

GLICEROL UNA ALTERNATIVA PARA LA ALIMENTACIÓN DE RUMIANTES

GLYCEROL, AN ALTERNATIVE FOR RUMINANT DIETS

Hidalgo-Hernández, U.¹, Ortega-Cerrilla, M.E.^{1*}, Herrera-Haro, J.G.¹, Ramírez-Mella, M.², Zetina-Córdoba, P.³

¹Programa de Ganadería, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. C.P 56230. ²CONACyT-Colegio de Postgraduados. Campus Campeche. Carretera Haultunchén-Edzná km 17.5, Sihochac, Champotón, Campeche. C. P. 24450.

³Unidad académica de Biotecnología y Agroindustrial, Universidad Politécnica de Huatusco. Col. Centro, Huatusco, Veracruz. C.P 94100.

*Autor de correspondencia: meoc@colpos.mx

RESUMEN

La búsqueda de alternativas en la nutrición animal ha generado el interés de utilizar subproductos agrícolas e industriales, tales como el glicerol, subproducto de la producción de biodiesel. El glicerol puede ser usado en la alimentación de rumiantes por su alto contenido de energía, lo que permite sustituirlo por granos en la ración. En este trabajo se revisan diferentes investigaciones en las que se ha proporcionado glicerol en la dieta de ovinos y bovinos, y los resultados obtenidos.

Palabras clave: Biodiesel, ovinos, bovinos.

ABSTRACT

The search for alternatives in animal nutrition has generated interest in using agricultural and industrial byproducts, such as glycerol, byproduct of biodiesel production. Glycerol can be used in ruminant diets due to its high energy content, which allows it to substitute grains in the ration. In this study we revise different pieces of research where glycerol has been supplied in the diet of ovine and bovine livestock, and the results obtained.

Keywords: Biodiesel, ovines, bovines.

Agroproductividad: Vol. 11, Núm. 5, mayo. 2018, pp: 124-129.

Recibido: abril, 2018. **Aceptado:** mayo, 2018.



INTRODUCCIÓN

La búsqueda de alternativas que sustituyan al petróleo ha generado un incremento en la industria de la producción de biodiesel durante los últimos años, evitando de esta manera impactos perjudiciales en el ambiente. El biodiesel es el resultado de la transesterificación de ácidos grasos (vegetales y animales) con un alcohol (metanol, etanol), obteniendo como subproducto de su producción al glicerol (Yang *et al.*, 2012). El glicerol crudo o glicerina, contiene propiedades físicas y químicas que varían de acuerdo a su grado de pureza (Ayoub *et al.*, 2012). Este puede ser usado para alimentación animal, debido a su aporte energético (2,20 Mcal kg⁻¹ MS), principalmente en dietas para rumiantes. El glicerol es un compuesto gluconeogénico, que se fermenta en una alta proporción en el rumen y produce propionato (Roger *et al.*, 1992; Bergner *et al.*, 1995; Kijora *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2011). Aunque el glicerol fue reconocido en el 2006 como seguro por la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA), para su uso en concentrados destinados para la alimentación animal existe una limitante para su uso, el contenido de metanol, ya que concentraciones mayores al 0.5% pueden hacer que este sea tóxico para los rumiantes (Drackley, 2008). La presente revisión tiene como objetivo mostrar algunos de los resultados obtenidos al utilizar glicerol en dietas para rumiantes.

Producción de biodiesel

La utilización de aceites vegetales como combustibles está documentada desde los años 1896 y 1908 cuando Henry Ford construyó el "Quadricycle" y el "Model T", ambos automóviles funcionaban con etanol, aceite de cacahuate (*Arachis hypogaea* L.) y de soya (*Glycine max* L.) (Álvarez-Maciel, 2009; Fuel-Testers, 2009). Rudolph Diesel en 1900 exhibió en París un motor que funcionó con aceite de cacahuate (Radish, 2004; Agarwal, 2007). Sin embargo, fue hasta 1973 que el biodiesel se desarrolló de forma significativa, a raíz de la primera crisis petrolera la cual afectó países como Brasil, Estados Unidos, Nicaragua y otros que dependen de la importación de este combustible (Foidl *et al.*, 1996; Álvarez-Maciel, 2009). En 1982 en Austria y Alemania se realizaron las primeras pruebas técnicas con combustible vegetal y en 1985, en Silberberg (Austria), se construyó la primera planta piloto productora de biodiesel a partir de semillas de canola. Dentro de los países pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiesel en automóviles, se encuentran Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos,

Francia, Italia, Malasia y Suecia (Korbitz, 1999). México es considerado dentro de los 10 países con mayor producción y exportación de petróleo en el mundo; sin embargo, en los últimos años ha presentado un declive en la producción del crudo, por lo que se deben buscar fuentes alternativas de energía. En México, en el 2008 entró en vigor la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, la cual es la base para la producción y comercialización de los mismos, fomentando la investigación, desarrollo e innovación tecnológica y la integración de los sectores públicos, privados y sociales (SENER, 2009). En este sentido la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) desde el 2013 ha impulsado la producción de biocombustibles como una alternativa sustentable mediante cultivos específicos (*Elaeis guineensis* Jacq., *Jatropha curcas*, *Ricinus communis* L. y *Saccharum* spp.), en beneficio del sector energético y de los productores del país, con la inversión para el establecimiento y/o mantenimiento de 7,939 ha de cultivo, además de la apertura de siete plantas de biocombustibles, generando una producción de 42.2 millones de litros anuales (SAGARPA, 2017). El término "biodiesel" se utiliza para describir el combustible compuesto por ésteres alquílicos, resultado de la transesterificación de ácidos grasos de fuentes vegetales y animales con un alcohol (Thompson y He, 2006; Donkin y Doane, 2007; Zuleta *et al.*, 2007). Como se mencionó anteriormente, el método más común para la obtención del biodiesel, es la transesterificación de triglicéridos, utilizando un alcohol (metanol, etanol, propanol o butanol) en presencia de un catalizador como hidróxido de sodio o potasio, carbonatos o alcóxidos, el cual presenta propiedades físicas muy parecidas al petróleo (Zuleta *et al.*, 2007; Salamatina *et al.*, 2010). Como subproducto de la producción de biodiesel se genera glicerol, el que se separa por centrifugación o gravedad. La producción de biodiesel utiliza una proporción molar 6:1 de alcohol y aceite, el cual es removido durante la fase de producción de este biocombustible por evaporación, para ser reutilizado posteriormente, constituyendo la producción de glicerol o glicerina cruda aproximadamente el 10% del total de la producción de biodiesel (Dasari *et al.*, 2005; Karinen y Krause, 2006; Melero *et al.*, 2012).

Se considera que aproximadamente se producen 0.92 kg de glicerol crudo por cada 10 L de biodiesel producido. En el Cuadro 1 se muestran algunas propiedades físico-químicas del glicerol (Lide, 2006).

Cuadro 1. Propiedades físicoquímicas del glicerol a 20 °C.

Sinónimos	Glicerina 1,2,3-Propanotriol 1,2,3-Trihidroxipropano		
PROPIEDADES			
Aspecto	Líquido viscoso, higroscópico, incoloro e inodoro.		
Formula química	C ₃ H ₈ O ₃	Calorías	4,32 kcal g ⁻¹
Masa molecular	92,1 g mol ⁻¹	Punto de ebullición	290 °C
Densidad relativa (agua=1):	1,26	Punto de fusión	18 °C

Adaptado de Lide, 2006.

El glicerol resultante de la fabricación del biodiesel (glicerina bruta vegetal) contiene alrededor de 20% de impurezas (Mota *et al.*, 2009). Las principales impurezas presentes son catalizador, alcohol, ácidos grasos, sales y agua. El tipo de impurezas depende del tipo de oleaginosas y de la catálisis empleada en la producción de biodiesel. Por lo tanto, el glicerol bruto tiene pocas aplicaciones directas. La purificación del glicerol bruto se puede realizar mediante destilación a presión reducida, obteniendo un producto transparente. Una solución económica para la purificación del subproducto combina electrodiálisis (membranas) y nano filtros, con lo que se obtiene un líquido transparente con bajo contenido de sales. El glicerol parcialmente purificado, a su vez, puede ser purificado cada vez más a través de resinas de intercambio iónico para obtener glicerol con más del 99.5% de pureza (Pagliaro *et al.*, 2008). El glicerol se ha empleado como ingrediente en alimentos para consumo humano, en la industria farmacéutica, se ha sido utilizado industrialmente para la producción de polímeros sintéticos, cosméticos y productos de cuidado personal. Se puede modificar para producir mono y diglicéridos, que son importantes agentes emulsionantes. En bebidas como agente espesante y usado en la alimentación humana con propiedades humectantes (SDA, 1990). También es posible utilizarlo en alimentos para animales, ya que mejora el texturizado y las características físicas de alimentos en polvo, además de poder agregarlo como parte de la ración (Zuleta *et al.*, 2007; Ayoub *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012).

Metabolismo del glicerol en rumiantes

Cuando se suministra glicerol este llega al rumen donde tiene tres posibles destinos, fermentación o absorción en el rumen, o continuar por el tubo digestivo sin ser atacado por los microorganismos ruminales (Krehbiel, 2008). Al ser fermentado en el rumen se producen principalmente ácidos grasos volátiles. Las bacterias lipolíticas, así como *Selenomonas ruminantium* y *Selonomonas*

dextrinosolvens son los grupos de mayor participación en la fermentación del glicerol, produciendo además metabolitos diferentes a los tres principales ácidos grasos volátiles (acético, propiónico y butírico), tales como, succínico, láctico, CO₂ y CH₄ (Hobson y Mann 1961; Czerkawski y Breckenridge, 1972; Trabue *et al.*, 2007; Krehbiel, 2008; Abo *et al.*, 2010).

En las primeras investigaciones sobre la fermentación del glicerol por los microorganismos ruminales, se reportó que éste es fermentado a ácido propiónico, principalmente (Wright, 1969). Bergner *et al.* (1995) al utilizar glicerol marcado con carbono 14 reportaron que la mayor parte del glicerol fue convertido a propionato. De Frain *et al.* (2004), encontraron un aumento en la concentración de propionato, cuando se suplementaron 430 y 860 g día⁻¹ de glicerol en vacas lecheras, resultados similares a los observados por Wang *et al.* (2009), quienes suplementaron novillos con 100, 200 y 300 g d⁻¹ de glicerol y encontraron un incremento en la proporción molar de propionato en el rumen, comparado con la dieta testigo sin glicerol. Lee *et al.* (2011) proporcionaron 200 g de glicerol a novillos canulados en el rumen alimentados con una dieta a base de alfalfa y ensilaje de maíz con 20% de glicerol, posteriormente utilizaron el contenido ruminal de estos animales para realizar cultivos *in vitro*, encontrando una disminución en la relación acetato:propionato, debido a una mayor producción de propionato con disminución en la producción de acetato.

En los rumiantes el glicerol tiene como destino metabólico la gluconeogénesis. Cuando existe un exceso de glicerol, este puede ser absorbido tanto por la mucosa ruminal como por la intestinal, siendo una fuente gluconeogénica directa para el rumiante. Esto también sucede con el glicerol endógeno (por lipólisis de las grasas de reserva), el cual ingresa al proceso de gluconeogénesis, previa transformación en glicerol trifosfato catalizada por la enzima gliceroquinasa, convirtiéndose en glicerol. El glicerol también puede contribuir a la fermentación microbiana, el que es utilizado como fuente de energía, siendo el propionato el principal producto de su fermentación (Garton *et al.*, 1961; Bergner *et al.*, 1995; Kijora *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2009a; Lee *et al.*, 2011). Hasta ahora, las investigaciones han reportado que el glicerol, una vez que entra al rumen sufre una rápida fermentación; sin embargo, ha sido difícil establecer una relación entre

el glicerol fermentado en rumen, y el que se absorbe directamente (Bergner et al., 1995; Drackley, 2008).

Uso del glicerol en la alimentación de rumiantes

En 2006 el glicerol fue reconocido como seguro por la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA), para su uso en concentrados destinados a la alimentación animal. El glicerol se ha empleado para alimentación animal (Karinen y Krause, 2006; Duane et al., 2007; Posada y Cardona, 2010; Ayoub et al., 2012), y se ha incluido para mejorar las características de calidad y durabilidad de los alimentos peletizados, en diferentes condiciones de almacenamiento (Südekum et al., 2008). En rumiantes modifica la relación acetato:propionato aumentando este último (Drouillard, 2008). Por lo que el glicerol puede sustituir parcialmente los ingredientes a base de almidón en la dieta, ya que se convierte en propionato en el rumen y actúa como precursor de la síntesis de glucosa hepática. Como consecuencia se tiene un incremento en el marmoleado y calidad de la carne, debido a que la glucosa se usa como fuente de carbono para la síntesis de ácidos grasos (Schoonmaker et al., 2004). Debido a esto, el glicerol puede utilizarse como fuente de energía en dietas para rumiantes, ya que tiene un valor energético promedio de $2.20 \text{ Mcal kg}^{-1} \text{ MS}$. Sin embargo, el potencial nutricional del glicerol, depende de factores como el tipo de dieta base a la que se incorpore, el nivel de inclusión en las misma y el grado de pureza que contenga el glicerol (mayor pureza: baja concentración de metanol y sales). A mayor pureza, mayor será el aporte energético, siendo similar al maíz (2.7 Mcal kg^{-1}) (Drackley, 2008).

La contribución de minerales por parte del glicerol se debe considerar al formular dietas para rumiantes. Investigaciones realizadas por Thompson y He (2006), en las cuales se caracterizaron glicerinas provenientes de aceites de canola (granos de colza: *Brassica napus* L.), soya (*Glycine max* L.), entre otros, mostraron que el glicerol crudo puede contener en promedio hasta 2.73% de minerales, o principalmente sodio y potasio. Resultados similares se encontraron en las investigaciones realizadas por Asad et al. (2008) los cuales reportaron un contenido de minerales de 2-3% (principalmente sodio y potasio), en la glicerina cruda proveniente del aceite de girasol (*Helianthus annuus* L.). Con relación al contenido de ácidos grasos en la glicerina cruda, Thompson y He (2006) y Kerr et al. (2007) reportan que existe una gran variabilidad, dependiendo del tipo de fuente vegetal de la cual proviene y del grado de pureza de la misma,

encontrándose valores que van desde 0.29 hasta 7.17% para el glicerol proveniente del aceite de soya y de 8.88 a 11.68% para el glicerol procedente del aceite de colza y canola (tratados comercialmente de forma indistinta a su origen vegetal), respectivamente. Así mismo, las investigaciones realizadas por Yong et al. (2001), reportaron un promedio de 6.6% de ácidos grasos, contenidos en el aceite de palma de 2.7-10.7%.

Glicerol en la alimentación de bovinos

Ferraro et al. (2009), mencionan que el glicerol se ha utilizado como fuente de energía para prevenir la cetosis en ganado lechero y como suplemento en la alimentación en ganado de carne, leche y doble propósito (Roger 1992, Parsons et al., 2009). Ogborn (2006) evaluó el uso de glicerol con 80% de pureza, en vacas Holstein, proporcionándolo en un 3.3% de la materia seca de la dieta (504 g d^{-1}), la que contenía ensilaje de maíz (*Zea mays* L.) con alfalfa (*Medicago sativa* L.) más concentrado de maíz. Los resultados indicaron que el glicerol disminuyó el consumo de materia seca; sin embargo, no se mostraron diferencias significativas en la producción o composición de la leche. Elam et al. (2008) observaron una reducción lineal en el consumo de materia seca en vaquillas alimentadas con 0, 7.5 y 15% de glicerol crudo y la eficiencia de conversión se mantuvo sin cambios. Además, observaron que a medida que se incrementaban los niveles de glicerol crudo, se presentó una menor deposición de grasa intramuscular en el músculo *Longissimus dorsi*. En novillos Nelore de $565 \pm 45 \text{ kg}^{-1}$ de peso vivo, estabulados consumiendo ensilaje de sorgo (*Sorghum* sp.), grano de maíz, harina de soya y diferentes inclusiones de glicerol (0 a 12%), se obtuvieron ganancias diarias de peso de 1.2 kg d^{-1} , encontrando que la inclusión del 12% de glicerol no influyó en el consumo de materia seca, digestibilidad de nutrientes y síntesis de proteína microbiana, por lo que el glicerol con bajos niveles de metanol (<1.0%) puede remplazar hasta en un 12% al maíz (Castañeda et al., 2014). Existen reportes que indican que el pH ruminal disminuye cuando se incorpora glicerol a la dieta de vacas lecheras, sin que se tengan diferencias en la concentración de nitrógeno amoniacal (N-NH_3) (De Frain et al., 2004), pudiendo reducirse la digestibilidad de la fibra al disminuir el pH (Calsamiglia y Ferret, 2002).

Glicerol en la alimentación de ovinos

En trabajos realizados con ovinos, se han reportado cambios en el consumo de alimento cuando se adiciona glicerol crudo. Lage et al. (2010) encontraron

diferencias ($P < 0.05$) en algunas variables productivas al sustituir maíz por glicerol en la dieta (0, 3, 6, 9 y 12%) de ovinos en engorda y determinaron que la diferencia en el consumo de materia seca fue consecuencia del elevado contenido de metanol (6%) en el glicerol, lo que indica que el glicerol bruto con altos niveles de metanol puede provocar rechazo del alimento y en consecuencia reducir el consumo de materia seca. A diferencia de lo reportado por Gunn *et al.* (2010) quienes agregaron glicerol en diferentes niveles en la ración de ovinos (0, 15, 30 y 45%), sin encontrar diferencias significativas en las variables productivas. En relación al efecto del glicerol en la digestibilidad del alimento, Wang *et al.* (2009b) señalan que la administración de glicerol tiene relación directa con la tasa de digestión de la materia seca y fibra neutro detergente, al contrario de lo que mencionan Shin *et al.* (2012), quienes indican que la digestibilidad de la materia seca no se ve afectada; sin embargo, la de la fibra disminuye.

CONCLUSIONES

Los resultados encontrados en la literatura son variables, lo que puede deberse al tipo de dieta al que se incorpore el glicerol, si está compuesta principalmente por granos o forrajes, el nivel de inclusión de glicerol en la dieta y al grado de pureza del glicerol que se utilice. Por lo cual es necesario realizar más investigaciones, para que este subproducto sea utilizado en forma óptima por los rumiantes y sea redituable económicamente para el productor.

LITERATURA CITADA

- Abo El-Nor S., AbuGhazaleh A. A., Potu R. B., Hastings D., Khatta M. S. A. 2010. Effects of differing levels of glycerol on rumen fermentation and bacteria. *Anim. Feed Sci. Technol.* 162: 99-105
- Agarwal A.K. 2007. Biofuels (alcohols and biodiesel) Applications as fuels for internal combustion engines. *Progress Energy Combustion Sci.* 33(3):233-271.
- Álvarez-Maciel C. 2009. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa.* Núm. 359, julio-agosto 2009, pp. 63-89. Disponible en: <http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/359/04carlosalvarez.pdf>.
- Asad U R., Saman W. R. G., Nomura N., Sato S., Matsumura M. 2008. Pretreatment and utilization of raw glycerol from sunflower oil biodiesel for growth and 1, 3-propanediol production by *Clostridium butyricum*. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 83:1072-1080
- Ayoub M., Abdullah A. Z. 2012. Critical review on the current scenario and significance of crude glycerol resulting from biodiesel industry towards more sustainable renewable energy industry. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 16: 2671-2686.
- Bergner H., Kijora, C., Ceresnakova, Z. Szakacs, J., 1995. *In vitro* unter suchungen zum glycerin um satz durch pansen mikroorganismen. *Arch. Anim. Nutr.* 48:245-256.
- Calsamiglia S., Ferret A. 2002. Fisiología ruminal relacionada con la patología digestiva: acidosis y meteorismo. XVIII Curso de especialización FEDNA. pp. 97-115. Disponible en: http://www.produccion-animal.com.ar/sanidad_intoxicaciones_metabolicos/metabolicas/metabolicas_bovinos/27-acidosis_meteorismo.pdf.
- Castañeda S. R., Antonio F. B., Teixeira S., Osmari M. 2014. Evaluación de la inclusión de glicerina cruda en la dieta de ganado de carne: la digestibilidad de nutrientes aparente y la síntesis de proteína microbiana. *Zootecnia Trop.* 32:(2):109-117.
- Czerkawski J.W., Breckenridge G. 1972. Fermentation of various glycolytic intermediates and other compounds by rumen micro-organisms, with particular reference to methane production. *Br. J. Nutr.* 27:131-146.
- Dasari M.A., Kiatsimkul P.P., Sutterlin W.R., Suppes G.J. 2005. Low-pressure hydrogenolysis of glycerol to propylene glycol. *Appl. Catal. Gen.* 281:225-231.
- De Frain J.M., Hippen A.R., Kalscheur K.F., Jardon P.W. 2004. Feeding glycerol to transition dairy cows: effect on blood metabolites and lactation performance. *J. Dairy Sci.* 87: 4195-4206.
- Donkin S.S., Doane P. 2007. Glycerol as a feed ingredient in dairy rations. Tri State Dairy Nutrition Conference. Fort Wayne, IN. The Ohio State University, Columbus. p. 97-104.
- Drackley K. 2008. Opportunities for glycerol use in dairy diets. From: Four-State Dairy Nutrition and Management Conference. Dubuque, Iowa. p. 113- 118.
- Drouillard J.S. 2008. Glycerin as a feed for ruminants: using glycerin in high concentrate diets. *J. Anim. Sci.* 86 (E (Suppl. 2):392.
- Duane T., Johnson D.T., Taconi K.A. 2007. The glycerin glut: options for the value-added conversion of crude glycerol resulting from biodiesel production. *Environ. Progress.* 2(4):338-348.
- Elam N.A., Eng K.S., Bechtel B., Harris J.M., Crocker, R. 2008. Glycerol from biodiesel production: considerations for feedlot diets. Proceedings of the Southwest Nutrition Conference. 21 February 2008. Tempe, AZ, USA. p. 2-6.
- FDA. Food And Drug Administration. 2006. Code of Federal Regulations. Food and drug administration department of health and human services - sudchapter e- animal drugs, feeds and related products. 21:582-1320.
- Ferraro S.M., Mendoza G. D., Miranda L. A., Gutiérrez C. G. 2009. *In vitro* gas production and ruminal fermentation of glycerol, propylene glycol and molasses. *Anim. Feed Sci. Technol.* 154:112-118.
- Foidl N., Foidl, G., Sánchez, M., Mittelbach, M., Hackel, S. 1996. *Jatropha curcas* L. as a Source for the Production of Biofuel in Nicaragua. *Bioresource Technology.* 58:77-82.
- Fuel-Testers 2009. Ethanol Fuel History. Disponible en: http://www.fueltesters.com/ethanol_fuel_history.html.
- Garton G.A., Lough A. K., Vioque E. 1961. Glyceride hydrolysis and glycerol fermentation by sheep rumen contents. *J. Gen. Microbiol.* 25:215-225.
- Gunn P.J., Schultz A. F., Van Emon M. L., Neary M. K., Lemenager R. P., Rusk C. P., Lake S. L. 2010. Effects of elevated crude glycerin concentrations on feedlot performance, carcass characteristics, and serum metabolite and hormone concentrations in finishing ewe and wether lambs. *PAS* 26: 298 – 306.
- Hobson P N., Mann S.O. 1961. The isolation of glycerol fermenting and lipolytic bacteria from the rumen of sheep. *J Gen. Microb.* 25: 227-240.

- Karinen R.S., Krause A.O.I. 2006. New biocomponents from glycerol. *Appl. Catalysis* 306:128-133.
- Kerr B.J., Dozier W.A., Bregendahl K. 2007. Nutritional value of crude glycerine for nonruminants. *In: Proc. 23rd Carolina Swine Nutrition Conference*, Raleigh, NC: p.6-18
- Kijora C., Bergner H., Gotz K. P., Bartelt J., Szakacs J., Sommer A. 1998. Research note: investigation on the metabolism of glycerol in the rumen of bulls. *Arch. Tierernahr* 51:341-348.
- Korbitz W. 1999. Biodiesel production in Europe and North America, an encouraging prospect. *Renewable Energy*. 16(1-4):1078-83.
- Krehbiel C.R. 2008. Ruminant and physiological metabolism of glycerin. *J. Anim. Sci.* 86(E-Suppl 2):392 (Abstr.)
- Lage J. F., Paulino P.V.R., Pereira L.G.R., Valadares Filh S. C., Oliveira A. S., Detmann E., Souza N. K. P., Lima J. C. M. 2010. Glicerina bruta na dieta de cordeiros terminados em confinamento. *Pesquisa Agrop. Bras.* 45:(9)1012-1020.
- Lebzien P., K. Aulrich. 1993. Zum Einfluss von Glycerin auf die Rohrnährstoffverdaulichkeit und einige Pansenparameter bei Milchkühen. *VDLUFA-Schriftenreihe* 37:361-364.
- Lee S. Y., Lee S. M., Cho Y. B., Kam D. K., Lee S. C., Kim C. H., Seo S. 2011. Glycerol as a feed supplement for ruminants: *In vitro* fermentation characteristics and methane production. *Anim. Feed Sci. Technol.* 166-167:269-274.
- Lide D.R. 2006. *Handbook of Chemistry and Physics*. 87th ed. Taylor and Francis Group: Boca Raton.
- Melero J.A., Vicente G., Paniagua M., Morales G., Muñoz P. 2012. Etherification of biodiesel-derived glycerol with ethanol for fuel formulation over sulfonic modified catalysts. *Bioresour. Technol.* 103:142-151.
- Mota C.J.A., da Silva C.X.A., Goncalves V.L.C. 2009. Gliceroquímica: novos produtos e processos a partir de glicerina de produção de biodiesel. *Química Nova* 32(3):639-648.
- Ogborn K.L. 2006. Effects of method of delivery of glycerol on performance and metabolism of dairy cows during the transition period. Thesis Degree of Master of Science. New York City, USA. Cornell University.
- Pagliaro M., Rossi M. 2008. *The Future of Glycerol - New Usages for a Versatile Raw Material*, RSC Publishing: Cambridge.
- Parsons G.L., Shelor M.K., Drouillard J.S. 2009. Performance and Carcass Traits of Finishing Heifers Fed Crude Glycerin. *J. Anim. Sci.* 87:653-57.
- Posada J.A., Cardona C.A. 2010. Análisis de la refinación de glicerina obtenida como coproducto en la producción de biodiesel. *Ing. Univ. Bogotá (Colombia)* 14 (1) 9-27.
- Radish A. 2004. Biodiesel performance, costs and use. Energy Information Administration. Disponible en: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/analysispaper/biodiesel>.
- Roger V., Fonty G., André C., Gouet P. 1992. Effects of glycerol on the growth, adhesion, and cellulolytic activity of rumen cellulolytic bacteria and anaerobic fungi. *Current Microb.* 25:197-201.
- SAGARPA. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2017. Impulsa SAGARPA producción de Biocombustibles en México. Disponible en http://sagarpa.gob.mx/Delegaciones/distritofederal/boletines/Paginas/JAC_0057_11.aspx.
- Salamatinia B., Mootabadi H., Bhatia S., Abdullah, A.Z. 2010. Optimization of ultrasonic-assisted heterogeneous biodiesel production from palm oil: A response surface methodology approach. *Fuel Processing Technol.* 91:441-448.
- Schoonmaker J.P., Fluharty F.L., Loerch S.C. 2004. Effect of source and amount of energy and rate of growth in the growing phase on adipocyte cellularity and lipogenic enzyme activity in the intramuscular and subcutaneous fat depots of Holstein steers. *J. Anim. Sci.* 82(1), 137-148.
- SDA. Soap and Detergent Association. 1990. *Glycerine: An Overview*. The Soap and Detergent Association, Glycerine and Olechemical Division. New York, USA. Disponible en http://www.aciscience.org/docs/Glycerine_an_overview.pdf.
- SENER. Secretaria de Energia. 2009. Programa de introducción de bioenergéticos. México: Gobierno Federal.
- Shin J. H., Wang D., Kim S. C., Adesogan A. T., Staples C. R. 2012. Effects of feeding crude glycerol on performance and ruminal kinetics of lactating Holstein cows fed corn silage or cottonseed hull-based, low-fiber diets. *J. Dairy Sci.* 95: 4006-4016.
- Südekum K., Schröder A., Fiebelkorn S., Schwer R., Thalmann A. 2008. Quality characteristics of pelleted compound feeds under varying storage conditions as influenced by purity and concentration of glycerol from biodiesel production. *J. Anim. Feed Sci.* 17:120-136.
- Thompson J.C., He B. 2006. Characterization of crude glycerol from biodiesel production from multiple feedstocks. *Appl. Eng. Agri.* 22(2):261-265.
- Trabue S., Scoggin K., Tjandrakusuma S., Rasmussen M., Rminal fermentation of propylene glycol and glycerol. *J. Agric. Food Chem.* 55:7043-7051.
- Wang C., Liu Q., Yang W. Z., Huo W. J., Dong K. H., Huang Y. X., Yang X. M., He D. C. 2009a. Effects of glycerol on lactation performance, energy balance and metabolites in early lactation Holstein dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 151:12-20.
- Wang C., Liu Q., Yang W. Z., Huo W. J., Yang W. Z., Dong K. H., Huang Y. X., Guo G. 2009b. Effects of glycerol on rumen fermentation, urinary excretion of purine derivatives and feed digestibility in steers. *Livestock Sci.* 121: 15-20.
- Wright D.E. 1969. Fermentation of glycerol by rumen microorganisms. *N.Z. J. Agric. Res.* 12:281-286.
- Yang F., Milford A. H., Runcang, S. 2012. Value-added uses for crude glycerol—a byproduct of biodiesel production. *Biotechnol. Biofuels*: 5:1-10.
- Yong K.C., Ooi T.L., Dzulkefly K., Wan Yunus W.M.Z., Hazimah A.H. 2001. Characterization of glycerol residue from a palm kernel oil methyl ester plant. *J. Oil Palm Res.* 13 (2): 1-6.
- Zuleta E., Bonet J., Díaz L., Bastidas, M. 2007. Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite crudo de palma africana (*Elais guineensis*) con etanol. *Energética* 38:47-53.