

Reseña

Mecanismos de acción de enzimas fibrolíticas en la alimentación de rumiantes

Action Mechanisms of Fibrolytic Enzymes in Ruminant Nutrition

Madyu Matos Trujillo *,

Aymara Valdivia Ávila *,

Leanet Carbot Solis **

*Centro de Estudios Biotecnológicos, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba.

**Estación Experimental de la Caña de Azúcar, Jovellanos, Matanzas, Cuba.

* Autor para la correspondencia(email): madyu.matos@gmail.com

RESUMEN

Antecedentes: Los rumiantes utilizan pastos y forrajes para su alimentación, pero en ocasiones no tienen la calidad requerida por lo que se afecta su digestibilidad. Una de las estrategias para mejorar la calidad es el tratamiento con enzimas exógenas que descomponen las estructuras de la pared celular y permiten un mejor aprovechamiento de los nutrientes.

Objetivo. Profundizar en los mecanismos de acción de la aplicación de enzimas fibrolíticas exógenas en la alimentación de los rumiantes.

Desarrollo: La pared celular vegetal está compuesta por: celulosa, hemicelulosa y lignina. Las celulasas, hemicelulasas y enzimas lignocelulolíticas participan en su degradación y se utilizan satisfactoriamente a las dietas para mejorar su digestibilidad con efectos positivos en la producción de estas especies.

Conclusiones: Esta práctica favorece una mayor disponibilidad de los nutrientes para su digestión, absorción y contribuye a mejorar los procesos fisiológicos, y en muchas ocasiones, se evidencia a través de incrementos de la productividad ganadera.

Palabras clave: alimento animal, celulasas, mananasas, xilanasas (*Fuente: AGROVOC*)

ABSTRACT

Background: Ruminants consume pasture and forages, but occasionally they do not have the necessary capacity for this, affecting digestibility. One of the strategies to improve quality is the utilization of exogenous enzymes that break down the structure of the cell wall, and permit better nutrient intake.

Aim. To conduct a comprehensive study on the action mechanisms of exogenous fibrolytic enzymes in ruminant nutrition.

Development: Plant cell wall is made of cellulose, hemicellulose, and lignin. The cellulases, hemicellulases, and lignocellulolytic enzymes are engaged in their degradation, being used satisfactorily in the diet to enhance digestibility with positive effects on other species' production.

Conclusions: This practice favors greater nutrient availability for digestion and absorption, and it contributes to the improvement of physiological processes, and on many occasions, it is evidenced through livestock yield increases.

Key words: animal feed, cellulases, mannanases, xylanases (*Source: AGROVOC*)

Recibido: 12/10/2022

Aceptado: 23/10/2022

INTRODUCCIÓN

La crianza de rumiantes resulta una de las más importantes en el sector agropecuario. La carne y la leche se consideran productos de primera necesidad, por lo que su producción y comercialización se incrementa debido a la alta demanda para el consumo de la población mundial (García, 2020).

En los países tropicales la alimentación de los rumiantes se basa fundamentalmente en pastos y forrajes, sin embargo, la productividad y el valor nutritivo de las plantas, dependen de las condiciones climáticas existentes, la distribución anual de las lluvias y otros factores medio ambientales y de manejo (Roca-Cedeño *et al.*, 2020). En las regiones tropicales las altas temperaturas incrementan la lignificación de los tejidos vegetales y como consecuencia se reduce su digestibilidad (Mendoza *et al.*, 2014).

Una de las estrategias para mejorar la digestibilidad de los forrajes en las regiones tropicales es la adición de enzimas fibrolíticas exógenas (Miranda-Romero *et al.*, 2022). Los biocatalizadores actúan sobre los enlaces complejos que forman las paredes celulares de los forrajes y facilitan su degradación por los microorganismos del rumen (Kumar y Sridhar, 2021). El objetivo de la presente reseña fue profundizar en los mecanismos de acción de la aplicación de enzimas fibrolíticas exógenas en la alimentación de los rumiantes.

DESARROLLO

La alimentación de los rumiantes.

La alimentación es uno de los factores de mayor importancia para incrementar el potencial del ganado en las diferentes etapas de crecimiento. Para obtener mejores niveles en el peso vivo, se necesita una buena planificación de los recursos disponibles por lo que resulta imprescindible suministrar los nutrientes adecuados a los animales que satisfagan sus necesidades y mejoren su desarrollo productivo (Nunez *et al.*, 2020).

En los últimos años el precio de la fibra celulósica vegetal y los concentrados se incrementó drásticamente, lo que conlleva a que los productores busquen otras fuentes alternativas para la nutrición animal (Evan y Marcos, 2020). Una de las propuestas es la utilización de productos de desecho agroindustriales para la alimentación del ganado vacuno en el trópico (Escorza *et al.*, 2019; Godoy *et al.*, 2020)

Sin embargo, los residuos de cosechas poseen baja digestibilidad, bajo contenido energético, proteico, de minerales y vitaminas (Kumar y Sridhar, 2021). No obstante, si se garantiza una eficiente utilización de los mismos mediante la implementación de sistemas de alimentación adecuados, los desechos agroindustriales disponibles en la localidad se pueden aprovechar para el ganado (Piracon, 2020).

La digestión de la fibra se realiza en el rumen por las enzimas fibrolíticas producidas por los microorganismos anaeróbicos. Por tanto, el tratamiento de alimentos de baja calidad con enzimas exógenas permite revalorizar fuentes alternativas para la alimentación de estas especies (Kumar y Sridhar, 2021). Para una mejor comprensión del modo de acción de los biocatalizadores es necesario conocer la composición química de la pared vegetal.

La pared celular vegetal.

La pared celular vegetal está compuesta por: celulosa, hemicelulosa y lignina. En las plantas superiores, la celulosa aparece en forma de microfibrillas en las paredes primarias y secundarias, como resultado de la formación de enlaces de hidrógeno entre las cadenas. Es un polímero insoluble formado por residuos de glucosa unidos por enlaces glucosídicos $\beta(1,4)$ que se orientan en dominios cristalinos, paralelos altamente ordenados con regiones amorfas más desordenadas (Lee *et al.*, 1997).

La hemicelulosa constituye el segundo polisacárido estructural más abundante en las plantas, se encuentra asociado con la celulosa en la mayoría de las especies vegetales (Bhat y Hazlewood, 2001). Está compuesta principalmente por unidades de D-glucosa, D-galactosa, D-manosa, D-xilosa y L-arabinosa, unidas en diferentes combinaciones (Mendoza *et al.*, 2014).

La lignina presenta un fuerte entrecruzamiento químico con la fracción de carbohidratos de la pared celular mediante enlaces tipo éter que forman una extensa red y se considera recalcitrante para su degradación (Moore y Jung, 2001). Es un polímero insoluble, complejo y ramificado de unidades fenilpropano que refuerza las uniones de la celulosa y hemicelulosa (Tarasov *et al.*,

2018). Su estructura es variable y depende del tipo de planta, el estado fenológico y la tasa fotosintética (Ortiz, 2010).

La descomposición de la pared celular vegetal implica la participación sinérgica de varios biocatalizadores. Entre las más utilizadas se destacan las celulasas, hemicelulasas y las enzimas lignocelulolíticas (Bajaj y Mahajan, 2019).

Enzimas que participan en la degradación de la pared celular vegetal.

Celulasas

Las celulasas están formadas por un complejo de enzimas que cataliza la degradación de la celulosa y está formado por: β -(1,4) endocelulasas (E.C. 3.2.1.4), celobiohidrolasas (EC 3.2.1.91) y β -(1,4) glicosidasa (E.C. 3.2.1.21). Todas funcionan de manera sinérgica y secuencial, y como producto final se liberan monómeros de glucosa (Bhardwaj *et al.*, 2021).

Según el mecanismo propuesto para la degradación de la celulosa, las enzimas β -(1,4) endocelulasas catalizan la hidrólisis aleatoriamente los enlaces β -(1,4) glicosídicos internos de la región amorfa de la celulosa, se generan nuevos extremos que facilitan la acción de las celobiohidrolasas (CBH) y se liberan unidades de celobiosa desde los extremos terminales. Dentro de las CBH se distinguen las formas CBH I que actúan desde el extremo reductor de la cadena de celulosa y las CBH II que liberan celobiosa desde el extremo no reductor (Kumar y Verma, 2020). Una vez degradadas las zonas amorfas de la celulosa, ocurre la hidrólisis de la región cristalina por la acción sinérgica de las endo y exocelulasas. Las β -glucosidasas hidrolizan la celobiosa hasta la glucosa (Jørgensen *et al.*, 2007).

Hemicelulasas

Las hemicelulasas constituyen un grupo de enzimas que catalizan las reacciones de degradación de la hemicelulosa. Debido a la variabilidad de los sustratos que hidrolizan, se clasifican según el tipo de hemicelulosa o del enlace que rompen. Se distinguen xilanasas, β -mananasas, xilosidasas, arabinasas y galactosidasas (Iráizoz, 2011). Entre las más utilizadas en la alimentación animal se destacan las xilanasas, celulasas y las β -mananasas (Craig *et al.*, 2019; Saeed *et al.*, 2019).

- **Xilanasas**

Las xilanasas (EC 3.2.1.8) catalizan la hidrólisis al azar de los enlaces β -(1,4) glicosídicos del xilano para producir xilooligómeros (Malhotra y Chapadgaonkar, 2018). El xilano es el polímero más abundante de la hemicelulosa en las paredes celulares de las plantas. Constituye entre el 20 y 40% de la biomasa total, por lo que su degradación es fundamental para aprovechar los productos de los materiales lignocelulósicos como fuente de energía útil (Polizeli *et al.*, 2005). Esta enzima se utiliza para el tratamiento de dietas con elevado contenido de fibras insolubles destinadas a la alimentación de animales monogástricos (Matos *et al.*, 2018).

- **β -Mananasas**

Las enzimas involucradas en la hidrólisis de los polímeros lineales de manano son las β -mananasas (EC 3.2.1.78), β -manosidasas (EC 3.2.1.25) y β -glucosidasas (EC 3.2.1.21). Se requieren además, otras enzimas como las α -galactosidasas y las acetil-manano esterasas para eliminar los sustituyentes de la cadena lateral (Moreira y Filho, 2008).

La enzima más importante de este complejo es la β -mananasa, la que produce oligómeros cortos de β -(1,4) manano y luego se convierten en moléculas de manosa por acción de las β -manosidasas (Chauhan, Puri, Sharma, & Gupta, 2012). Estas proteínas catalizan la hidrólisis al azar de los enlaces β -(1,4)-D-mananosídicos de los mananos, galactomananos y glucomananos (Yamabhai *et al.*, 2016).

Enzimas lignocelulolíticas

Las enzimas lignocelulolíticas modifican la estructura de la lignina a través de mecanismos de oxidación-reducción. Forman parte del complejo las ligno peroxidasas, manganeso peroxidasas, peroxigenasa versátil y lacasas (Margida *et al.*, 2020). El uso de estos catalizadores en el pre tratamiento de la biomasa es fundamental para lograr el acceso a la matriz polisacáridica, paso fundamental en la degradación eficiente de la fibra.

Los enlaces covalentes de la molécula de lignina son fundamentalmente del tipo aril-éter, aril-aril y carbono-carbono, y no se hidrolizan por mecanismos típicos (Brink *et al.*, 2019). El mecanismo catalítico se basa en la generación de radicales libres intermedios con alta reactividad, capaces de aceptar o ceder un electrón y por ende generar la oxidación o la reducción de estos compuestos. Las enzimas lignocelulolíticas actúan sinérgicamente con el resto complejos enzimáticos (Tarasov *et al.*, 2018).

Modo de acción de las enzimas exógenas en los rumiantes.

El modo de acción de los biocalizadores que se utilizan en la nutrición de estas especies, es un tema muy complejo y de gran importancia en las investigaciones que actualmente se desarrollan. Según Velázquez-De Lucio *et al.* (2021), la acción de cada enzima es diferente e interdependiente, su aplicación en los concentrados debe realizarse de manera racional y cuidadosa para lograr el máximo efecto. Además, las enzimas actúan directa e indirectamente en los sustratos, por ejemplo, en el complejo lignocelulolítico, degradan la lignina como efecto principal, sin embargo permiten acceder también a los nutrientes que estaban unidos a esta estructura, fundamentalmente carbohidratos y proteínas como efecto secundario (Beauchemin *et al.*, 2004).

Los biocatalizadores pueden modificar la calidad del alimento antes del consumo a través de determinados estímulos durante la digestión ruminal y/o en el tracto digestivo post-ruminal. Aunque las condiciones de pH, temperatura y tipo de sustrato fuera del rumen no siempre favorecen la acción de las enzimas (Mcgrath *et al.*, 2018). En el rumen, actúan directamente en la digestión del alimento, o estimulan indirectamente la actividad digestiva a través de efectos sinérgicos con los microorganismos ruminales (López-Ordaz *et al.*, 2020). Del mismo modo, las enzimas pudieran permanecer activas en el tracto digestivo posterior, y contribuyen

indirectamente a la absorción de nutrientes debido a la disminución de la viscosidad de la digesta intestinal (Ojha *et al.*, 2019).

Por otra parte, las condiciones del sustrato afectan la acción de las enzimas, éstas son más efectivas en alimentos húmedos que en los secos por lo que la presencia del agua facilita su solubilidad y es esencial para reducir los polímeros a monómeros. Según informó Nsereko *et al.* (2000) la aplicación de preparaciones sólidas de enzimas no favorece la interacción preingestiva entre las enzimas y los alimentos.

La respuesta a la suplementación con enzimas fibrolíticas es variable (Bedford, 2018). Entre los factores que intervienen en la efectividad de estos aditivos se destaca el tipo de enzima, su estabilidad y especificidad de acción, los animales que se les aplica (especie, edad y morfofisiología del tracto gastrointestinal) y las características de las dietas (Valdivia *et al.*, 2019). Del mismo modo, el efecto puede afectarse por la dosis, la preparación del producto, el método de suministro y el mecanismo de acción enzimático (Tirado-González *et al.*, 2018).

Resultados de la aplicación de enzimas exógenas en los rumiantes.

Las enzimas fibrolíticas no se utilizaban en la alimentación de los rumiantes debido a la hipótesis de su posible hidrólisis inmediata por las proteasas del rumen. Además, se conocía que los microorganismos ruminales degradaban los sustratos fibrosos (Beauchemin *et al.*, 2004). Sin embargo, los estudios desarrollados posteriormente permitieron demostrar las ventajas de esta práctica en los animales poligástricos.

Las investigaciones desarrolladas en las últimas décadas destacaron que el tratamiento enzimático de los forrajes provocaba incrementos en la digestibilidad de la fibra en experimentos *in vitro* e *in vivo* (Iannaccone *et al.*, 2022). La mayoría de los autores coinciden que las enzimas exógenas mejoran la digestión de la fibra (Pech-Cervantes *et al.*, 2021), aun cuando representa solo el 15 % del total de la actividad en el rumen (Rosser *et al.*, 2022). Los efectos de enzimas fibrolíticas en la degradación de forraje son significativos, aunque, los cambios en la porción molar de estos compuestos pueden ser inconsistentes, debido a que dependen de la fuente fibrosa, las dosis suministradas y su impacto en la fermentación ruminal (Kumar y Sridhar, 2021).

En la literatura internacional se informa la utilización de diversos sistemas enzimáticos en la producción de rumiantes. Selzer *et al.* (2021) demostraron que la digestibilidad de la fibra detergente neutra (FDN) y la fibra detergente ácida (FDA) mejoró después del tratamiento con celulasas y xilanasas. De acuerdo con Da Costa *et al.* (2019) las xilanasas poseen particular importancia en la alimentación de los rumiantes porque elevan la resistencia contra infecciones y disminuyen el impacto ambiental al reducir la producción de metano por los animales. Asimismo las investigaciones realizadas por Santana *et al.* (2018) y Miranda-Romero *et al.* (2022) comprobaron que la digestibilidad de la porción fibrosa depende de la combinación de enzimas, la dosis y el tipo de sustrato que se utilice.

Otra de las ventajas del tratamiento enzimático es la mejora de la calidad de alimentos no convencionales (Jimoh, 2018). Autores como Abid *et al.* (2019) utilizaron xilanasas, exo y

endocelulasas para incrementar el valor nutritivo del orujo de uva mientras que Cornejo-Cornejo *et al.* (2020) emplearon las xilanasas para mejorar la digestibilidad *in vitro* de la cáscara de *Musa paradisiaca* L. De igual manera Alberto (2020) informó mejoras en la calidad nutritiva de paja de trigo y la digestibilidad del bagazo de caña de azúcar después del tratamiento con lacasas aisladas de hongos.

Las enzimas exógenas también tienen impacto positivo en la producción de leche. Por ejemplo, Refat *et al.* (2018) informó aumentos en la producción de leche y la digestibilidad de la materia seca en vacas alimentadas con ensilaje (34% de cebada) tratadas con enzimas fibrolíticas. De igual forma, Golder *et al.* (2019) notificó incrementos de la producción de leche en experimentos de campo como respuesta a la aplicación de enzimas en las vacas y lo relacionó con la elevada digestibilidad de los alimentos después del tratamiento.

Asimismo la producción lechera, la ganancia de peso diario y el consumo de alimentos en cabras mejoró con la inclusión del extracto enzimático de *Pleorutus ostreatus* en las dietas (Trejo *et al.*, 2017). Mendoza *et al.*, (2014) destacaron que el aumento de la producción de leche y carne después del tratamiento con enzimas exógenas se debe a una mejor digestibilidad de la FDN y la FDA.

Por su parte, Bortoluzzi *et al.* (2019) y Qiao *et al.* (2018), demostraron que el tratamiento con β -manananas promovió la producción de neutrófilos, leucocitos y macrófagos que intervienen en la reducción del conteo de células somáticas en la leche y es un indicador potencial de la presencia de mastitis (López-Ordaz *et al.*, 2020). Esta enfermedad, que provoca la inflamación de la glándula mamaria, frecuentemente tiene causas infecciosas y ocasiona cuantiosas pérdidas económicas a la industria láctea (Benicé *et al.*, 2018).

La adición de β -mananasa en vacas Holstein-Friesen de lactancia avanzada, redujo el consumo de materia seca en 1,8 kg por vaca en comparación con el control (Tewoldebrhan *et al.*, 2017). La reducción en el consumo se atribuyó a una mayor digestibilidad aparente de la materia seca, la materia orgánica y la proteína. También Kebreab, (2016) informaron que la adición de β -manananas a la dieta (0,10%) incrementó la eficiencia de conversión del nitrógeno, la proteína de la leche, la ganancia de peso y la higiene de las ubres en vacas en lactación, sin afectar las excreciones de metano y el nitrógeno fecal.

Según López-Ordaz *et al.* (2020), la mejora de la salud por la suplementación enzimática se debe a que los requerimientos de nitrógeno en los animales se cubren con el consumo de la materia seca y la proteína de la dieta. De esta forma se evitan gastos energéticos por la excreción del exceso de nitrógeno y repercute en beneficios ambientales y económicos.

De forma general, el efecto de las enzimas exógenas en la degradabilidad de la materia seca, la hidrólisis de la fibra, la producción de gases y el rendimiento de la leche dependen en gran medida de la especie, la proporción del forraje, su calidad y el número de ingredientes incluidos en la dieta (Tirado-González *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

Esta práctica favorece una mayor disponibilidad de los nutrientes para su digestión, absorción y contribuye a mejorar los procesos fisiológicos, y en muchas ocasiones, se evidencia a través de incrementos de la productividad ganadera.

REFERENCIAS

- Abid, K., Jabri, J., Beckers, Y., Yaich, H., Malek, A., Rekhis, J., & Kamoun, M. (2019). Effects of exogenous fibrolytic enzymes on the ruminal fermentation of agro-industrial by-products. *South African Journal of Animal Sciences*, 49(4), 612-618. <https://doi.org/10.4314/sajas.v49i4.2>
- Alberto, M. (2020). *Obtención, caracterización y evaluación de lacasas fúngicas en la degradación de sustratos fibrosos para la alimentación animal. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias*. Universidad Agraria de la Habana.
- Bajaj, P., & Mahajan, R. (2019). Cellulase and xylanase synergism in industrial biotechnology. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 103, 8711-8724. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10146-0>
- Beauchemin, K. A., Colombatto, D., Morgavi, D. P., Yang, W. Z., & Rode, L. M. (2004). Mode of action of exogenous cell wall degrading enzymes for ruminants. *Can. J. Anim. Sci.*, 84, 13–22. <https://doi.org/abs/10.4141/A02-102>
- Bedford, M. (2018). The evolution and application of enzymes in the animal feed industry : the role of data interpretation data interpretation. *British Poultry Science*, 59(5), 486-493. <https://doi.org/10.1080/00071668.2018.1484074>
- Benić, M., Maćešić, N., Cvetnić, L., Habrun, B., Cvetnić, Ž., Turk, R., & Samardžija, M. (2018). Bovine mastitis: a persistent and evolving problema requiring novel approach efforts control - a review. *Veterinarski Archiv.*, 88(4), 535-557. <https://doi.org/doi.org/10.24099/vet.arhiv.0116>
- Bhardwaj, N., Kumar, B., Agrawal, K., & Verma, P. (2021). Current perspective on production and applications of microbial cellulases : a review. *Bioresources and Bioprocessing*, 8(95), 2-34. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00447-6>
- Bhat, M. K., & Hazlewood, G. P. (2001). Enzymology and other characteristics of cellulases and xylanases. En M. R. Bedford & G. G. Partridge (Eds.), *Enzymes in farm animal nutrition* (pp. 11-49). Oxon, UK: CABI Publishing.
- Bortoluzzi, C., Scapini, L. B., Ribeiro, M. V., Pivetta, M. R., Buzim, R., & Fernandes, J. I. . (2019). Effects of β -mannanase supplementation on the intestinal microbiota composition

- of broiler chickens challenged with a coccidiosis vaccine. *Livestock Science*, 228, 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.09.001>
- Brink, D. P., Ravi, K., & Lidén, G. (2019). Mapping the diversity of microbial lignin catabolism: experiences from the eLignin database. *Appl Microbiol Biotechnol*, 103, 3979pp. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09692-4>.
- Chauhan, P. S., Puri, N., Sharma, P., & Gupta, N. (2012). Mannanases: Microbial sources, production, properties and potential biotechnological applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 93(5), 1817-1830. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-3887-5>
- Cornejo-Cornejo, R., Azúm-González, J. L., Gorozabel-Muñoz, W., Vargas, P., Mendoza_Rivadeira, F., & Macias-Barberan, R. (2020). Valor nutritivo in vitro de la cáscara Musa paradisiaca L., pre-tratada con enzima exógena xilanasa. *Pastos y Forrajes*, 43(1), 11-17.
- Craig, A. D., Bedford, M. R., Hastie, P., Khattak, F., & Olukosi, O. A. (2019). The effect of carbohydrases or prebiotic oligosaccharides on growth performance, nutrient utilisation and development of small intestine and immune organs in broilers fed nutrient-adequate diets based on either wheat or barley. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(7), 3246-3254. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9537>
- Da Costa, A. C., Cavalheiro, G. F., De Queiroz Vieira, E. R., Gandra, J. R., de Tonissi e Buschinelli de Goes, R. H., da Paz, M. F., ...& Leite, R. S. R. (2019). Catalytic properties of xylanases produced by *Trichoderma piluliferum* and *Trichoderma viride* and their application as additives in bovine feeding. *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, 19, 101-161. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101161>
- Dhawan, S., & Kaur, J. (2007). Microbial Mannanases: An Overview of Production and Applications. *Crit. Rev. Biotechnol.*, 27, 197-216. <https://doi.org/10.1080/07388550701775919>
- Escorza, M., Gibran, A., García, E., Ayala, M., BA, Z., & Soto, S. (2019). Comportamiento productivo y calidad de la carne de conejos que consumieron desperdicio de galleta. *Abanico Veterinario*, 9(1), 2-4. <https://doi.org/10.21929/abavet2019.910>
- Evan, T. De, & Marcos, C. N. (2020). In Vitro and In Situ Evaluation of Broccoli Wastes as Potential Feed for Ruminants. *Animals*, 10(1989), 1-14.
- García, V. (2020). *Evaluación de la actividad enzimática de cepas de Trichoderma para el desarrollo de enzimas exógenas para rumiantes. Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias.* Universidad Autónoma Metropolitana.
- Godoy, D. J., Daza, R., Fernández, L. M., Laiza, A. E., Roque, R. E., Hidalgo, V., ...& Gómez, C. . (2020). Caracterización del valor nutricional de los residuos agroindustriales para la alimentación de ganado vacuno en la región de San Martín, Perú. *Cienc. Tecnol. Agropecuaria*, 21(2), e1374. <https://doi.org/10.21930>

- Golder, H. M., Rossow, H. A., & Lean, I. J. (2019). Effects of in-feed enzymes on milk production and components, reproduction, and health in dairy cows. *J. Dairy Sci.*, *102*, 8011–8026. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16601>
- Iannaccone, F., Alborino, V., Dini, I., Balestrieri, A., Marra, R., Davino, R., ...& Vinale, F. (2022). In Vitro Application of Exogenous Fibrolytic Enzymes from *Trichoderma* spp. to Improve Feed Utilization by Ruminants. *Agriculture (Switzerland)*, *12*(5), 573. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE12050573>
- Iráizoz, P. A. (2011). *Estudio y formulación de nuevos cócteles enzimáticos para la mejora de la producción de etanol a partir de paja de trigo. Tesis presentada para optar por el título de Doctor en ciencias.* Universidad Complutense de Madrid, España.
- Jimoh, A. (2018). Effects of enzyme cocktails on in vitro digestibility of palm kernel cake. *Journal of Central European Agriculture*, *19*(1), 114-125.
- Jørgensen, H., Kristensen, J. B., & Felby, C. (2007). Enzymatic conversion of lignocellulose into fermentable sugars: challenges and opportunities. *Biofuels. Bioprod. Biorefin.*, 119-134. <https://doi.org/10.1002/bbb.4>
- Kebreab, E. (2016). Supplementation of β -mannanase (ctzyme) to lactating dairy cattle diets improves feed conversion efficiency and somatic cell count. *Animal Science*, *94*(5), 658–659. <https://doi.org/10.2527/jam2016-1362>
- Kumar, B., & Verma, P. (2020). Enzyme mediated multi-product process: a concept of bio-based refinery. *Ind Crops Prod*, *154*, 112607. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112607>
- Kumar, V. P., & Sridhar, M. (2021). Study on Production of Microbial Lignolytic Enzymes for Deconstruction of Lignocellulosic Biomass for Feeding Ruminants : Current Trends and Future Study on Production of Microbial Lignolytic Enzymes for Deconstruction of Lignocellulosic Biomass for Feedi. En *Research Aspects in Agriculture and Veterinary Science* (Vol. 3). <https://doi.org/10.9734/bpi/raavs/v3/4417F>
- Lee, J., Hong, J., & Lim, H. (1997). Experimental optimization of fed – batch culture for poly- γ -hydroxybutyrate acid production. *Biotechnol. Bioeng.*, *56*, 697–705. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19971220\)56:6<697::AID-BIT13>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19971220)56:6<697::AID-BIT13>3.0.CO;2-5)
- López-Ordaz, R., Sánchez-López, F., Sanchez del Real, C., Alejandro Lara-Bueno, López-Ordaz, R., & Ruiz-Flores, A. (2020). Efecto de la adición de mananasasa sobre el consumo de alimentos, producción, composición y contenido de células somáticas en leche de vacas Holstein- Friesian. *Ciencias Naturales e Ingenierias*. <https://doi.org/10.21640/ns.v12i25.2334>
- Malhotra, G., & Chapadgaonkar, S. (2018). Production and applications of xylanases : an overview. *Journal of Biotechnology, Computational Biology and Bionanotechnology*, *99*(1), 59-72. <https://doi.org/10.5114/bta.2018.73562>

Matos Trujillo, M., Valdivia Ávila, A., Carbot Solis, L.

- Margida, M. G., Lashermes, G., & Moorhead, D. L. (2020). Estimating relative cellulolytic and ligninolytic enzyme activities as functions of lignin and cellulose content in decomposing plant litter. *Soil Biology and Biochemistry*, *141*, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107689>
- Matos, M. M., Valdivia, A., Rodríguez, Z., Boucourt, M. A. B., Portilla, Y., & Ramírez, Yasmery Rubio, .Hector L. (2018). Production of xylanases by *Bacillus subtilis* E44 under submerged fermentation conditions Producción de xilanasas por *Bacillus subtilis* E44 en condiciones de fermentación sumergida. *Cuban Journal of Agricultural Science*, *52*(3), 1-8. <https://doi.org/193060480010>
- Mcgrath, J., Duval, S. M., Tamassia, L. F. M., Kindermann, M., Stemmler, R. T., Gouvea, V. N. De, ...& Celi, P. (2018). Research in Veterinary Science Nutritional strategies in ruminants: A lifetime approach. *Research in Veterinary Science*, *116*(2018), 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2017.09.011>
- Mendoza, G. D., Loera-Corral, O., Plata-Pérez, F. X., Hernández-García, P. A., & Ramírez-Mella, M. (2014). Considerations on the Use of exogenous fibrolytic enzymes to improve forage utilization. *Scientific World Journal*, *2014*. <https://doi.org/10.1155/2014/247437>
- Miranda-Romero, L. A., Ch, G., Zepeda-batista, J. L., & Arturo, C. (2022). Improvement of Ruminant Neutral Detergent Fiber Degradability by Obtaining and Using Exogenous Fibrolytic Enzymes from White-Rot Fungi. *Animals*, *12*, 843. <https://doi.org/10.3390/ani12070843>
- Moore, K. J., & Jung, H. J. (2001). Lignin and fiber digestion. *Journal of Range Management*, *54*(4), 420-430. https://doi.org/10.2458/azu_jrm_v54i4_moore
- Moreira, L. R. S., & Filho, E. X. F. (2008). An overview of mannan structure and mannan-degrading enzyme systems. *Appl Microbiol Biotechnol*, *1*, 165-178. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1423-4>
- Nsereko, V. L., Morgavi, D. P., Rode, L. M., Beauchemin, K. A., & McAllister, T. A. (2000). Effects of fungal enzyme preparations on hydrolysis and subsequent degradation of alfalfa hay fiber by mixed rumen microorganisms in vitro. *Animal Feed Science and Technology*, *88*(3-4), 153–170. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(00\)00225-X](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(00)00225-X)
- Nunez, A., Barcenas, Y., Mejías, A., & Marrero, Y. (2020). Computer System for the Formulation of Food Rations in the Buffalo Breed Using Mathematical Models. *Rev Cie Téc Agr [online]*, *29*(4), e10. https://doi.org/scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542020000400010&lng=es&nrm=iso
- Ojha, B. K., Singh, P. K., & Shrivastava, N. (2019). Enzymes in the Animal Feed Industry. En K. Mohammed (Ed.), *Enzymes in Food Biotechnology* (pp. 93-109). Cambridge, MA: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813280-7.00007-4>

- Ortiz, M. L. (2010). Evaluación preliminar de la abundancia de hongos lignolíticos cultivables y su actividad peroxidasa, obtenidos a partir de suelos con diferentes usos agrícolas en zona rural de Villavicencio. *Orinoquia*, 14(1), 171-177. <https://doi.org/articulo.oa?id=89622691014>
- Pech-Cervantes, A. A., Pech-Cervantes, A. A., Ogunade, I. M., Jiang, Y., Estrada-Reyes, Z. M., Arriola, K. G., ...& Adesogan, A. T. (2021). Effects of a xylanase-rich enzyme on intake, milk production, and digestibility of dairy cows fed a diet containing a high proportion of bermudagrass silage. *J. Dairy Sci.*, 104, 7671–7681. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19340>
- Piracon, N. P. (2020). *Subproductos de Piña (Ananas Comosus) como alternativa de alimentación en rumiantes .Monografía para obtener el grado de especialización.* Universidad Nacional Abierta Y A Distancia - UNAD . <https://doi.org/https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/38081/nppiraconc.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Polizeli, M. L. T. M., Rizzatti, A. C. S., Monti, R., Terenzi, H. F., Jorge, J. A., & Amorim, D. S. (2005). Xylanases from fungi: properties and industrial applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 67(5), 577-591. <https://doi.org/10.1007/s00253-005-1904-7>
- Qiao, Y. (2018). Dietary B-mannanase supplementation improved growth and health of nursery pigs fed high soybean meal diet. *Journal of Animal Science*, 96(3), 304-305. <https://doi.org/10.1093/jas/sky404.670>
- Refat, B., Christensen, D. A., McKinnon, J. J., Yang, W., Beattie, A. D., McAllister, T. A., ...& Yu, P. (2018). Effect of fibrolytic enzymes on lactational performance, feeding behavior, and digestibility in high-producing dairy cows fed a barley silage-based diet. *Journal of Dairy Science*, 101(9), 7971-7979. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14203>
- Roca-Cedeño, J., Vera-Cedeño, J. C., Rivera-Legton, C. A., & Brito-Donoso, F. J. (2020). La nutrición de rumiantes en la zona norte de Manabí en la formación de estudiantes de Ingeniería Agropecuaria y Medicina Veterinaria. *Maestro y Educación*, 17(3), 571-582. <https://doi.org/https://maestrosociedad.uo.edu.cu/index.php/MyS/article/view/5225>
- Rosser, C., Terry, S. A., Badhan, A., McAllister, T. A., & Beauchemin, K. A. (2022). Current Knowledge and Future Opportunities for Ruminant Enzymes. *CABI Books*, (march). <https://doi.org/10.1079/9781789241563.0009>
- Saeed, M., Ayaşan, T., Alagawany M, El-Hack, M., Abdel-Latif, M., Patra, S. M., & Patra, A. (2019). The Role of β -Mannanase (Hemicell) in Improving Poultry Productivity, Health and Environment. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 21(3), 2019. <https://doi.org/10.1590/1806-9061-2019-1001>
- Santana, Y. A. G., Vasconcelos, V. R., Alves, A. A., Silva, S. C. D. M. L., & Garcez, B. S.

- (2018). Fermentation characteristics in hay from *Cynodon* and crop stubble treated with exogenous enzymes. *Rev. Ciênc. Agron.*, 49(1), 167-173. <https://doi.org/0.5935/1806-6690.20180019>
- Selzer, K., Hassen, A., Akanmu, A. M., & Salem, A. Z. . (2021). Digestibility and rumen fermentation of a high forage diet pre-treated with a mixture of cellulase and xylanase enzymes. *South*, 51(3). <https://doi.org/10.4314/sajas.v513.14>
- Tarasov, D., Leitch, M., & Fatehi, P. (2018). Lignin-carbohydrate complexes: Properties, applications, analyses, and methods of extraction: A review. *Biofuels Biotechnol.*, 11, 269. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1262-1>
- Tewoldebrhan, T. A., Appuhamy, J., Lee, J. J., Niu, M., Seo, S., Jeong, S., & Kebreab, E. (2017). Exogenous beta-mannanase improves feed conversion efficiency and reduces somatic cell count in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 100(1), 244-252. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11017>
- Tirado-González, D. N., Tirado-Estrada, G., Miranda-Romero, L. A., Ramírez-Valverde, R., & Medina-Cuéllar, SergioErnesto Salem, A. Z. . (2021). Effects of Addition of Exogenous Fibrolytic Enzymes on Digestibility and Milk and Meat Production – A Systematic Review. *Annals of Animal Science*, 2(4), 1159-1192. <https://doi.org/10.1080/09712119.2017.1399135>
- Trejo, L. T., Zepeda, B. A., Franco, F. J., Soto, S. S., Ojeda, R. D., & Ayala, M. M. (2017). Uso de extracto enzimático de *Pleurotus ostreatus* sobre los parámetros productivos de cabras. *Abanico Vet.*, 7, 14–21. <https://doi.org/10.21929/abavet2017.72.1>
- Velázquez-De Lucio, B. S., Hernández-Domínguez, E. M., Villa-García, M., Díaz-Godínez, G., Mandujano-Gonzalez, V., Mendoza-Mendoza, B., & Álvarez-Cervantes, J. (2021). Exogenous enzymes as zootechnical additives in animal feed: A review. *Catalysts*, 11(7), 1-21. <https://doi.org/10.3390/catal11070851>
- Yamabhai, M., Sak-ubol, S., Srila, W., Haltrich, D., Yamabhai, M., Sak-ubol, S., ...& Haltrich, D. (2016). Mannan biotechnology: from biofuels to health. *Critical reviews in biotechnology*, 36(1), 32-42. <https://doi.org/10.3109/07388551.2014.923372>

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Concepción y diseño de la investigación: MMT, AVA, LCS; análisis e interpretación de los datos: MMT, AVA, LCS; redacción del artículo: MMT, AVA, LCS.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflicto de intereses.