas de la adenohipófisis Vida media: 35 minutos	Células de Leydig	Producción de testosterona por células de Leydig
Folículo Estimulante (FSH)	Glucoproteína	Células basófilas de la adenohipófisis Vida media: 2-5 horas	Testículos (células de Sertoli)	En las células de Sertoli síntesis de proteínas fijadoras de andrógenos, actúa en la espermatogénesis.
Prolactina (PRL)	Proteína	Células acidófilas de adenohipófisis	Glándula mamaria	Incrementa receptores para la LH

Adaptado de: Hernández y Fernández, 2010; King, 2015.

En el testículo, el Zn es un cofactor de la enzima 5-α-reductasa, la cual es necesaria para la conversión de la testosterona a su forma biológica activa (α-dihidrotestosterona) (Al-Ani *et al.*, 2015), además de formar parte estructural de los receptores de andrógenos, y de estimular la función prostática (Salazar *et al.*, 2016).

Se ha reportado que altas dosis de Zn en el núcleo celular conducen a la estabilización de la estructura del ADN y el ARN,

siendo esencial para la actividad de la ARN polimerasa durante la división celular (Ghaffari y Arabyaghuobi, 2018); en el caso particular de la espermatogénesis se requieren de muchas divisiones celulares, por lo que, la demanda de grandes cantidades de Zn es mayor, debido a que está involucrado en el metabolismo del ácido nucleico y de las proteínas, es por ello, que es esencial en la diferenciación y replicación celular, así como en controlar la utilización de la energía por el sistema de ATP (Wong *et al.*, 2002; Rodríguez-Gaxiola *et al.*, 2016). Además, el Zn tiene funciones antimicrobianas que actúan en el fluido prostático (Kelleher *et al.*, 2011).

Concentraciones bajas de Zn en verracos, provocan pérdida del apetito y consecuentemente, una reducción de peso, falta de libido, impotencia e hipo fertilidad, atrofia testicular debido a una reducción del peso de los testículos (hipogonadismo), próstata y plasma seminal, disminuyendo la concentración de Zn en los mismos y provocando degeneración histológica del epitelio espermático a nivel de los túbulos seminíferos y células de Leydig (Church *et al.*, 2007; Yattoo *et al.*, 2013; Ghaffari y Arabyaghuobi, 2018).

No obstante, las cantidades tan elevadas que se requieren para la función espermática y el daño ocasionado por una posible toxicidad puede ser difícil de entender. García *et al.* (2011), demostraron que al utilizar un nivel superior de 150 mg·kg⁻¹ de Zn en la dieta, se producía mayor índice de fragmentación del ADN espermático, que cuando se utilizan dosis de Zn a 100 mg·kg⁻¹ en sementales porcinos, provocando con ello una reducción significativa (P<0.05) de la capacidad de fecundación *in vitro* (García, 2010).

Niveles y fuentes de Zn para un buen desarrollo reproductivo del macho porcino

Pocos estudios indican la fuente y dosificación de Zn, y los efectos de éstas en la reproducción del macho porcino. La industria de la alimentación animal utiliza tanto fuentes orgánicas como inorgánicas, sin embargo, estas fuentes suelen comportarse biológicamente diferente, y ocasionar efectos distintos (Revy *et al.*, 2003; De Loera, 2016). En el caso de la alimentación porcina, las fuentes de Zn utilizadas son mayormente inorgánicas, aunque vale la pena resaltar que, durante la última década, las fuentes orgánicas minerales han tenido una mayor demanda.

La clasificación de las fuentes minerales se divide en dos: inorgánicas y orgánicas. En el caso de las fuentes inorgánicas (FI), se cuenta con Sulfato de Zn (ZnSO₄), Cloruro de Zn (ZnCl₂), Carbonato de Zn (ZnCO₃) y Óxido de Zn (ZnO), mientras que las fuentes orgánicas (FO) son el Metionato de Zn (Met-Zn), Glicinato de Zn (Gli-Zn), Proteinato de Zn (Prot-Zn) y levaduras enriquecidas con Zinc (NRC, 2012; NSNG, 2010; Gorrachategui, 2012; García-Contreras *et al.*, 2012; De Loera, 2016).

En algunas investigaciones realizadas en verracos jóvenes alimentados con Metionato de Zn a una concentración de 25 ppm, se observó que la morfometría testicular se vio afectada, generando una reducción en el número de células de Leydig por testículo (De Loera, 2016), mientras que, con dosis de 200 ppm de esta FO, se observa un efecto citotóxico en el ADN de los espermatozoides (García *et al.*, 2011). No obstante, se tiene escasa información aun sobre el uso de FO y sus efectos en la reproducción del verraco. En el caso de las FI como el Óxido de Zn, las investigaciones se han centrado en sus efectos farmacológicos, es decir en el tratamiento de problemas gastrointestinales, problemas inmunológicos y como promotor de crecimiento en la especie porcina, sin dar información específica sobre su repercusión en la reproducción (Davin *et al.*, 2013 Borah *et al.*, 2014; Kloubert *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2018; Lei y Kim, 2018).

Investigaciones desarrolladas en otras especies como es el caso de ovinos, se ha identificado que adicionar 70 ppm de Metionato de Zn en la dieta, incrementa el volumen y producción de espermatozoides por eyaculado, disminuye la proporción de espermatozoides con anomalías morfológicas, además de aumentar la concentración plasmática de testosterona (Rodríguez-Gaxiola *et al.*, 2016). Mientras que en conejos (Nueva Zelanda), se observó que la adición de 25 ppm de Sulfato de Zn, favorece el incremento en el volumen seminal, la concentración total de espermatozoides vivos y el porcentaje de motilidad espermática (El-Masry *et al.*, 1994). En tanto que, Parra-Forero (2014), observó que el Metionato de Zn, aumenta el volumen del plasma seminal y la motilidad espermática en el semen de equinos.

De acuerdo con la información en machos de diferentes especies, sin especificar el efecto de la fuente mineral o el nivel de inclusión, se sugiere que una deficiencia nutricional de Zn representa un factor de riesgo en la infertilidad, mientras que la adición de Zn disminuye la presentación de estrés oxidativo, fragmentación de ADN y la apoptosis celular (Talukdar *et al.*, 2016).

4. CONCLUSIONES

Considerando la trascendencia del uso de diferentes fuentes minerales en la alimentación animal y las repercusiones que pueden derivarse del uso inadecuado de los niveles de inclusión de Zn en las dietas porcinas, principalmente del verraco, resulta de gran importancia realizar investigación que coadyuve a identificar las fuentes y dosis adecuadas para cada especie, según su etapa fisiológica y la finalidad zootécnica, buscando con ello, beneficiar a los animales sin comprometer al medio ambiente, con esto generando una pauta para la regulación nacional en cuanto a la dosificación mineral en la alimentación animal.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores no consideran agradecimientos en el presente trabajo.

6. DECLARACIÓN DE INTERESES

Todos los autores declaran que no existen conflictos de intereses, incluyendo las relaciones financieras, personales o de otro tipo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Ani, N., Al-Kawaz, U., Saeed, B. 2015. Protective influence of zinc on reproductive parameter in male rat treated with cadmium. *American Journal of Medicine and Medical Sciences*. 5 (2):73-81.
- Aoki, K., Prado, M.G. 2008. Implicaciones funcionales de los microelementos en sistemas biológicos (1ra. Edición). México: Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. 9 p.
- ARC (Agricultural Research Council). 1981. The nutrient requirements of pigs. Slough, U.K, Commonwealth.
- Bonaventura, P., Benedetti, G., Albaredo, F., Miossec, P. 2015. Zinc and its role in immunity and inflammation. *Autoimmunity Reviews*. 14(4):277-285.
- Borah, S., Sarmah, B.C., Chakravarty, P., Naskar, P., Dutta, D.J., Kalita, D. 2014. Effect of zinc supplementation on serum biochemicals in grower pig. *Journal of Applied Animal Research*. 42(2): 244-248.
- Brugger, D., Windisch, W. 2017. Strategies and challenges to increase the precision in feeding zinc to monogastric livestock. *Animal Nutrition*. 3(2):103-108.
- Celino, F., Yamaguchi, S., Miura, C., Ohta, T., Tozawa, Y., Iwai, T., Miura, T. 2011. Tolerance of spermatogonia to oxidative stress is due to high levels of Zn and Cu/Zn superoxide dismutase. *PLoS One*. 6(2): e16938.
- Church, D., Pond, W., Pond, K. 2007. Fundamentos de nutrición y alimentación de animales. 2da. Edición. Editorial Limusa, México. 179-227 p.
- Clemente, R., Sáez-Tovar, J.A., Pilar, B.M. 2020. Extractability, Distribution Among Different Particle Size Fractions, and Phytotoxicity of Cu and Zn in Composts Made With the Separated Solid Fraction of Pig Slurry. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 4(2):1-8.
- Córdova-Izquierdo, A., Saltijeral, J., Ruiz, G., Xolalpa, V., Cortés, S., Peña, S., Córdova-Jiménez, C., Méndez, M., Huerta, R., Juárez, M., Guerra, J. 2010. Estrés oxidativo en gametos. *Revista Electrónica de Veterinaria*. 11(7):1-32.
- Cousins, R., Liuzzi, J., Litchen, L. 2006. Mammalian zinc transport, trafficking and signals. *Journal of Biological Chemistry*. 281(34):24085-24089.
- Cromwell, G. 2018. Nutritional Requirements of Pigs. MSD MANUAL. Disponible en: <https://www.msdsmanual.com/management-and-nutrition/nutrition-pig>
- Davin, R., Manzanilla, E., Klasing, K., Pérez, J. 2013. Effect of weaning and in-feed high doses of zinc oxide on zinc levels in different body compartments of piglets. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 97(1):6-12.
- De Loera Y.G. 2016. Efecto de la fuente y nivel de zinc en el comportamiento productivo de machos no castrados (40-110 kg) y su relación con el comportamiento sexual. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España. 14-15; 117-159 p. Disponible en: <http://eprints>.

- uclm.es/38797/
- El-Masry, K.A., Nasr, A.S., Kamal, T.H. 1994. Influences of season and dietary supplementation with selenium and vitamin E or Zinc on some blood constituents and semen quality of New Zealand white rabbit males. *World Rabbit Science*. 2:79e86.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2018. Hoja de información 12, Cría de cerdos. Disponible en: http://www.fao.org/3/V5290S/v5290s23.htm#P1_22
- Fallah, A., Mohammad-Hasani, A., Colagar, A.H. 2018. Zinc is an essential element for male fertility: A review of Zn roles in men's health, germination, sperm quality, and fertilization. *Journal of reproduction & infertility*. 19(2):69.
- FEDNA (Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal). 2013. Necesidades nutricionales para ganado porcino: Normas FEDNA. Madrid, España. 114 p.
- Foresta, C., Garolla, A., Cosci, I., Menegazzo, M., Ferigo, M., Gandin, V., De Toni, L. 2014. Role of zinc trafficking in male fertility: from germ to sperm. *Human reproduction*. 29(6):1134-1145.
- Formigoni, A., Fustini, M., Archetti, L., Emanuele, S., Sniffen, C., Biagi, G. 2011. Effects of an organic source of copper, manganese and zinc on dairy cattle productive performance, health status and fertility. *Animal feed science and technology*. 164(3-4):191-198.
- García-Contreras, A.C., De Loera-Ortega, Y.G., Yagüe, A.P., Guevara-González, J.A., García Artiga, C. 2012. Alimentación práctica del cerdo. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*. 6(1):21-50.
- García, A. 2010. Efecto de la fuente de zinc en la morfometría testicular y epididimaria, así como su relación con la producción y calidad seminal del verraco. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 1-175 p. Disponible en: <https://eprints.uclm.es/12309/>
- García-Contreras, A., De Loera, Y., Palomo, A., Guevara, G. A., Herrera, H.J., López, F.C., Steve, J., Gosálvez, J. 2011. Elevated dietary intake of Zn-methionate is associated with increased sperm DNA fragmentation in the boar. *Reproductive Toxicology*. 31(4):570-573.
- GFE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie), Ausschuß für Bedarfsnormen. 1987. Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Schweine. DLG-Verlag, Frankfurt (Main). 247 p.
- Ghaffari, M., Arabyaghoubi, M. 2018. Zinc as an essential nutritional component of human body: a systemic review. *International Journal of Pharmaceutical & Biological Archives*. 9 (2):62-65.
- Gorrachategui, M. 2012. Quelatos como fuente de aporte de oligoelementos en nutrición animal. XXVIII. Curso de especialización de la Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (FEDNA). Disponible en: <http://fundacionfedna.org/sites/default/files/FEDNA%202012%20-%20Quelatos.pdf>
- Gowanlock, D. 2012. Effect of reducing micromineral supplementation to grower-finisher pigs on growth performance, hematological status, carcass traits and pork quality. Thesis. The Ohio State University. Disponible en: https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws_olink/r/1501/10?clear=10&p10_accession_num=osu1345493232
- Heo, J., Opapeju, F., Pluske, J., Kim, J., Hampson, D., Nyachoti, C. 2013. Gastrointestinal health and function in weaned pigs: a review of feeding strategies to control post-weaning diarrhoea without using in-feed antimicrobial compounds. *Journal Animal Physiology Animal Nutrition*. 97(2):207-237.
- Hernández, J. E., Fernández, F. 2010. Reproducción de las siete especies domésticas. Cuadernos CBS 38. Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco. 33-39 p.
- INRA (Institut National de la Recherche Agronomique). 1984. L'alimentation des animaux monogastriques: pore, lapin, volailles. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, France.
- Jongbloed, A.W., Lenis, N.P., Mroz, Z. 1997. Impact of nutrition on reduction of environmental pollution by pigs: an overview of recent research. *Veterinary quarterly*. 19(3): 130-134.
- Juárez-Rebollar, D., Méndez-Armenta, M. 2014. Aspectos funcionales de la metalotioneína en el sistema nervioso central. *Archivos de Neurociencia*. 19(1):34-41.
- Kelleher, S., McCormick, N., Velásquez, V., López, V. 2011. Zinc in specialized secretory tissues: Roles in the pancreas, prostate, and mammary gland. *Advances in Nutrition*. 2:101-111.
- King, M.W. 2015. Glicosaminglicanos. The medical biochemistry. Disponible en: <https://themedicalbiochemistrypage.org/es/glycans-sp.php>
- Kloubert, V., Blaabjerg, K., Dalgaard, T., Poulsen, H., Rink, L., Wessels, I. 2018. Influence of zinc supplementation on immune parameters in weaned pigs. *Journal of Trace Elements in Medicine*. 49:231-240.
- Lei, K., Kim, I. 2018. Low dose of coated zinc oxide is as effective as pharmacological zinc oxide in promoting growth performance, reducing fecal scores, and improving nutrient digestibility and intestinal morphology in weaned pigs. *Animal Feed Science and Technology*. 245:117-125.
- Litchen, L., Cousins, R. 2009. Mammalian zinc transporters: nutritional and physiologic regulation. *Annual Review of Nutrition*. 29(1):153-176.
- Liu, Y., Espinosa, C., Abelilla, J., Casas, G., Lagos, L., Lee, S., Kwon, W., Mathai, J., Navarro, D., Jaworski, N., Stein, H. 2018. Non-antibiotic feed additives in diets for pigs: A review. *Animal Nutrition*. 4(2):113-125.
- López, M., Zárate, J., Rosales, B., Flores, A., García, A., De Loera, Y., Guevara, J. 2015. Efecto de distintos niveles de Zn en el desarrollo intrauterino de cerdas prepúberes. En: *Memorias XLIX Congreso Nacional AMVEC 2015*. León, Gto. Disponible en: <https://www.amvec.com/blog/amvec-1/post/memorias-amvec-14>
- Martínez-Domínguez, B., Ibáñez-Gómez, M. V., Rincón-León, F. 2002. Ácido fítico: aspectos nutricionales e implicaciones analíticas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 52(3): 219-231.

- Martínez, E., Maresma, A., Biau, A. Biau, Berenguer p., Cela S., Santiveri F., Michelena A., Lloveras J. 2020. Long-term effects of liquid swine manure on soil organic carbon and Cu/Zn levels in soil and maize. *Nutr Cycl Agroecosyst.* 118:93-205.
- Matte, J.J., Girard, C.L., Guay, F. 2017. Intestinal fate of dietary zinc and copper: Postprandial net fluxes of these trace elements in portal vein of pigs. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 44: 65-70.
- McDonald, P., Edwards, R., Greenhalgh, J., Morgan, C., Sinclair, L., Wilkinson, R. 2013. *Nutrición Animal*. 7ª. Edición. Editorial Acribia. España. 97-128 p.
- McDowell, R. 2003. *Los minerales en nutrición animal y humana*. 2ª. Edición. Editorial Elsevier. New York, EUA. 357-395 p.
- Moretti, S.M., Bertoncini, E.I., Abreu-Junior, H. 2020. Characterization of raw swine waste and effluents treated anaerobically: parameters for Brazilian environmental regulation construction aiming agricultural use. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 1-12.
- NRC. (National Research Council). 2012. *Nutrient Requirements of Swine*. 11a. edición. Washington: National Academy Press. 420 p.
- NSNG (National Swine Nutrition Guide). 2010. *Tables on nutrient recommendations, ingredient composition, and use rates: Pork center of excellence*. Iowa State University. USA. 36 p.
- Parra, F.Y. 2014. Efecto del nivel y fuente de zn en la producción y calidad espermática del caballo (*Equus caballus*). Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana. 1-157 p.
- Parra, Y., Romo, S., Góngora, A., García, A., Guevara, J. 2015. Efecto metabólico de la suplementación con sulfato de zinc en el cultivo de ovocitos de cerda, como modelo animal para su aplicación en células humanas. En: *Memorias XLIX Congreso Nacional AMVEC 2015*. León, Gto. Disponible en: <https://www.amvec.com/blog/amvec-1/post/memorias-amvec-14>
- Prasad, A. 2012. Discovery of human zinc deficiency: 50 years later. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 26(2-3):66-69.
- Prasad, A. 2014. Zinc: An antioxidant and anti-inflammatory agent: Role of zinc in degenerative disorders of aging. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 28(4):364-371.
- Quiles, A. 2006. Efecto del Zinc en la alimentación porcina. *Nutrición*. 1:42-49.
- Revy, P., Jondreville, C., Dourmad, J., Nys, Y. 2003. Le zinc dans l'alimentation du porc: oligoélément essentiel et risque potentiel pour l'environnement. *INRA Prod. Anim.* 16(1):3-18.
- Rodríguez-Gaxiola, M., Romo-Valdez, J., Ortiz-López, B., Barajas-Cruz, R., Gaxiola-Camacho, S., Romo-Rubio, J. 2016. Respuesta al consumo adicional de zinc orgánico en la calidad seminal de ovinos de pelo. *Abanico veterinario*. 6(3):24-34.
- Romo-Valdez, J., Barajas-Cruz, R., Silva-Hidalgo, G., Enríquez-Verdugo, I., Güémez-Gaxiola, H., Romo-Rubio, J. 2018. Método de suplementación de zinc orgánico y respuesta productiva de cerdos en etapa de iniciación en clima cálido. *Abanico veterinario*. 8(2):68-80.
- Roy, B., Baghel, R., Mohanty, T., Mondal, G. 2013. Zinc and Male Reproduction in Domestic Animals: A review. *Indian Journal of Animal Nutrition*. 30(4):339-350.
- Sabroso, G.M., Pastor, E.Z. 2004. *Guía sobre suelos contaminados*. Confederación de la Pequeña y Mediana Empresa Aragonesa. España. 1-109 p.
- Salazar, L., Carrillo-González, D., Hernández, D. 2016. Efecto de la suplementación con zinc y selenio sobre la calidad seminal de los cerdos. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*. 8:400-410.
- Talukdar, D.J., Talukdar, P., Ahmed, K. 2016. Minerals and its impact on fertility of livestock: A review. *Agricultural Reviews*. 37(4): 333-337.
- TBAyC (Tablas Brasileñas para Aves y Cerdos). 2017. *Composición de Alimentos y Requerimientos Nutricionales*. Universidad Federal de Viçosa. Brasil. 488 p.
- Torres Acosta, R., Bahr Valcarcel, P. 2004. El zinc: la chispa de la vida. *Revista cubana de pediatría*. 76(4): 0-0.
- Wong, W., Merkus, H., Thomas, C., Menkveld, R., Zielhuis, G., Steegers-Theunissen, R. 2002. Effect of folic acid and zinc sulphate on male factor sub fertility, a double blind, randomized placed controlled trial. *Fertility and Sterility*. 77(3):491-498.
- Yatoo, M., Saxena, A., Deepa, P. Habeab, B. Devi, S., Jatav, R., Dimri, U. 2013. Role of trace elements in animal: a review. *Veterinary World*. 6:963-967.
- Zetzsche, A., Schunter, N., Zentek, J., Pieper, R. 2016. Accumulation of copper in the kidney of pigs fed high dietary zinc is due to metabolism. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 35:1-6.
- Zhao, J., Dong, X., Hu, X., Long, Z., Wang, L., Liu, Q., Sun, B., Wang, Q., Wu, Q., Li, L. 2016. Zinc levels in seminal plasma and their correlation with male infertility: A systematic review and meta-analysis. *Scientific reports*. 6:22386.