



Inclusión dietaria de clinoptilolita como aditivo en la producción de rumiantes

Dietary inclusion of clinoptilolite as a feed additive in ruminants production

Ana Tánori-Lozano^a, Maricela Montalvo-Corral^a, Araceli Pinelli-Saavedra^a, Martín Valenzuela-Melendres^a, Zamorano-García Libertad^a, José Luis Dávila-Ramírez^b, Humberto González-Ríos^{a*}

^a Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas # 46. Colonia La Victoria. CP. 83304, Hermosillo Sonora, México.

^b Ciencia Aplicada para el Desarrollo Tecnológico, A.C. (CIADETEC, A.C.), Pedro Moreno # 24, Col. Centro Norte. Hermosillo, Sonora, México.

RESUMEN

En los últimos años, las investigaciones se han centrado en el estudio, desarrollo y validación de compuestos de origen natural que se puedan utilizar de manera eficaz y segura como alternativa a los promotores de crecimiento convencionales que se emplean rutinariamente en la producción pecuaria, de modo que estos no comprometan el bienestar animal, ni las características de calidad de la carne. Una de estas alternativas es el uso de minerales como las zeolitas de tipo clinoptilolita. La clinoptilolita al ser adicionada al alimento de rumiantes, ha demostrado tener efectos benéficos sobre algunos parámetros de la fermentación ruminal, lo cual se traduce en una mejora en el comportamiento productivo del animal. Los reportes sobre el uso en rumiantes son limitados y en algunos casos los resultados son inconsistentes. En esta revisión se discuten los efectos que se han encontrado en ovinos y bovinos al ser suplementados con distintas dosis de clinoptilolita.

Palabras clave: Rumiantes, Clinoptilolita, Comportamiento productivo, Fermentación ruminal.

ABSTRACT

In recent years, research has focused on the study, development and validation of compounds of natural origin that can be used effectively and safely as an alternative to conventional growth promoters routinely used in livestock production, so that these do not compromise animal welfare, or the meat quality characteristics. One of these alternatives is the use of minerals such as zeolites of the clinoptilolite type. Clinoptilolite, when added to ruminant feed, has been shown to have beneficial effects on some parameters of ruminal fermentation, which translates into an improvement in the productive behavior of the animal. However, there is a lack of studies on ruminants, and in some cases have been inconclusive. Thus, the aim of this review is to discuss the effects of the dietary inclusion of clinoptilolite as a feed additive in ovines, and bovines supplemented with different levels of Clinoptilolite

Key words: Ruminants, Zeolites, Productive performance, Ruminal fermentation.

*Autor para correspondencia: Humberto González-Ríos
Correo electrónico: hugory@ciad.mx

Recibido: 3 de junio de 2022

Aceptado: 21 de septiembre de 2022

INTRODUCCIÓN

El cambio climático y la resistencia a antibióticos son dos de las principales amenazas a la salud animal y humana, y entre los diferentes factores que contribuyen a su impacto, la ganadería tiene una participación importante debido a la generación de gases de efecto invernadero (GEI) que se producen durante la fermentación ruminal (FR) (Gerber *et al.*, 2013). A su vez, la demanda de carne y leche proveniente de rumiantes aumenta de manera proporcional al incremento de la población humana (Baldi y Gottardo, 2017), por lo cual, la industria pecuaria además de aumentar la población de sus hatos ganaderos, ha buscado implementar diferentes estrategias que garanticen una eficiencia en la FR y en la utilización de alimento con el fin de obtener un mayor rendimiento de leche y carne. Dentro de estas estrategias se encuentra el uso de aditivos que modulen algunos parámetros de la FR, donde de manera recurrente los productores utilizan ionóforos o antibióticos promotores de crecimiento (APC) en dosis subterapéuticas con el objetivo de promover el crecimiento, mejorar la conversión alimenticia e incluso prevenir infecciones (Dibner y Richards, 2005). Su mecanismo de acción se encuentra relacionado con la inhibición en algunas poblaciones de microorganismos no deseados, lo cual promueve cambios en el microbioma ruminal (MOR) y consecuentemente en la dinámica de la FR. Estos cambios mejoran la utilización de nutrientes y uso de la energía (Dennis *et al.*, 1981; Gaskin *et al.*, 2002; Dibner y Richards, 2005). Sin embargo, existe la preocupación de que el uso imprudente de los APC conduzca al desarrollo de resistencias antimicrobianas y transferencia de genes resistentes a antibióticos a humanos, representando un peligro para la salud del consumidor (Castanon, 2007; Mathew *et al.*, 2007). Por ello se han propuesto otro tipo de aditivos alimenticios con propiedades nutracéuticas, capaces de sustituir a estos compuestos, manteniendo los beneficios reportados y garantizando una producción sustentable.

Dentro de este grupo de aditivos se encuentran los de uso común como ácidos orgánicos, enzimas digestivas, probióticos y prebióticos; además se encuentran aquellos aditivos alternativos como extractos vegetales y minerales como zeolitas de tipo clinoptilolita (Spears, 1996; Benchaar

Volumen XXV, Número 1



DOI: 10.18633/biotecnia.v25i1.1759

et al., 2008; Meschiatti *et al.*, 2019; Zayed *et al.*, 2020). Debido a su potencial en la producción animal, recientemente se ha incrementado el interés en el uso de estos aditivos alternativos. Sin embargo; las dosis, tipos de dietas o tiempos de exposición efectivos en rumiantes o monogástricos aún no se han dilucidado completamente, observándose en algunos casos efectos nulos o poco convenientes, aunado a que su uso prolongado podría conllevar a una adaptación metabólica, reduciendo el efecto esperado en el animal (Patra y Saxena, 2009; Peña-Torres *et al.*, 2019).

En el caso particular de la clinoptilolita (CTL), las dosis efectivas para monogástricos son conocidas y en la industria avícola es común incluirlas en la dieta de las aves de postura y pollos de engorda (Kyriakis *et al.*, 2002; FEEDAP, 2013; Hcini *et al.*, 2018). Por otra parte, aunque algunas investigaciones han reportado cambios favorables en los parámetros de la FR, la adición de CTL en la dieta de rumiantes no es una práctica rutinaria (McCollum y Galyean, 1983; Khachlouf *et al.*, 2018; Roque-Jiménez *et al.*, 2018). Esta revisión tiene como objetivo mostrar la información actual del uso de la CTL y su efecto en la producción de bovinos y ovinos.

Definición y propiedades de las zeolitas tipo Clinoptilolita

Las zeolitas son aluminosilicatos hidratados de estructura tridimensional constituidos por tetraedros de óxido de silicio y aluminio, los cuales se encuentran compensados con cationes intercambiables de potasio, calcio, magnesio y sodio; cuya función es estabilizar la carga de material (Mumpston, 1998; Coombs *et al.*, 1998). Su estructura les permite formar cavidades ocupadas por iones relativamente inocuos y moléculas de agua, las cuales muestran gran libertad de movimiento. Esto les brinda sus propiedades específicas: el intercambio catiónico, tamizado molecular, adsorción y la deshidratación reversible (Bish y Ming, 2001; Li *et al.*, 2017).

Las zeolitas se formaron a partir de la vitrificación de las cenizas volcánicas, es por ello que se encuentran catalogadas como minerales provenientes de rocas volcánicas, de los cuales se han registrado más de 50 especies (divididas en grupos) donde cada una tiene sus características fisicoquímicas únicas. En la industria pecuaria la zeolita de tipo CTL es la más empleada como aditivo alimenticio debido a que ha mostrado tener efectos benéficos en el rendimiento y salud animal, además, ha demostrado ser un aditivo inerte en el sistema digestivo, debido a que no reacciona químicamente con otros nutrientes o fluidos corporales, por lo que no causa efectos adversos a la salud (Coombs *et al.*, 1998; Valpotić *et al.*, 2017).

La CTL ($\text{Ca Na}_4\text{K}_4[\text{AlO}_4]_2[\text{SiO}_4]_{230} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) tiene una relación silicio/aluminio ≥ 4 , misma que la hace pertenecer al grupo de las zeolitas de tipo heulandita (Bish y Ming, 2001; Jha y Singh, 2016), es clasificada como un material micro-mesoporoso (0.30 a 4 nm) con una capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 2.2 meq/100g (Jha y Singh, 2016; Król, 2020) y una afinidad más pronunciada por algunos elementos: $\text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Ba}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Li}^+$ (Ames, 1960).

Dentro de los efectos estudiados que ha tenido la CTL, se encuentran la desintoxicación de organismos humanos y animales, efecto antibacterial, mejoras en la nutrición e inmunidad de los animales, dosificación de fármacos, separación de biomoléculas, purificación de agua, suelo y aire, absorbente de contaminantes radioactivos y descontaminación de aguas residuales descargadas de centro nucleares (Rostami y Jafari, 2014; Delkash *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2015; Yuna, 2016; Valpotić *et al.*, 2017). Debido a sus propiedades presentadas en los animales de engorde, principalmente en aves y cerdos, recientemente se ha propuesto como alternativa para sustituir o complementar el efecto de los promotores de crecimiento tradicionales. El aprovechamiento de los nutrientes cuando se suplementa con este mineral, es atribuido principalmente a dos propiedades específicas, su CIC y su competencia como adsorbente. Estas propiedades posibilitan drenar moléculas no deseadas del organismo, regular la microbiota intestinal, permitiendo con ello un mayor tiempo de retención de los nutrientes, además de una liberación dosificada de los mismos en el tracto digestivo (Wu *et al.*, 2013; Tondar *et al.*, 2014; Valpotić *et al.*, 2016).

Adsorción e intercambio catiónico de las Zeolitas

La adsorción se describe como un proceso donde ocurren interacciones de tipo físicas, químicas o iónicas entre las moléculas de un adsorbente y adsorbato, las cuales influyen en la concentración de un compuesto o fluido (adsorbato) sobre la superficie de un sólido (adsorbente). La CIC de las zeolitas se considera dentro del proceso de adsorción, debido a que los iones del adsorbato solamente son reemplazados por los iones de compensación de la zeolita a través de interacciones electroestáticas que buscan neutralizar la carga (Kammerer *et al.*, 2019). Por lo tanto, se le conoce como CIC a la capacidad de sustitución o desplazamiento de los cationes de compensación de acuerdo con su radio iónico y concentración de carga. Esta capacidad se relaciona directamente con la cantidad de aluminio que contiene la zeolita; entre menor sea la relación silicio-aluminio, mayor será su CIC (Weitkamp y Puppe, 2013).

Últimamente, investigadores han centrado su interés en el estudio de las propiedades adsorbentes de la zeolita y otros materiales para la recuperación de diferentes compuestos, por una parte, para disminuir la carga orgánica de las aguas residuales y por otro lado para utilizarlos en el sector de la cosmética, farmacéutica y alimentaria, con el fin de enriquecer sus productos a una inversión relativamente económica al tratarse de un material de bajo costo (Ahmaruzzaman, 2008; Thiel *et al.*, 2013; Kammerer *et al.*, 2019). Además, se han realizado distintos trabajos con zeolitas para la dosificación controlada o retención de fármacos, aditivos o nutrientes en el organismo, de tal manera que estos sean mejor aprovechados. Por ejemplo, cuando son incluidos en la dieta de animales de producción, este aprovechamiento se ve reflejado en mejoras en el comportamiento productivo (Toprak *et al.*, 2016; Valpotić *et al.*, 2017). Otra propiedad de las zeolitas, es su capacidad para atrapar a las micotoxinas

encontradas en productos alimenticios para animales, lo cual disminuye el impacto que estas pudieran causar en la salud animal (Di Gregorio *et al.*, 2014).

Un estudio probó la capacidad de las zeolitas para prolongar el tiempo de liberación de un extracto fenólico, dentro de los resultados encontrados, se observó que, en el transcurso de 3 h, solamente se había liberado el 60 % del extracto de los hidrogeles que contenían 3 % de zeolita, este efecto se le atribuye a que la zeolita provocó una mayor reticulación en el material, además de un menor valor de liberación inicial (Cursaru *et al.*, 2020). Mientras tanto, en otro estudio donde se evaluaron las propiedades de desorción de la CTL (se utilizaron tres tamaños de partícula: pequeño, mediano y grande; 1.5-10 μm , 5-16 μm y 11-40 μm respectivamente) modificada con aspirina bajo condiciones gástricas, se encontró que, a un pH de 2.0 y un tamaño de partícula grande (11-40 μm), la liberación de aspirina fue aproximadamente un 20 % menor que los otros tratamientos. Por otra parte, a un pH de 6.5 (intestinal) se alcanzó el 80 % de liberación de aspirina, lo cual indica que las propiedades de adsorción y desorción de la zeolita son dependientes del pH y tamaño de partícula (Tondar *et al.*, 2014). Con respecto a lo anterior, otros autores han observado que trabajar a un pH menor al pKa de la zeolita favorece la recuperación de moléculas, esto debido a la carga negativa de la zeolita y al principio de Coulomb; por lo que es importante mencionar que el punto de inflexión sobre la influencia del pH en la capacidad de adsorción de la zeolita se encuentra en un valor alrededor de 4.5 (Ahmaruzzaman, 2008; Dávila-Guzman *et al.*, 2012; Tondar *et al.*, 2014).

Modificación química de las Zeolitas

Con el fin de aprovechar y potencializar las propiedades de las zeolitas, éstas son sometidas a un proceso de modificación o activación de tal manera que este material se pueda emplear como adsorbente o dosificador de fármacos (Tondar *et al.*, 2014; Servatan *et al.*, 2020) o de distintas moléculas orgánicas (Martins *et al.*, 2020), también, mediante el uso de óxidos o iones metálicos como el zinc, cobre o plata, éstas potencializan su efecto bactericida o bacteriostático (Copcia *et al.*, 2011; Hagiware *et al.*, 2011; Ambrozova *et al.*, 2017; Milenkovic *et al.*, 2017; Fanta *et al.*, 2019), así mismo se han visto zeolitas impregnadas de urea que son utilizadas en la alimentación de rumiantes (Erwanto *et al.*, 2011; Kardaya *et al.*, 2012; Laza-Knoerr y Dumargue, 2020; Sallam *et al.*, 2022). Este principio se basa en la CIC de la zeolita, misma que le permite descionizar selectiva y parcialmente los cationes de compensación, para posteriormente cargar los cationes de interés según el grado de afinidad con el material (Ames, 1960; Sallam *et al.*, 2022). Por lo general para lograr esta modificación química, las zeolitas son sometidas a un proceso de elución llevado a cabo en soluciones acuosas a una concentración y temperatura conocida (Cerri *et al.*, 2002; Montes-Luna *et al.*, 2015).

La zeolita también puede ser modificada por medio de métodos físicos y mostrar efectos favorables, por ejemplo,

en un estudio donde se incorporó zeolita vibro activada y micronizada en la ración de vacas lecheras, la zeolita demostró reducir las incidencias de infecciones intramamarias de las vacas (Đuričić *et al.*, 2020). Por otra parte, El-Nile *et al.* (2021), estudiaron el efecto que tiene la nano-zeolita (zeolita reducida mecánicamente) sobre los parámetros de la FR en cabras. En este estudio se reportó una reducción en la producción de metano y una mejora en la producción total de ácidos grasos volátiles ruminiales (AGV) y ácido propiónico en las cabras suplementadas.

Uso de la clinoptilolita natural en la industria pecuaria como estrategia de mejora en los parámetros productivos

La zeolita de tipo CTL es empleada en la nutrición animal principalmente por sus efectos sobre la salud de aves, cerdos y vacas lecheras, además es un ingrediente inerte que tiene efectos benéficos sobre la producción; para el caso específico de rumiantes como bovinos y ovinos, se ha observado que además de modular los parámetros de la FR, las zeolitas ocasionan cambios en algunas poblaciones de bacterias y protozoos del MOR (Galindo *et al.*, 1986; Goodarzi y Nanekarani, 2012), reflejándose en la producción de carne y leche.

Efectos en la fermentación ruminal

La CTL tiene una alta afinidad por los iones de amonio, se ha reportado una captura de hasta el 15% de éstos en el rumen, los cuales son liberados lentamente por un intercambio con los iones de sodio contenidos en la saliva que ingresa al rumen durante la rumia (Mumpton, 1998). Esto favorece la eficiencia en la síntesis de la proteína microbiana y reducción en las altas concentraciones de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$), cuando en la alimentación del rumiante se agregan compuestos nitrogenados no proteicos (NNP) (White y Ohlrogge, 1983; Sallam *et al.*, 2022). Además, se han observado cambios en los parámetros de la FR al incorporar CTL natural o modificada en la dieta de rumiantes (Cuadro 1). Por ejemplo, se han visto mejoras en la relación acetato:propionato (A:P) durante la producción de AGV ruminiales (McCollum y Galyean, 1983; Kardaya *et al.*, 2012), además de una reducción de hasta el 49 % en las concentraciones de gas metano (Kardaya *et al.*, 2012; El-Nile *et al.*, 2021).

A continuación, se presentan algunos ejemplos de diferentes estudios donde se evalúan los cambios en los parámetros de la FR y digestibilidad al suplementar a bovinos y ovinos con diferentes dosis de CTL. Por ejemplo, se tomó una muestra de líquido ruminal de ovinos suplementados con dos tipos de CTL y su combinación (cálcica y potásica), y se midió el pH, $\text{NH}_3\text{-N}$, la concentración total de AGV y población de bacterias a diferentes horas post-alimentación (0, 3, 6 y 10). En este estudio se observó que la CTL cálcica mantuvo el pH ruminal cerca de la neutralidad a las 3, 6 y 10 horas, además, las concentraciones totales de AGV, y la población de bacterias celulolíticas fueron más altas en comparación con los demás tratamientos (Goodarzi y Nanekarani, 2012).

Cuadro 1: Cambios en los parámetros de la fermentación ruminal y digestibilidad de bovinos y ovinos suplementados con clinoptilolita
Table 1: Effects of dietary clinoptilolite on rumen fermentation characteristics and digestibility in bovines, and ovines

Tiempo de exposición y dosis empleada	Especie (n)	Efecto observado	Referencia
CTL cárlica y potásica, 0 y 4 % por 3 sem	Ovinos n = 4	↑ pH, población de bacterias celulolíticas, producción total de AGV y absorción del NH ₃ -N	Goodarzi & Nanekarani (2012)
Zeolita natural: 0, 20, 40 y 60 g/kg por 52 d	Ovinos Rambouillet n = 40	↑ Producción total de AGV, pH y retención de N	Roque-Jiménez <i>et al.</i> (2018)
CTL al 1.4 % por 12 sem	Vacas Holstein n = 30	T↑ pH ruminal T↓ Concentración total de AGV y ácido propiónico	Dschaak <i>et al.</i> (2010)
CTL-Ca: 0, 10, 20 y 30 g/kg por 35 d	Novillos Holstein n = 4	T↑ Concentración total de AGV, relación A:P ↑ Degradación de la materia orgánica, almidón y el flujo del NH ₃ -N al duodeno	Urías-Estrada <i>et al.</i> (2017)
CTL potásica al 0, 1.5, 3 y 4.5 % por 17 d	Ovinos Pelibuey n = 4	↑ Concentración de ácido propiónico	Ruiz <i>et al.</i> (2007)
CTL al 0, 1.25, 2.5 y 5 % por períodos de 14 d	Novillos n = 4	↑ Concentración de ácido propiónico T↑ Concentración total de AGV, digestibilidad de nutrientes ↓ pH y nivel de NH ₃ -N	McCollum & Galyean (1983)
CTL al 0, 3, 6 y 9 % por períodos de 17 d	Ovinos n = 8	Cambios en la digestibilidad de la materia seca, proteína y fibra	Ghaemnia <i>et al.</i> (2010)
CTL 200 g/d por 12 sem	Vacas Holstein n = 16	↑ pH ↓ Concentración de ácido propiónico	Karatzia <i>et al.</i> (2011)
Zeolita natural al 2 % por 45 d	Ovinos Arabi n = 45	↑ pH y concentración de ácido acético	Mahdavirad <i>et al.</i> (2021)
Zeolita al 0, 30 y 60 g/d por 90 d	Ovinos Mehraban n = 48	↑ Digestibilidad de la PC, MO y fibra.	Forouzani <i>et al.</i> (2004)
Zeolita natural 1 % y Zeolita impregnada con urea 2 % por 11 d	Ovinos n=24	↓ pH ruminal, concentración de ácido acético y metano Mejor relación acetato:propionato	Kardaya <i>et al.</i> (2012)
CTL cárlica 3 % por 120 d	Novillos Holstein n = 45	↑ Concentración de NH ₃ -N (5.5 h post alimentación)	Sadeghi & Shawrang (2006)
CTL 1 y 2 % por 90 d	Ovinos Barki n = 30	↑ pH y digestibilidad de la PC, MO y fibra. ↓ Nivel de NH ₃ -N (3 y 6 h post alimentación)	Ghoneem <i>et al.</i> (2022)

T: Tendencia; NH₃-N: Nitrógeno amoniacial; AGV: Ácidos grasos volátiles; N: Nitrógeno; PC: Proteína cruda; MO: Materia orgánica

En otro trabajo donde se analizaron los parámetros de la FR, se observó un pH más alto en los corderos suplementados y una mayor producción de AGV al adicionar 40 y 60 g/kg de zeolita en el alimento (Roque-Jiménez *et al.*, 2018). Se puede observar que la mayoría de los estudios han reportado un pH ruminal alcalino en los animales suplementados con CTL (Dschaak *et al.*, 2010; Karatzia *et al.*, 2011; Mahdavirad *et al.*, 2021). Sin embargo, en un estudio realizado en novillos donde se probaron 3 dosis diferentes de CTL (1.25, 2.5 y 5 %), se reportó un pH ligeramente ácido en los tratamientos donde se incluyó 2.5 y 5 % de CTL; no obstante, se reportó una mayor concentración de AGV totales y ácido propiónico (McCollum y Galyean, 1983). En este trabajo las concentraciones de AGV tendieron a incrementarse en los grupos experimentales (107.7, 106.6 y 106.8 mmol/L) con respecto al control (104.8) y se presentó un aumento significativo en la producción de ácido propiónico (38.1 vs 35.2%) para el grupo donde se incluyó 2.5 % de CTL en la dieta. El aumento en la producción de AGV y ácido propiónico ha sido constante en ovinos (Ruiz *et al.*, 2007; Goodarzi y Nanekarani, 2012; Roque-

Jiménez *et al.*, 2018; Sallam *et al.*, 2022) y novillos (McCollum y Galyean, 1983; Urías-Estrada *et al.*, 2017) cuando se utilizan dosis mayores al 1.5 % de CTL en la dieta. Por ejemplo, en ovinos de pelo, se reportó un incremento significativo en las concentraciones de propionato al adicionar 1.5 % de CTL en el alimento (Ruiz *et al.*, 2007). Con respecto a los efectos en la digestibilidad, se ha demostrado que la CTL mejora la digestibilidad de los nutrientes, por ejemplo, la inclusión de CTL en la dieta de ovinos redujo la digestibilidad de la materia seca, pero en cambio mejoró la digestibilidad de la proteína, materia orgánica y de la fibra en los ovinos (Forouzani *et al.*, 2004; Ghaemnia *et al.*, 2010; Ghoneem *et al.*, 2022; Sallam *et al.*, 2022) y novillos suplementados con diferentes dosis de CTL (Galindo *et al.*, 1982; McCollum y Galyean, 1983; Urías-Estrada *et al.*, 2017).

Por otra parte, la zeolita modificada también ha demostrado potencial para modular algunos parámetros de la FR, por ejemplo, Kardaya *et al.* (2012), estudiaron el efecto que tiene la zeolita impregnada con urea sobre las características de FR en ovinos. Los resultados mostraron que

tanto la zeolita como la zeolita modificada con urea pueden ser utilizadas para mejorar la relación A:P y reducir hasta en un 37% la producción de metano en el rumen, sin afectar la producción del resto de los AGV. Además, se observó que los tratamientos con zeolita mantuvieron las concentraciones de $\text{NH}_3\text{-N}$ en rumen y las concentraciones de urea en plasma dentro de un rango normal-bajo. Estos cambios pueden ser atribuidos a la propiedad de adsorción-desorción de la zeolita, permitiéndole crear reservas de $\text{NH}_3\text{-N}$ en el rumen (Sadeghi y Shawrang, 2006; Kardaya *et al.*, 2012). En la mayoría de los sistemas de producción, el nitrógeno derivado de la degradación de las proteínas se produce por encima de la capacidad de los microorganismos ruminantes para utilizarlo para su crecimiento, por lo que el exceso de $\text{NH}_3\text{-N}$ se absorbe a través de las paredes ruminantes e ingresa al ciclo de la urea en el hígado, para posteriormente reingresar al rumen por medio de la saliva o ser excretado en la orina. Esto incrementa la liberación de nitrógeno al medio ambiente y puede generar un aumento en los costos de producción.

El mecanismo de acción de este mineral se encuentra relacionado a las modulaciones que ocasiona en el ambiente ruminal: La zeolita ocasiona un efecto buferizante en el rumen (debido a su alta capacidad de intercambio de iones de H^+), proporcionando condiciones favorables para el desarrollo y la actividad de las bacterias celulolíticas del rumen, además de una mejor eficiencia digestiva y producción de AGV (White y Ohlrogge, 1983; Pond y Mumpton, 1984; Goo-darzi y Nanekarani, 2012). Además, las reservas de $\text{NH}_3\text{-N}$ y su liberación controlada en el rumen debido a la CIC de la zeolita, permite una mayor utilización del nitrógeno de la dieta para la síntesis de proteína microbiana (White y Ohlrogge, 1983; Pond y Mumpton, 1984; Sadeghi y Shawrang, 2006; Erwanto *et al.*, 2011). Así mismo, en la mayoría de los estudios presentados anteriormente, se ha reportado un aumento en las concentraciones de propionato y en la reducción de la síntesis de metano. Estos cambios pueden estar relacionados a la CIC de la zeolita, permitiéndola actuar como sumidero de H^+ molecular y ocasionando una disminución en su disponibilidad para la reducción de dióxido de carbono a metano por actividad de los metanógenos; otra posible explicación sugiere un efecto directo de la zeolita sobre la composición de las comunidades del MOR y sus productos finales.

Se ha reportado que un cambio en el patrón de producción en los AGV hacia una mayor producción de propionato es consecuencia de una mayor digestión ruminal del almidón o de un uso más eficiente de la energía, debido a que las bacterias ruminantes utilizan más iones de H^+ para la síntesis de propionato en lugar de acetato o metano (Boadi *et al.*, 2004; Urías-Estrada *et al.*, 2017). Los cambios en las concentraciones de propionato y metano podrían beneficiar tanto a la eficiencia de la producción ganadera como al medio ambiente. El metano que se forma durante la FR contribuye al 40 % de los gases de efecto invernadero que se generan en la producción de rumiantes, además, la producción de este gas representa para el rumiante hasta un 12 % de pérdida de la energía bruta del alimento (Beauchemin *et al.*, 2020).

Efectos en el comportamiento productivo y características de la canal

A pesar de los potenciales efectos positivos sobre los parámetros de FR, el efecto de las zeolitas sobre el rendimiento en rumiantes no ha sido concluyente (Cuadro 2). Desde una perspectiva metabólica, las zeolitas no tienen un efecto directo sobre el rendimiento del ganado; sin embargo, al neutralizar el pH ruminal, proporcionan condiciones ruminantes más favorables para un mejor desarrollo y actividad de las bacterias, y por consecuencia una mejora en la productividad animal. De acuerdo con esto, corderos (Deligiannis *et al.*, 2005; Norouzian *et al.*, 2010; Stojković *et al.*, 2012; Estrada-Angulo *et al.*, 2017; Abdelrahman *et al.*, 2021) de diferentes razas y novillos (Sherwood *et al.*, 2005) registraron mejores ganancias de peso y eficiencia alimenticia cuando fueron suplementados con CTL. Sin embargo, algunos estudios han demostrado que la suplementación con CTL no tiene efecto sobre el comportamiento productivo animal (McCollum y Galyean, 1983; Bosi *et al.*, 2002; Toprak *et al.*, 2016; Mahdavirad *et al.*, 2021); no obstante, tampoco se ha reportado un efecto negativo sobre la producción, a excepción del estudio de Pond *et al.* (1984); En este trabajo se encontró una reducción en las ganancias de peso de los corderos suplementados con CTL y urea como fuente de NNP.

Por otro lado, los cambios en las características de la canal por efecto de la suplementación con CTL son limitados y además, los resultados encontrados hasta ahora son poco claros; algunos estudios reportan canales más magras y con una tendencia al aumento del área del ojo de costilla (Estrada-Angulo *et al.*, 2017; Coronel-Burgos *et al.*, 2017; Sa-líam *et al.*, 2022; Ghoneem *et al.*, 2022), mientras que otros autores no han observado efecto alguno en ninguna de las características de calidad de las canales (Pond *et al.*, 1984; Deligiannis *et al.*, 2005; Sherwood *et al.*, 2005) aun cuando los animales suplementados presentaron mejores ganancias de peso con respecto al grupo control. Una de las características de calidad de la canal de gran importancia económica es el rendimiento (relación entre el peso de la canal caliente y peso vivo del animal), y es bien conocido que se puede mejorar aumentando el nivel nutricional de la dieta (Alexandre *et al.*, 2009). En este sentido, la zeolita al ser un ingrediente que no tiene ningún aporte energético, disminuye la concentración de energía neta cuando es incluida en la dieta (Coronel-Burgos *et al.*, 2017; Estrada-Angulo *et al.*, 2017). Esta reducción de la densidad energética de la dieta puede reflejarse en una menor deposición de tejido muscular y grasa corporal en las canales de los animales suplementados, y por consecuencia en el rendimiento de éstas. Sin embargo, se requiere de más investigación para establecer si la CTL puede mejorar las características de las canales y además, aclarar las condiciones nutricionales de la dieta para una mejor utilización de la energía bajo una suplementación con este mineral.

Por otra parte, Khachlouf *et al.* (2018) recientemente realizaron un meta-análisis sobre los efectos en la producción y composición de la leche proveniente del ganado lechero suplementado con zeolita, principalmente CTL. El

Cuadro 2: Efectos en el comportamiento productivo y caraterísticas de la canal de bovinos y ovinos suplementados con clinoptilolita.
Table 2: Effects of dietary clinoptilolite on feedlot performance and carcass traits in bovines and ovines.

Tiempo de exposición y dosis empleada	Especie (n)	Efecto observado	Referencia
CTL al 0, 1.5 y 3 % por 6 sem	Ovinos Balouchi n = 30	↑ GDP	Norouzian <i>et al.</i> (2010)
Zeolita al 0, 30 y 60 g/d por 90 d	Ovinos Mehraban n = 48	↑ Consumo de alimento ↑NS CA y AOC ↓Menor deposición de grasa dorsal	Forouzani <i>et al.</i> (2004)
CTL al 0, 1.5, 3 y 4.5 % por 75 d	Ovinos Kathadin x Pelibuey n = 40	↑ Masa magra ↓ grasa tisular y visceral ↑↑ AOC	Coronel-Burgos <i>et al.</i> (2017)
CTL 1 y 2 % por 90 d	Ovinos Barki n = 30	T↑ GDP y T↓ CA	Ghoneem <i>et al.</i> (2022)
Zeolita natural: 0, 20, 40 y 60 g/kg por 52 d	Ovinos Rambouillet n = 40	↑GDP y CA	Roque-Jiménez <i>et al.</i> (2018)
CTL: 0 y 3% por 3 meses	Ovinos Karagouniko n = 24	↑GDP y consumo de alimento Características de la canal sin cambio	Deligiannis <i>et al.</i> (2005)
CTL al 0, 1.5, 3 y 4.5 % por 75 d	Ovinos Kathadin x Pelibuey n = 40	↑CA Sin cambio en consumo de alimento	Estrada-Angulo <i>et al.</i> (2017)
CTL al 1.2 % por 168 d	Bovinos n = 96	↑NS GDP (3.4 %) y CA (2.8 %)	Sherwood <i>et al.</i> (2005)
CTL al 0, 1, 2 y 3 % por 56 d	Ovinos Kathadin x Pelibuey n = 40	Sin cambios en el comportamiento productivo ↓Menor deposición de grasa dorsal	Estrada-Angulo <i>et al.</i> (2017)
CTL al 1 y 2 % por 56 d	Ovinos Naemi n = 24	↑ Ganancia total de peso y consumo de alimento	Abdelrahman <i>et al.</i> (2021)
Alimento a base de CTL	Ovinos n = 15	↑ Ganancia total de peso, GDP y CA ↓ Incidencia de diarreas	Stojkovic <i>et al.</i> (2012)
Aluminosilicato de sodio: 0 y 200 g/d por 100 d	Vacas Holstein n = 42	↑Producción de leche (+2.18 kg/vaca) Sin cambios en la composición química de la leche	Khachlouf <i>et al.</i> (2019)
CTL al 0, 150 y 300 g/d por 20 sem	Vacas Holstein n = 90	Sin cambios en la producción de leche	Marin <i>et al.</i> (2020)

T: Tendencia; GDP: Ganancia diaria de peso; NS: Resultado no significativo AOC: Área del ojo de costilla; CA: Conversión alimenticia

meta-análisis reveló un aumento en la producción de leche cuando las vacas son suplementadas con dosis entre los 200 y 300 g/d. Una mejora en el rendimiento de la leche puede ser resultado de una modificación en algunos de los parámetros de la FR como: un aumento en la producción de propionato, mejoras en la digestibilidad o una mayor síntesis de proteína microbiana (Marin *et al.*, 2020). No obstante, algunos autores no reportaron cambios en la producción de leche (Bosi *et al.*, 2002; Dschaak *et al.*, 2010; Khachlouf *et al.*, 2019); estas inconsistencias pueden estar relacionados a la dosis utilizada, la composición de la dieta o de la zeolita, consumo de alimento o el tamaño de partícula del alimento (Khachlouf *et al.*, 2018; Marin *et al.*, 2020).

Es importante resaltar que con respecto a la influencia en la calidad de la carne de rumiantes por la suplementación con CTL, hasta nuestra revisión se cuenta con muy poca información disponible en la literatura. No obstante, los resultados de un estudio reportan una mejora en el color de la carne de corderos suplementados con 1 % de CTL, principalmente en los parámetros L*, a* y C*, además se observó una mejora en el perfil lipídico e índices nutricionales de la carne de los corderos suplementados (Tánori-Lozano *et al.*, 2022). Este último resultado, coincide con los cambios reportados en el perfil lipídico de la carne de aves suplementadas con CTL (Mallek *et al.*, 2012; Hcini *et al.*, 2018).

Seguridad de la Clinoptilolita

Con respecto al uso de CTL, hasta el momento no se han reportado efectos tóxicos a su exposición durante períodos largos, incluso algunos estudios han encontrado resultados prometedores sobre la inhibición del desarrollo de células cancerígenas (Pavelić *et al.*, 2018; Eisenwagen y Pavelić, 2020). Recientemente se ha discutido la posibilidad de que ocurra una desorción de los metales pesados atrapados en las zeolitas cuando esta transita por el intestino; sin embargo, debido a la alta afinidad que tiene la CTL por los metales pesados, la adsorción es casi irreversible (Hamidpour *et al.*, 2010; Tondar *et al.*, 2014).

La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) aprobó el uso de CTL como un aditivo seguro para utilizarse en la industria pecuaria a dosis de hasta 10,000 mg/kg. La CTL al ser un aditivo inerte, no se absorbe ni se degrada durante su paso por el tracto digestivo, por lo que es completamente excretada en las heces (FEEDAP, 2013). En ninguno de los estudios anteriores se reportaron efectos negativos sobre la productividad o salud de los animales que fueron suplementados con CTL. Por el contrario, la adición del mineral a la dieta contribuyó a su salud, disminuyendo el índice de diarreas o infecciones intramamarias (Deligiannis *et al.*, 2005; Norouzian *et al.*, 2010; Stojković *et al.*, 2012; Khachlouf *et al.*, 2019; Đuričić *et al.*, 2020), así como las concentraciones

de aflatoxinas (Katsoulos *et al.*, 2016) y de metales pesados (Khachlouf *et al.*, 2019) en la leche de vacas. Otra de las preocupaciones sobre el uso de zeolitas en la nutrición animal, es su potencial efecto de adsorber minerales o vitaminas esenciales, lo que a largo plazo pudiera provocar desbalances nutricionales y repercutir negativamente en la productividad animal. No obstante, varios estudios han mostrado que la suplementación con CTL no tuvo efectos adversos sobre las concentraciones séricas de Cu, Fe, Zn, Na, K, Ca, Mg y vitaminas A y E (Bosi *et al.*, 2002; Papaioannou *et al.*, 2002; Katsoulos *et al.*, 2005; Khachlouf *et al.*, 2019). Incluso, Khachlouf *et al.* (2019) reportaron un incremento en las concentraciones de Ca sanguíneo en las vacas suplementadas con 200 g/d de CTL en su etapa pre-parto y lactancia; este resultado sugiere que la inclusión de CTL en la dieta de las vacas podría reducir la incidencia de hipocalcemia post-parto.

Conclusiones y perspectivas futuras

La continua preocupación por el riesgo a la salud humana y animal que representa el uso indiscriminado de los APC, aunado al necesario traslado hacia un sistema de producción sustentable con menor impacto ambiental, requiere la búsqueda de ingredientes con valor nutricional y/ o propiedades bioactivas que compitan con los promotores de crecimiento tradicionales. Sin embargo, hoy en día existen muchas preguntas e incertidumbre sobre el uso de estos ingredientes alternativos para implementarse rutinariamente en la producción animal, principalmente debido al desconocimiento sobre los beneficios que éstos compuestos pueden tener tanto en el aspecto económico, como productivo y ambiental. Por otro lado, el uso de productos de origen natural tiene poca aceptación por parte de los productores a causa de que los efectos de algunos de estos compuestos son moderados e incluso en algunos casos inconsistentes. Hasta el momento, según la información actual, el uso de CTL en la dieta de rumiantes pudiera ser una estrategia prometedora para la obtención de mejores resultados en la producción y calidad de carne y leche proveniente de rumiantes.

Los resultados presentados en esta revisión muestran el potencial que tiene la CTL en la producción animal, por lo cual se requiere realizar más investigaciones sobre el uso de este aditivo, con la finalidad de establecer las condiciones de dosificación, composición de la dieta y de la zeolita, así como el tamaño de partícula del mineral. Además, se requieren nuevos estudios sobre los efectos en la calidad de la carne de los rumiantes.

REFERENCIAS

- Abdelrahman, M.M., Alhidary, I., Adeniji, Y.A., Alobre, M.M., Albaadani, H., y Aljumaah, R. 2021. Manipulating Phosphorus, Calcium, and Magnesium Utilization by Growing Lambs Using Natural Zeolite (Clinoptilolite). *Sustainability* 13:1539.
- Ahmaruzzaman, M. 2008. Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: a review. *Advances in colloid and interface science* 143:48-67.
- Alexandre, G., Limea, L., Fanchonne, A., Coppry, O., Mandonnet, N., y Boval, M. 2009. Effect of forage feeding on goat meat production: carcass characteristics and composition of Creole kids reared either at pasture or indoors in the humid tropics. *Asian-Australasian journal of animal sciences* 22:1140-50.
- Ambrozova, P., Kynicky, J., Urubek, T., y Nguyen, V.D. 2017. Synthesis and modification of clinoptilolite. *Molecules* 22:1107.
- Ames Jr, L. 1960. The cation sieve properties of clinoptilolite. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials* 45:689-700.
- Baldi, A., y Gottardo, D. 2017. Livestock Production to Feed the Planet: Animal Protein: A Forecast of Global Demand over the Next Years. *Rel.: Beyond Anthropocentrism* 5:65.
- Beauchemin, K.A., Ungerfeld, E.M., Eckard, R.J., y Wang, M. 2020. Fifty years of research on rumen methanogenesis: Lessons learned and future challenges for mitigation. *Animal* 14:s2-s16.
- Benchaar, C., Calsamiglia, S., Chaves, A.V., Fraser, G., Colombatto, D., McAllister, T.A., y Beauchemin, K.A. 2008. A review of plant-derived essential oils in ruminant nutrition and production. *Animal Feed Science and Technology* 145:209-28.
- Bish, D.L., y Ming, D.W. 2001. Natural zeolites: Occurrence, properties, applications, vol. 45. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Mineralogical Society of America, Chantilly, Virginia.
- Boadi, D., Benchaar, C., Chiquette, J., y Massé, D. 2004. Mitigation strategies to reduce enteric methane emissions from dairy cows: Update review. *Canadian Journal of Animal Science* 84:319-35.
- Bosi, P., Creston, D., y Casini, L. 2002. Production performance of dairy cows after the dietary addition of clinoptilolite. *Italian Journal of Animal Science* 1:187-95.
- Castanon, J. 2007. History of the use of antibiotic as growth promoters in European poultry feeds. *Poultry science* 86:2466-71.
- Cerri, G., Langella, A., Pansini, M., y Cappelletti, P. 2002. Methods of determining cation exchange capacities for clinoptilolite-rich rocks of the Logudoro region in northern Sardinia, Italy. *Clays and Clay Minerals* 50:127-35.
- Coombs, D.S., Alberti, A., Armbruster, T., Artioli, G., Colella, C., Galli, E., Grice, J.D., Liebau, F., Mandarino, J.A., et al. 1998. Recommended nomenclature for zeolite minerals: report of the subcommittee on zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine* 62:533-71.
- Copcia, V.E., Luchian, C., Dunca, S., Bilba, N., y Hristodor, C.M. 2011. Antibacterial activity of silver-modified natural clinoptilolite. *Journal of materials science* 46:7121-28.
- Coronel-Burgos, F., Plascencia, A., Castro-Pérez, B., Contreras-Pérez, G., Barreras, A., y Estrada-Angulo, A. 2017. Influencia de la sustitución parcial del maíz y de la pasta de soja por zeolita en ovinos en etapa de finalización: Características de la canal, composición tisular y masa visceral. *Archivos de zootecnia* 66:223-28.
- Cursaru, B., Radu, A.-L., Perrin, F.-X., Sarbu, A., Teodorescu, M., Gavrilă, A.-M., Damian, C.-M., Sandu, T., Iordache, T.-V., et al. 2020. Poly (ethylene glycol) Composite Hydrogels with Natural Zeolite as Filler for Controlled Delivery Applications. *Macromolecular Research* 28:211-20.

- Dávila-Guzman, N.E., Cerino-Córdova, F.J., Diaz-Flores, P.E., Rangel-Mendez, J.R., Sánchez-González, M.N., y Soto-Regalado, E. 2012. Equilibrium and kinetic studies of ferulic acid adsorption by Amberlite XAD-16. *Chemical Engineering Journal* 183:112-16.
- Deligiannis, K., Lainas, T., Arsenos, G., Papadopoulos, E., Fortomaris, P., Kufidis, D., Stamataris, C., y Zygogiannis, D. 2005. The effect of feeding clinoptilolite on food intake and performance of growing lambs infected or not with gastrointestinal nematodes. *Livestock Production Science* 96:195-203.
- Delkash, M., Bakhshayesh, B.E., y Kazemian, H. 2015. Using zeolitic adsorbents to cleanup special wastewater streams: A review. *Microporous and Mesoporous Materials* 214:224-41.
- Dennis, S., Nagaraja, T., y Bartley, E. 1981. Effect of lasalocid or monensin on lactate-producing or using rumen bacteria. *Journal of Animal Science* 52:418-26.
- Di Gregorio, M.C., Neeff, D.V.d., Jager, A.V., Corassin, C.H., Carão, Á.C.d.P., Albuquerque, R.d., Azevedo, A.C.d., y Oliveira, C.A.F. 2014. Mineral adsorbents for prevention of mycotoxins in animal feeds. *Toxin Reviews* 33:125-35.
- Dibner, J.J., y Richards, J.D. 2005. Antibiotic growth promoters in agriculture: history and mode of action. *Poultry science* 84:634-43.
- Dschaak, C., Eun, J.-S., Young, A., Stott, R., y Peterson, S. 2010. Effects of supplementation of natural zeolite on intake, digestion, ruminal fermentation, and lactational performance of dairy cows. *The Professional Animal Scientist* 26:647-54.
- Đurić, D., Sukalić, T., Marković, F., Kočila, P., Žura Žaja, I., Menčik, S., Dobranić, T., Benić, M., y Samardžija, M. 2020. Effects of dietary vibroactivated clinoptilolite supplementation on the intramammary microbiological findings in dairy cows. *Animals* 10:202.
- EFSA Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP), 2013. Scientific Opinion on the safety and efficacy of clinoptilolite of sedimentary origin for all animal species. *EFSA Journal* 11:30-39.
- Eisenwagen, S., y Pavelic, K. 2020. Potential Role of Zeolites in Rehabilitation of Cancer Patients. *Archives of Physiotherapy and Rehabilitation* 3:29-40.
- El-Nile, A., Elazab, M., El-Zaiat, H., El-Azrak, K.E.-D., Elkomy, A., Sallam, S., y Soltan, Y. 2021. In vitro and in vivo assessment of dietary supplementation of both natural or nano-zeolite in goat diets: Effects on ruminal fermentation and nutrients digestibility. *Animals* 11:2215.
- Erwanto, E., Zakaria, W.A., y Prayuwidayati, M. 2011. The use of ammoniated zeolite to improve rumen metabolism in ruminant. *Animal Production* 13.
- Estrada-Angulo, A., Burgos, F.C., Pérez, B.C., Soto, M.L., Barreras, A., Montoya, C.A., Pérez, G.C., y Plascencia, A. 2017. Efecto de la inclusión de zeolita (clinoptilolita) en ovinos en etapa de finalización: Respuesta productiva y energética de la dieta. *Archivos de zootecnia* 66:381-86.
- Estrada-Angulo, A., Urías-Estrada, J.D., Castro-Pérez, B.I., Contreras-Pérez, G., Angulo-Montoya, C., Barreras, A., López-Soto, M.A., Olivas-Valdez, J.A., y Plascencia, A. 2017. Impact of dietary inclusion of clinoptilolite as substitute of soybean meal on growth performance, dietary energetics and carcass traits of feedlot ewes fed a corn-based diet. *Austral journal of veterinary sciences* 49:123-28.
- Fanta, F.T., Dubale, A.A., Bebizuh, D.F., y Atlabachew, M. 2019. Copper doped zeolite composite for antimicrobial activity and heavy metal removal from waste water. *BMC chemistry* 13:1-12.
- Forouzani, R., Rowghani, E., y Zamiri, M.J. 2004. The effect of zeolite on digestibility and feedlot performance of Mehraban male lambs given a diet containing urea-treated maize silage. *Animal Science* 78:179-84.
- Galindo, J., Elias, A., y Cordero, J. 1982. The addition of zeolite to silage diets. 1. Effect of the zeolite level on the rumen cellulolysis of cows fed silage. *Cuban Journal of Agricultural Science* 16:277-84.
- Galindo, J., Elias, A., y Gonzalez, M. 1986. The effect of zeolite on ruminal bacteria population and its activity in heifers fed sunflower: sorghum silage, *Studies in Surface Science and Catalysis*. Elsevier, pp. 1055-59.
- Gaskins, H., Collier, C., y Anderson, D. 2002. Antibiotics as growth promotants: mode of action. *Animal biotechnology* 13:29-42.
- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., y Tempio, G. 2013. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*.
- Ghaemnia, L., Bojarpour, M., Mirzadeh, K.H., Chaji, M., y Eslami, M. 2010. Effects of Different Levels of Zeolite on Digestibility. *Journal of Animal and Veterinary Advances* 9:779-81.
- Ghoneem, W.M., El-Tanany, R.R., y Mahmoud, A.E. 2022. Effect of Natural Zeolite as a Rumen Buffer on Growth Performance and Nitrogen Utilization of Barki Lambs. *Pakistan J. Zool* 54:1199-207.
- Goodarzi, M., y Nanekarani, S. 2012. The effects of calcic and potassic clinoptilolite on ruminal parameters in Lori breed sheep. *APCBE Procedia* 4:140-45.
- Hagiwara, Z., Hoshino, S., Ishino, H., Nohara, S., Tagawa, K., y Yamanaka, K. 2011. United States Patent No 4 911 898. Retrieved on January.
- Hamidpour, M., Kalbasi, M., Afyuni, M., Shariatmadari, H., Holm, P.E., y Hansen, H.C.B. 2010. Sorption hysteresis of Cd (II) and Pb (II) on natural zeolite and bentonite. *Journal of hazardous materials* 181:686-91.
- Hcini, E., Ben Slima, A., Kallel, I., Zormati, S., Traore, A.I., y Gdoura, R. 2018. Does supplemental zeolite (clinoptilolite) affect growth performance, meat texture, oxidative stress and production of polyunsaturated fatty acid of Turkey poult? *Lipids in health and disease* 17:1-9.
- Jha, B., y Singh, D.N. 2016. Fly ash zeolites. *Advanced Structured Materials* 78:5-31.
- Kammerer, D.R., Kammerer, J., y Carle, R. 2019. Adsorption and Ion Exchange for the Recovery and Fractionation of Polyphenols: Principles and Applications, *Polyphenols in Plants*. Elsevier, pp. 327-39.
- Karatzia, M.A., Pourliotis, K., Katsoulos, P.D., y Karatzias, H. 2011. Effects of in-feed inclusion of clinoptilolite on blood serum concentrations of aluminium and inorganic phosphorus and on ruminal pH and volatile fatty acid concentrations in dairy cows. *Biological trace element research* 142:159-66.
- Kardaya, D., Sudrajat, D., y Dihansih, E. 2012. Efficacy of dietary urea-impregnated zeolite in improving rumen fermentation characteristics of local lamb. *Media Peternakan* 35:207-07.

- Katsoulos, P.D., Karatzia, M.A., Boscos, C., Wolf, P., y Karatzias, H. 2016. In-field evaluation of clinoptilolite feeding efficacy on the reduction of milk aflatoxin M1 concentration in dairy cattle. *Journal of animal science and technology* 58:1-7.
- Katsoulos, P.-D., Roubies, N., Panousis, N., y Karatzias, H. 2005. Effects of long-term feeding dairy cows on a diet supplemented with clinoptilolite on certain serum trace elements. *Biological trace element research* 108:137-45.
- Khachlouf, K., Hamed, H., Gdoura, R., y Gargouri, A. 2018. Effects of zeolite supplementation on dairy cow production and ruminal parameters-a review. *Annals of Animal Science* 18:857-77
- Khachlouf, K., Hamed, H., Gdoura, R., y Gargouri, A. 2019. Effects of dietary Zeolite supplementation on milk yield and composition and blood minerals status in lactating dairy cows. *Journal of Applied Animal Research*.
- Kraljević Pavelić, S., Simović Medica, J., Gumbarević, D., Filošević, A., Pržulj, N., y Pavelić, K. 2018. Critical review on zeolite clinoptilolite safety and medical applications in vivo. *Frontiers in pharmacology*:1350.
- Król, M. 2020. Natural vs. synthetic zeolites. *Crystals* 10:622.
- Kyriakis, S.C., Papaioannou, D.S., Alexopoulos, C., Polizopoulou, Z., Tzika, E.D., y Kyriakis, C.S. 2002. Experimental studies on safety and efficacy of the dietary use of a clinoptilolite-rich tuff in sows: a review of recent research in Greece. *Microporous and Mesoporous Materials* 51:65-74.
- Laza-knoerr, A.L., y Dumargue, P. 2020. Urea supplement for animal nutrition. Google Patents.
- Li, Y., Li, L., y Yu, J. 2017. Applications of zeolites in sustainable chemistry. *Chem* 3:928-49.
- Mahdavirad, N., Chaji, M., Bojarpour, M., y Dehghanbanadaky, M. 2021. Comparison of the effect of sodium bicarbonate, sodium sesquicarbonate, and zeolite as rumen buffers on apparent digestibility, growth performance, and rumen fermentation parameters of Arabi lambs. *Tropical Animal Health and Production* 53:1-12.
- Mallek Z, Fendri I, Khannous L, Ben Hassena A, Traore Al, Ayadi M-A, et al. 2012. Effect of zeolite (clinoptilolite) as feed additive in Tunisian broilers on the total flora, meat texture and the production of omega 3 polyunsaturated fatty acid. *Lipids in health and disease*. 11(1):1-7.
- Marin, M.P., Pogurschi, E.N., Marin, I., y Nicolae, C.G. 2020. Influence of natural zeolites supplemented with inorganic selenium on the productive performance of dairy cows. *Pakistan journal of zoology* 52:775.
- Martins, G.N., Spínola, V., y Castilho, P.C. 2020. Release of adsorbed ferulic acid in simulated gastrointestinal conditions. *European Food Research and Technology* 246:1297-306.
- Mathew, A.G., Cissell, R., y Liamthong, S. 2007. Antibiotic resistance in bacteria associated with food animals: a United States perspective of livestock production. *Foodborne pathogens and disease* 4:115-33
- McCollum, F.T., y Galyean, M.L. 1983. Effects of clinoptilolite on rumen fermentation, digestion and feedlot performance in beef steers fed high concentrate diets. *Journal of Animal Science* 56:517-24.
- Meschiatti, M.A., Gouvêa, V.N., Pellarin, L.A., Batalha, C.D., Biehl, M.V., Acedo, T.S., Dórea, J.R., Tamassia, L.F., Owens, F.N., et al. 2019. Feeding the combination of essential oils and exogenous α -amylase increases performance and carcass production of finishing beef cattle. *Journal of Animal Science* 97:456-71.
- Milenkovic, J., Hrenovic, J., Matijasevic, D., Niksic, M., y Rajic, N. 2017. Bactericidal activity of Cu-, Zn-, and Ag-containing zeolites toward *Escherichia coli* isolates. *Environmental Science and Pollution Research* 24:20273-81.
- Montes-Luna, A.d.J., Fuentes-López, N., Perera-Mercado, Y., Pérez-Camacho, O., Castruita-de León, G., García-Rodríguez, S., y García-Zamora, M. 2015. Caracterización de clinoptilolita natural y modificada con Ca²⁺ por distintos métodos físico-químicos para su posible aplicación en procesos de separación de gases. *Superficies y vacío* 28:5-11.
- Mumpton, F. 1998. The role of natural zeolites in agriculture and aquaculture, *Zeo-Agriculture*. Westview Press, Boulder, Colorado.
- Norouzian, M., Valizadeh, R., Khadem, A., Afzalzadeh, A., y Nabipour, A. 2010. The effects of feeding clinoptilolite on hematology, performance, and health of newborn lambs. *Biological trace element research* 137:168-76.
- Papaioannou, D.S., Kyriakis, S.C., Papasteriadis, A., Roumbies, N., Yannakopoulos, A., y Alexopoulos, C. 2002. Effect of in-feed inclusion of a natural zeolite (clinoptilolite) on certain vitamin, macro and trace element concentrations in the blood, liver and kidney tissues of sows. *Research in veterinary science* 72:61-68.
- Patra, A.K., y Saxena, J. 2009. Dietary phytochemicals as rumen modifiers: a review of the effects on microbial populations. *Antonie van Leeuwenhoek* 96:363-75.
- Peña-Torres, E.F., González-Ríos, H., Avendaño-Reyes, L., Valenzuela-Grijalva, N.V., Pinelli-Saavedra, A., Muñoz-Almazán, A., y Peña-Ramos, E.A. 2019. Ácidos hidroxicinámicos en producción animal: farmacocinética, farmacodinamia y sus efectos como promotor de crecimiento. Revisión. *Revista mexicana de ciencias pecuarias* 10:391-415.
- Pond, W., Laurent, S., y Orloff, H. 1984. Effect of dietary clinoptilolite or zeolite Na-A on body weight gain and feed utilization of growing lambs fed urea or intact protein as a nitrogen supplement. *Zeolites* 4:127-32.
- Pond, W.G., y Mumpton, F.A. 1984. Zeo-agriculture: Use of natural zeolites in agriculture and aquaculture. Westview press.
- Roque-Jiménez, J.A., Pinos-Rodríguez, J.M., Rojo-Rub, R., Mendoza, G.D., Vazquez, A., De Jesus, J.A.C., y Lee-Rangel, H.A. 2018. Effect of natural zeolite on live weight changes, ruminal fermentation and nitrogen metabolism of ewe lambs. *South African Journal of Animal Science* 48.
- Rostami, R., y Jonidi Jafari, A. 2014. Application of an adsorptive-thermocatalytic process for BTX removal from polluted air flow. *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 12:1-10.
- Ruiz, O., Castillo, Y., Miranda, M.T., Elías, A., Arzola, C., Rodríguez, C., y La, O. 2007. Niveles de zeolita y sus efectos en indicadores de la fermentación ruminal en ovinos alimentados con heno de alfalfa y concentrado. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 41:253-57.
- Sadeghi, A., y Shawrang, P. 2006. The effect of natural zeolite on nutrient digestibility, carcass traits and performance of Holstein steers given a diet containing urea. *Animal Science* 82:163-67.
- Sallam, S.M., Abo-Zeid, H.M., Abaza, M.A., y El-Zaiat, H.M., 2022. Nutrient intake, digestibility, growth performance, and carcass of sheep fed urea-based diet supplemented with natural clinoptilolite. *Animal Science Journal* 93:e13689.

- Servatan, M., Zarrintaj, P., Mahmodi, G., Kim, S.-J., Ganjali, M.R., Saeb, M.R., y Mozafari, M. 2020. Zeolites in drug delivery: Progress, challenges and opportunities. *Drug Discovery Today* 25:642-56.
- Sherwood, D.M., Erickson, G.E., y Klopfenstein, T.J. 2005. Effect of clinoptilolite zeolite on cattle performance and nitrogen volatilization loss. *Nebraska Beef Cattle Reports*:177.
- Song, Z., Huang, Y., Xu, W.L., Wang, L., Bao, Y., Li, S., y Yu, M. 2015. Continuously adjustable, molecular-sieving "gate" on 5A zeolite for distinguishing small organic molecules by size. *Scientific reports* 5:1-7.
- Spears, J.W., 1996. Organic trace minerals in ruminant nutrition. *Animal feed science and technology* 58:151-63.
- Stojković, J., Ilić, Z.Z., Ćirić, S., Ristanović, B., Petrović, M.P., Caro Petrović, V., y Kurcubic, V.S. 2012. Efficiency of zeolite basis preparation in fattening lambs diet. *Biotechnology in Animal Husbandry* 28:545-52.
- Tánori-Lozano, A., Quintana-Romandía, A.I., Montalvo-Corral, M., Pinelli-Saavedra, A., Valenzuela-Melendres, M., Dávila-Ramírez, J.L., Islava-Lagarda, T.Y., y González-Ríos, H. 2022. Influence of ferulic acid and clinoptilolite supplementation on growth performance, carcass, meat quality, and fatty acid profile of finished lambs. *Journal of Animal Science and Technology* 64:274-90.
- Thiel, A., Tippkötter, N., Suck, K., Sohling, U., Ruf, F., y Ulber, R. 2013. New zeolite adsorbents for downstream processing of polyphenols from renewable resources. *Engineering in Life Sciences* 13:239-46.
- Tondar, M., Parsa, M.J., Yousefpour, Y., Sharifi, A.M., y Shetabi-Boushehri, S.V. 2014. Feasibility of clinoptilolite application as a microporous carrier for pH-controlled oral delivery of aspirin. *Acta Chimica Slovenica* 61:688-93.
- Toprak, N., Yılmaz, A., Öztürk, E., Yigit, O., y Cedden, F. 2016. Effect of micronized zeolite addition to lamb concentrate feeds on growth performance and some blood chemistry and metabolites. *South African Journal of Animal Science* 46:313-20.
- Urías-Estrada, J.D., López-Soto, M.A., Barreras, A., Aguilar-Hernández, J.A., González-Vizcarra, V.M., Estrada-Angulo, A., Zinn, R.A., Mendoza, G.D., y Plascencia, A. 2017. Influence of zeolite (clinoptilolite) supplementation on characteristics of digestion and ruminal fermentation of steers fed a steam-flaked corn-based finishing diet. *Animal Production Science* 58:1239-45.
- Valpotić, H., Gračner, D., Turk, R., Đuričić, D., Vince, S., Folnožić, I., Lojkić, M., Žura Žaja, I., Bedrica, L., et al. 2017. Zeolite clinoptilolite nanoporous feed additive for animals of veterinary importance: potentials and limitations. *Periodicum biologorum* 119:159-72.
- Valpotić, H., Terzic, S., Vince, S., Samardzija, M., Turk, R., Lackovic, G., Habrun, B., Djuricic, D., Sadikovic, M., et al. 2016. In-feed supplementation of clinoptilolite favourably modulates intestinal and systemic immunity and some production parameters in weaned pigs. *Veterinární medicína* 61:317-27.
- Weitkamp, J., y Puppe, L. 1999. *Catalysis and zeolites: fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media.
- White, J.L., y Ohlrogge, A.J. 1983. Ion exchange materials to increase consumption of non-protein nitrogen by ruminants. Google Patents.
- Wu, Q.J., Wang, L.C., Zhou, Y.M., Zhang, J.F., y Wang, T. 2013. Effects of clinoptilolite and modified clinoptilolite on the growth performance, intestinal microflora, and gut parameters of broilers. *Poultry Science* 92:684-92.
- Yuna, Z. 2016. Review of the natural, modified, and synthetic zeolites for heavy metals removal from wastewater. *Environmental Engineering Science* 33:443-54.
- Zayed, M.S., Szumacher-Strabel, M., El-Fattah, D.A.A., Madkour, M.A., Gogulski, M., Strompfová, V., Cieślak, A., y El-Bordeny, N.E. 2020. Evaluation of cellulolytic exogenous enzyme-containing microbial inoculants as feed additives for ruminant rations composed of low-quality roughage. *The Journal of Agricultural Science* 158:326-38.