

7. Contenido de almidón y degradación de la materia seca en ensilado de maíz tratado con xilanas, celulasa y miel de maguey



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.299.07>

JOSÉ RAMÓN PASCUAL FRANCO MARTÍNEZ*§

ANDRÉS GONZÁLEZ HUERTA**

GASPAR ESTRADA CAMPUZANO***

RODOLFO SERRATO CUEVAS****

MANUEL GONZÁLEZ RONQUILLO*****

DORA MARÍA SANGERMAN JARQUÍN*****

Resumen

Con la finalidad de eficientar la nutrición animal, tanto de ganado productor de leche como de carne, se hace necesario conocer diversos valores de carbohidratos solubles y fibrosos, que permitan hacer el cálculo de raciones con mayor eficacia. El objetivo del este estudio fue aportar la composición de carbohidratos (CC) y la degradación de la materia seca de cuatro genotipos de maíz ensilado, tratados con las enzimas xilanas (XIL) y celulasa (CEL), y miel de maguey (MM) como aditivo natural. De las enzimas y del aditivo natural se evaluó la aplicación de 1 ml kg⁻¹ de materia verde (MV) aplicado en los ensilados de las variedades de maíz San Diego (grano amarillo) y Cacahuacintle (grano blanco), y en los híbridos P-1832 (grano amarillo) y Victoria (grano blanco).

§ Autor para correspondencia: jrfrancom@uaemex.mx

* Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2139-6203>

** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6055-7597>

*** Doctor en Ciencias Agropecuarias por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1189-0470>

**** Doctor en Ciencias Ambientales. Profesor de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-4542>

***** Doctor en Veterinaria por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3316-4157>

***** Doctora en Ciencias. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9658-1182>

En la evaluación de la CC se consideró la materia seca (MS), fibra detergente neutro (FDN), almidón (ALM), pH y cenizas (CEN); y en la degradación de la materia seca, evaluada a través de la producción de gas (PG) a 96 h de incubación, se midieron las variables producción de gas (a), tasa de fermentación (b) y el tiempo de retardo de la incubación (c). El experimento se organizó mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial 4×4 . El contenido de almidón fue mayor para la variedad de grano amarillo San Diego y para las enzimas xilanasa y celulasa. La adición de XIL, CEL y MM promueven la degradación e incrementan su disponibilidad energética, con una mayor producción de gas *in vitro*.

Palabras clave: *composición química de maíz, almidón en forraje de maíz, degradación de ensilado de maíz.*

Introducción

El ensilaje es una forma de conservar el forraje húmedo mediante la fermentación adecuada, procurando mantener su calidad nutritiva por un largo periodo de tiempo. El forraje de maíz se utiliza en la alimentación animal, por su alto contenido de materia verde que va desde 57 a 114 t ha⁻¹ (Franco et al., 2015); su forraje es muy utilizado y apreciado en la producción animal por su valor energético (Bates, 1998); en este sentido el ALM proporciona una gran cantidad de energía de fácil digestión y en el ensilaje de maíz, este carbohidrato, alcanza valores tan altos como 35% (Meléndez, 2015); el cual es fijado por la fotosíntesis y, su degradación nocturna garantiza la disponibilidad de la materia y energía para la síntesis de sacarosa que se distribuye a toda la planta (Patricia-Coello y Martínez-Barajas, 2022). Este forraje se utiliza en la crianza de todo tipo de rumiantes, pero tiene especial importancia para el ganado lechero, debido a que la producción de leche es altamente dependiente de la cantidad de energía que consume la vaca lactante (Staples, 2003), en esta línea, el uso de ALM en los suplementos alimenticios para incrementar la densidad energética de la ración y proporcionar el carbono para suplir los requerimientos de glucosa y de carbohidratos no estructurales (CNE) es una práctica común en la alimentación de

vacas lecheras de alta producción (Huntington et al., 2006). Pero también su forraje presenta algunas características poco deseables, como su bajo valor nutritivo dado su bajo contenido de proteína (63 a 95 g kg⁻¹) y alta concentración de fibra (447 a 633 g kg⁻¹ FDN) (Vallejo et al., 2016).

Varios estudios se han centrado sobre la degradación de los alimentos fibrosos en rumiantes usando aditivos como ionoforos, microbios y enzima degradantes de la pared celular o enzimas exógenas degradantes de fibra que estimulan la actividad de microorganismos del rumen digestivo (Giraldo et al., 2004), específicamente con la adición de enzimas fibrolíticas exógenas (EFE) como CEL o XIL se aumenta la degradación y fermentación del forraje de maíz (Valdés et al., 2015).

En México existe una creciente demanda de buen forraje de maíz, dado el crecimiento de la ganadería productora de carne y especialmente la de leche, pero su calidad sigue siendo un problema debido a su baja proteína y digestión de su pared celular; situación que poco ha sido atendida, ya que el mejoramiento genético que se continua realizando en la Meseta Central de México se ha enfocado principalmente a la obtención de cultivares de mayor producción de grano, pero se han descuidado sus atributos de calidad y propiedades forrajeras. De acuerdo con lo anterior, el objetivo del estudio fue conocer la composición de carbohidratos y la degradación de la materia seca de dos variedades y dos híbridos de maíz ensilado, tratadas con las enzimas xilanas y celulasa y miel de maguey. Bajo el supuesto de que existe diferencia en el contenido de almidón y otros carbohidratos y la degradación de la materia seca entre ensilados de maíz de grano amarillo y grano blanco, tratados con aditivos.

Materiales y métodos

Material

Se evaluaron cuatro variedades de maíz, de las cuales dos fueron variedades criollas, Cacahuacintle Tlacotepec (grano blanco) y San Diego (grano amarillo) y dos Híbridos P-1832 (grano amarillo) y Victoria (grano blanco), cuyas características de producción, procedencia, tipo, siembra, etc., se

encuentran descritas por Franco et al. (2015). El corte de las plantas se efectuó cuando los granos del elote alcanzaron un estado masoso-compacto, siendo a los 155, 149, 176 y 168 días posteriores a la siembra, respectivamente. Las plantas completas de las parcelas experimentales de cada variedad fueron cortadas y después trozadas en un molino Wiley (DPM Junior, Noriega Máquinas Agrícolas), para obtener un tamaño de partículas de 1.5 a 4.0 cm; posteriormente para formar los microsilos se pesaron por cuadruplicado 10 kg de material fresco de cada variedad y se adicionaron 10 ml de cada aditivo, por lo que se usó 1 ml por cada kilogramo de ensilado. Las enzimas usadas fueron XIL (producto constituido por 34 000 a 41 000 unidades de xilanasas g^{-1} , de 12 000 a 15 000 unidades de β -glucanasas g^{-1} y 45 000 a 55 000 unidades de celulasas g^{-1}), CEL (constituido por 30 000 a 36 000 unidades de celulasas g^{-1} y 7 500 a 10 000 unidades de β -glucanasas g^{-1}) y MM (con 8.62% de azúcares, 0.3% de aminoácidos, 3.0% de proteína y 3.0% de minerales); después fueron llenados tres cilindros de PVC de 15 \times 30 cm, con cada una de las variedades de maíz y sus respectivos tratamientos, compactando el forraje de cada cilindro con una prensa metálica y finalmente sellarlos con plástico negro. Los microsilos fueron apilados dentro de un lugar fresco y cubierto durante 6 meses a temperatura ambiente.

Composición de carbohidratos

Muestras de forraje para el análisis químico posterior a la conservación se obtuvieron de los ensilados formados. Se tomaron al menos 6 submuestras de cada bolsa y se agruparon para producir una muestra por cada bolsa. Las muestras para el análisis químico se mantuvieron a una temperatura de -15°C . Las muestras agrupadas se secaron y se molieron hasta obtener un tamaño de 1 mm, usando un molino Mine-Mill Cutting Mod (5KH-39QN5525); después fueron analizadas por duplicado siguiendo el procedimiento de la Asociación de Químicos Agrícolas Oficiales (AOAC, por sus siglas en inglés, 1997). El pH se midió inmediatamente después de abrir cada uno de los silos; la materia seca (MS) se determinó mediante secado en horno a 105°C hasta peso constante (ref. 934.01); las cenizas totales por horno de mufla (ref. 942.05). El contenido de fibra detergente neutro (FDN)

se obtuvo según Van Soest et al. (1991), utilizando un analizador de fibra ANKOM 200 (ANKOM Technology) y su valor fue expresado sin cenizas. El almidón fue determinado de acuerdo con el procedimiento del Animal Nutrition and Environmental Modeling Applications Laboratory (ANEMAL) (Álvarez, 2009).

Producción de gas *in vitro*

Durante el día de inicio de la incubación, se utilizaron dos vacas Holstein (450 kg LW), fistulada de rumen y con una dieta alimenticia continua a base de alfalfa, concentrado comercial y agua a libre acceso; el líquido ruminal fue extraído a las 08:00 h, antes de alimentar a las vacas, y fue transportado en un termo al laboratorio donde fue filtrado usando triple capa de gasa, manteniéndolo a una temperatura de 39°C y gaseado con CO². Manteniendo en agitación las soluciones (Menke y Steingas, 1988) (buffer, macronutrientes, micronutrientes, resarzurina, reductora y agua destilada), a una temperatura de 39°C, se les agrego el 10% de líquido ruminal y se continuó mezclándolas. Se pesaron 950 mg de MS de cada uno de los tratamientos y depositados en 48 frascos ámbar de 120 ml (considerando los 16 tratamientos por triplicado), añadiéndoles 90 ml de la solución preparada, cerrándolos y una vez agitados fueron colocados dentro de un baño de agua con temperatura controlada a 39°C. Posteriormente se determinó la presión (PSI) mediante el uso de un transductor de presión Delta OHM (HD2124.1), y se realizó la medición de producción de gas a las 3, 6, 12, 24, 48 y 96 horas de incubación, Para su corrección se utilizaron cuatro frascos sin sustrato como blancos; además, de cuatro frascos con heno de cebada como estándar (Theodorou et al., 1994).

En cuanto a los cálculos, los parámetros cinéticos de PG se estimaron a través de un procedimiento interactivo de análisis de regresión no lineal (PROC NLIN) (Sistema de Análisis Estadístico [SAS, por sus siglas en inglés], 2002), de acuerdo con Krishnamoorthy et al. (1991), calculado como:

$$PG = b (1 - e^{-C(t-l)})$$

Donde PG es el volumen de PG en el tiempo t ; b es la PG asintótica (ml/g MS); c es la velocidad de PG (g/h), l (h) es el tiempo de retraso discreto antes de la PG.

Análisis estadístico

El experimento tuvo un diseño completamente aleatorizado con arreglo factorial 4×4 (Steel et al., 1997), en donde los tratamientos fueron los genotipos de maíz (G) ($n=4$) y los aditivos (control, enzimas y miel de maguey) (A) ($n=4$), con tres repeticiones. Los datos se analizaron con mediciones repetidas en el tiempo, usando procedimiento estadístico (SAS, 2002). El modelo estadístico fue:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + A_j + (G \times A)_{ij} + E_{ijk} \quad (7)$$

Donde Y_{ijk} es la variable respuesta de los ensilados tratados con la XII, CEL y MM; μ es la media general; G_i es el efecto del i -ésimo genotipo ($i=1-4$); A_j es el efecto del j -ésimo aditivo ($j=1-4$); $(G \times A)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre el i -ésimo genotipo y el j -ésimo aditivo; E_{ijk} es el error experimental del i -ésimo genotipo, j -ésimo aditivo y k -ésima repetición. Las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($p<0.05$).

Resultados

Composición de carbohidratos

En el factor genotipos la MS, FDN, ALM y pH, tuvieron efecto significativo ($p<0.05$), a excepción del porcentaje de CEN que tuvo igualdad estadística ($p>0.05$). El factor aditivos tuvo efecto significativo ($p<0.05$) en las variables ALM, MS, CEN y pH, encontrando efecto no significativo ($p>0.05$) en el contenido de FDN. En la interacción de los factores genotipos por aditivos, se observó diferencia altamente significativa ($p<0.01$) en las variables ALM, CEN y pH, con excepción de la MS y FDN que fueron no significativas. Es de considerar que la información analizada fue confiable, ya que el coeficiente de variación para las variables medidas fluctuó de 1.32 a 13.36% (tabla 7.1).

El contenido de AI fue evidentemente superior ($p<0.05$) para la variedad San Diego, seguida del híbrido P-1832, ambos de grano amarillo; en cuanto a los aditivos el mayor porcentaje de ALM fue para la XII y CEL,

Tabla 7.1. Cuadrados medios y significancia estadística de los valores de F para composición de carbohidratos y producción de gas de cuatro genotipos de maíz ensilado tratados con miel de maguey, celulasa, xilanasa y control

FV	GL	MS	FDN	ALM	CEN	pH	Producción	Tasa de fermentación	Tiempo de incubación
Genotipos (G)	3	70.71**	206.63*	155.68**	2.37 ^{NS}	8.94**	2505.25**	0.000258**	8.69**
Aditivos (A)	3	32.30*	106.63 ^{NS}	182.13**	13.44**	5.00**	3103.47**	0.000101**	3.83**
Interacción G×A	9	7.45 ^{NS}	63.56 ^{NS}	165.34**	10.15**	1.98**	508.93**	0.000050**	0.82**
Error	30	5.76	51.57	0.018	1.22	0.15	49.02	0.000003	0.05
C. V. (%)		11.80	14.05	1.32	7.54	7.54	3.24	5.34	14.40

Nota: ** Diferencia altamente significativa ($p < 0.01$); * diferencia significativa ($p < 0.05$); NS no significativo ($p > 0.05$); C.V. coeficiente de variación; FV: Fuente de Variación; GL: Grados de Libertad; MT: Materia Seca; FDN: Fibra Detergente Neutro; ALM: Almidón; CEN: Cenizas.

Fuente: Propia formulada a partir de la información obtenida.

Tabla 7.2. Composición química de carbohidratos de cuatro genotipos de maíz ensilado tratados con aditivos de miel de maguey, celulasa, xilanasa y control

Factores	Materia seca (%)	Fibra detergente neutro (%)	Almidón (%)	Cenizas (%)	pH
Genotipos					
San Diego (grano amarillo)	22.92a	48.72a	15.24a	7.91a	4.31c
Cacahuacintle (grano blanco)	21.06a	46.49b	09.55c	8.62a	5.09b
P-1832 (grano amarillo)	20.27a	54.84a	10.14b	7.86a	4.95b
Victoria (grano blanco)	17.10b	54.37a	06.57d	8.68a	6.37a
DMS	2.66	7.94	0.19	1.22	0.72
Aditivos					
MM	20.39a	48.39a	07.82c	7.59b	4.87b
CEL	21.65a	48.90a	11.36b	7.28b	5.03b
XIL	21.29a	52.49a	15.45a	8.59a	4.70b
Control	18.01b	54.64a	06.87d	9.62a	6.13a
DMS	2.65	7.94	0.19	1.22	0.72

Nota. MM: miel de maguey; CEL: celulasa; XIL: xilanasa; DMS: diferencia mínima significativa. Valores con literal diferente en cada columna de cada variable, indica diferencia estadística, con base en la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia formulada a partir de la información obtenida.

estadísticamente diferentes entre sí. El mayor contenido de MS fue para las variedades San Diego y Cacahuacintle, así como para los tratamientos CEL y XIL. Es de observar que el mayor aporte de FDN fue para los materiales P-1832, Victoria y San Diego, que resultaron estadísticamente iguales entre sí ($p < 0.05$), pero diferentes a la variedad San Diego. Es de observar que el mayor pH ($p < 0.05$) fue para el híbrido Victoria, seguido de Cacahuacintle, los cuales fueron estadísticamente diferentes entre sí; con relación al uso de aditivos, el pH más alto fue para el testigo (tabla 7.2).

Producción de gas *in vitro*

Se encontró efecto significativo ($p < 0.05$) en las variables medidas de producción de gas, tasa de fermentación y tiempo de retardo de incubación (a , b , c) respectivamente, tanto para los genotipos y los aditivos evaluados, así como para su interacción de dichos factores. La información analizada fue confiable, de acuerdo con el coeficiente de variación para las variables evaluadas, el cual estuvo entre 3.24 a 14.40% (tabla 7.1).

La aplicación de las enzimas y MM incrementaron la producción de gas, principalmente en las variedades criollas Cacahuacintle y San Diego, siendo estadísticamente iguales entre sí ($p < 0.05$), pero diferentes a los híbridos evaluados. La tasa de fermentación fue estadísticamente mayor ($p < 0.05$) para los criollos San Diego y Cacahuacintle Tlacotepec. En relación con la aplicación de aditivos, el uso de MM, CEL y XIL mostraron igualdad estadística y la mayor tasa de fermentación ($p < 0.05$), observando el menor comportamiento para el control. El mayor tiempo de retardo de la incubación fue para el híbrido Victoria, seguido por las variedades Cacahuacintle Tlacotepec y San Diego, y el menor tiempo de incubación fue para el híbrido P-1832. En relación con los aditivos, el tratamiento control fue el de mayor tiempo de retardo de incubación, seguido por el tratamiento de MM, con diferencia estadística entre ambos ($p < 0.05$), y los de menor tiempo fueron CEL y XIL, que resultaron con igualdad estadística (tabla 7.4).

Discusión

Composición de carbohidratos

Los microsilos con el forraje de los cuatro genotipos de maíz usados en el presente experimento fueron abiertos a los 6 meses después de su almacenamiento, tiempo suficiente para estabilizar el proceso de fermentación y producir las diversas acciones propias del forraje en estado anaerobio; BM Editores (2019) aseveran que con al menos 4 meses de almacenamiento el ensilado se vuelve más digerible, dando a las enzimas el tiempo suficiente para descomponer las proteínas en aminoácidos y el ALM se encuentre más disponible para digestión; coincidiendo con Meléndez (2017), quien menciona que cuando el ensilado de maíz húmedo permanece sellado por alrededor de 4 meses, existe mayor exposición y degradabilidad del ALM, propiciando que aumente la producción de leche.

La actividad de XIL, CEL y la MM mostraron una mayor aportación de materia seca en las variedades criollas San Diego y Cacahuacintle con respecto a los híbridos P-1832 y Victoria. Lo anterior es atribuible a que con la adición de las enzimas fibrolíticas exógenas se puede alterar la estructura de la fibra y estimular la colonización microbiana (Giraldo et al., 2004); influida además por los carbohidratos solubles (CS) como azúcares y almidones contenidos en el forraje, que de acuerdo a Gagliostro y Gaggioti (2002), los CS en las gramíneas varía de 50-150 a 200-300 g kg⁻¹ MS en las plantas jóvenes y en las maduras; comportamiento similar encontrado en el presente trabajo para el forraje maduro del híbrido P-1832, de grano amarillo, con 287 g kg⁻¹ MS, y para la variedad San Diego, también de grano amarillo, con 177 g kg⁻¹ MS, al aplicarles XIL. En el estudio la producción de MS de la CEL, XIL y MM fue mayor con respecto al control, en donde Schingoethe et al. (1999) mencionan que con el uso de enzimas fibrolíticas se aumenta la MS y la digestibilidad de la FDN; por otro lado, Kuhad et al. (2011) observaron que la actividad de las celulasas puede causar hidrólisis parcial de la pared celular vegetal durante el ensilaje.

El grano de maíz tiene como elemento principal al ALM. Este polisacárido es el producto final de la fijación de carbono durante la fotosíntesis, su

contenido en el endospermo de maíz incrementa proporcionalmente con el llenado del grano, esto comienza 8 días después de la polinización (DDP) y continua hasta los 45 DDP (Prioul et al., 2008); en la presente investigación los genotipos San Diego (grano amarillo), Cacahuacintle (grano blanco), Victoria (grano blanco) y P-1832 (grano amarillo), fueron cosechados 50, 56, 51 y 37 DDP, lo que precisa que el grano estuvo formado al momento de cosechar el forraje y tuvo un alto contenido de ALM; ya que de acuerdo a Agama-Acevedo et al. (2015), encontraron que el contenido de ALM en maíz blanco a los 20 y 50 DDP fue de 71 y 76 g 100 g⁻¹, y en maíz azul de 71 y 81 g 100 g⁻¹, respectivamente. El ALM es un azúcar o carbohidrato soluble que se encuentra en los granos de cereales y en los forrajes, como el ensilaje de maíz que por tener granos aporta ALM, cuyo contenido es del 20-45% (Meléndez, 2017); en el actual estudio se encontraron valores más bajos, tanto en los promedios de las variedades (9.5-15.2% de ALM) como en los híbridos (6.5-10.1% de ALM); sin embargo, hay que considerar que los cultivares de grano amarillo P-1832 y San Diego, tratados con XIL, tuvieron los valores mayores de 28.76 y 17.78% de ALM (tabla 7.3).

Tabla 7.3. Promedios del contenido de almidón (%) en los cuatro genotipos de maíz ensilado por cuatro tratamientos con aditivos

Genotipo/Aditivo	Xilanasa	Celulasa	Miel de maguey	Control	Promedios genotipos
Cacahuacintle (grano blanco)	13.76	12.56	02.51	09.35	09.54
San Diego (grano amarillo)	17.78	15.38	14.19	13.62	15.24
Victoria (grano blanco)	01.50	08.54	13.45	02.80	06.57
P-1832 (grano amarillo)	28.76	08.97	01.12	01.71	10.14
Promedios aditivos	15.45	11.36	07.82	06.87	

Fuente: Elaboración propia formulada a partir de la información obtenida.

En los forrajes, la mayor parte de sus carbohidratos son aportados por la fracción de la FDN (Meléndez, 2017). El forraje de maíz puede ser utilizado en la alimentación de rumiantes después de la mejoría de su valor nutritivo (Elghandour et al., 2014), utilizando enzimas fibrolíticas exógenas para mejorar la degradación de los hidratos de carbono y la pared celular (Alsersy et al., 2015); lo cual concuerda con la disminución en el contenido de FDN al aplicar CEL y MM, en particular en los genotipos criollos evaluados (San Diego y Cacahuacintle), evidenciando esto al observar al testigo con

el mayor contenido de FDN; también Nsereko et al. (2000) hacen mención de que la adición de enzimas fibrolíticas al forraje, antes de la ingestión, altera la estructura de los alimentos haciéndolos más susceptibles a la hidrólisis ruminal; por su parte Casler (2001) dice que la reducción de FDN representa un aumento en la proporción de componentes solubles de alta digestibilidad. Además de lo anterior, las dietas de las vacas lecheras deben contener un valor máximo y un mínimo de ALM, debido a que es una fuente rápida de energía que ayuda a mantener un ambiente ruminal óptimo; en este contexto, la vaca lechera en la etapa productiva seca temprana requiere de un rango de ALM del 11 a 15%, en la etapa de parto del 15 al 18% y en la etapa de media lactancia del 24 al 28% (Meléndez, 2017); en el presente estudio, el ensilaje de maíz de la variedad San Diego tratada con XIL, CEL y MM, con un contenido promedio de ALM de 17.7, 15.3 y 14.2, respectivamente, el tercero se acopla a los requerimientos de la vaca lechera en la etapa productiva seca temprana, el segundo y primero a la vaca en la etapa de parto; y el ensilaje del híbrido P-1832 tratado con XIL con 28.7% de ALM, se puede utilizar para las vacas en la etapa de media lactancia (tabla 7.3).

En el experimento se observó que al incrementar el contenido de ALM en los genotipos evaluados, principalmente en los de grano amarillo, el pH disminuye; coincidiendo con lo reportado por Van Soest (1994), quien menciona que al aumentar los niveles de ALM en una dieta, disminuye el pH.

Es de considerar que se encontró mayor contenido de ALM y menor cantidad de CEN cuando se tiene mayor porcentaje de MS y con menor MS se tiene menor contenido de ALM y mayor en CEN (tabla 7.2); comportamiento análogo en ensilaje de maíz reporta Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Anima (Fedna, 2019), quien menciona que con porcentajes <20 MS hubo menor contenido de ALM y mayor en CEN y con porcentajes >20 MS se determinó mayor ALM y menor cantidad de CEN.

Producción de gas *in vitro*

La XIL fue la enzima más eficiente en cuanto a la PG, tiempo de fermentación, tiempo de retardo de incubación y una mayor PG acumulada a 96 h;

Colombato et al. (2003) mencionan que si la enzima afecta la PG hasta el final de la fermentación esto implicara que la enzima aumento el material fermentable. El aumento en la PG *in vitro* con el uso de enzimas puede permitir un mayor consumo voluntario de alimentos (Gado et al., 2009); situación donde Rojo et al. (2015) trabajando con cabras lactantes suplementadas con CEL consumieron aproximadamente 11% más de MS, materia orgánica (MO) y FDN en comparación con las cabras control, incrementando su producción de leche y mejorando su composición.

En relación al almidón, se ha propuesto que su degradación nocturna depende de la disponibilidad de las enzimas participantes en el proceso (Patricia-Coello y Martínez-Barajas, 2022) también se menciona que la degradación del almidón en tejidos fotosintéticos depende de un control que garantice que la mayor parte se use durante la noche (Fernández et al., 2017) en este sentido se señala que la degradación nocturna del almidón es promovida por la activación de las enzimas participantes, en respuesta a cambios que en el estroma de los cloroplastos promueven la alternancia de los periodos de luz y oscuridad (Patricia-Coello y Martínez-Barajas, 2022); en el presente trabajo XIL fue la enzima de mayor degradación de la materia seca y de mejor contenido de almidón, al igual que los genotipos San Diego y P-1832, situación que se presta a señalar que dichos genotipos de grano amarillo, bajo la aplicación de XIL, produjeron el suficiente almidón para que la planta realizara eficientemente la fotosíntesis durante el día y la noche.

La PG con la adición de XYL, CEL y MM tuvo un mejor comportamiento que el control, debido a su acción conjunta con las enzimas endógenas y otros microorganismos ruminales para propiciar actividad continua; en lo cual Beauchemin et al. (2004), dicen que en el modo de acción con la adición de las enzimas hidrolíticas exógenas (EFE) a la dieta de rumiantes aumenta la capacidad hidrolítica del rumen, debido a un incremento en el ataque bacteriano, a la estimulación de poblaciones microbianas del rumen y a un efecto sinérgico con las hidrolasas de los microorganismos ruminales; y que de acuerdo con Kung et al. (2000) se llega a la mejora del valor nutritivo de los alimentos y se crea estabilidad entre el complejo enzima-alimento.

En el presente experimento la dosis usada de 1 ml kg⁻¹ MV, tanto de XYL, CEL y MM agregada al sustrato de maíz, fue efectiva de acuerdo a los resultados obtenidos de PG con actividad continua hasta las 96 h; Vallejo et al.

(2016) en un estudio al trabajar con XIL y CEL a las dosis de 10, 20, 40 y 80 mg g⁻¹ MS de forraje de maíz, se aumentó la PG a diferentes horas de incubación, obteniendo la mayor PG al adicionar 40 mg g⁻¹ MS tanto de xilanasas como de celulasas, pero con 80 mg g⁻¹ MS de xilanasas se obtuvo la menor PG; Cysneiros et al. (2006) no observaron efectos sobre la desaparición ruminal de MS al adicionar 5, 10 y 20 mg de enzimas fibrolíticas por kilogramo de ensilado de maíz a las 96 h; por su parte Beauchemin et al. (2003) mencionan que con altos niveles de enzimas adicionadas, se tiene reducción de impactos de acuerdo al sustrato usado.

La actividad de la XIL, CEL y MM se vio mayormente reflejada en los criollos Cacahuacintle y San Diego con respecto a los híbridos P-1832 y Victoria, dado su notable aumento en la PG, el tiempo de la tasa de fermentación y el tiempo de retardo de la incubación (tabla 7.4) lo cual pudo deberse a que el germoplasma adaptado a las tierras altas, a la adición de los azúcares de la MM, además de la liberación de los polisacáridos de la planta de maíz.

Tabla 7.4. Producción de gas de cuatro genotipos de maíz ensilado tratados con miel de maguey, celulasa, xilanasas y control

Factores	a	b	c	gas 96 h
Genotipos				
San Diego (grano amarillo)	226.25a	0.0396a	1.27b	219.45a
Cacahuacintle (grano blanco)	229.08a	0.0380a	1.29b	220.20a
P1832 (grano amarillo)	209.83b	0.0304b	0.96c	194.41b
Victoria (grano blanco)	198.33c	0.0313b	2.85a	177.77c
DMS	7.74	0.0021	0.254	6.87
Aditivos				
MM	220.33b	0.0371a	1.87b	209.22b
CEL	221.41b	0.0362a	1.20c	211.97a
XIL	229.25a	0.0353a	1.05c	219.74a
Control	192.50c	0.0306b	2.25a	170.90c
DMS	7.74	0.0021	0.254	6.87

Nota: a: producción de gas (ml g⁻¹ MS); b: tasa de fermentación (h⁻¹); c: tiempo de retardo de incubación (h⁻¹); gas 96 h: producción de gas a las 96 horas; MM: miel de maguey; CEL: celulasa; XIL: xilanasas; DMS: diferencia mínima significativa. Literales diferentes en columnas para cada variable indican diferencia significativa, con base en la prueba de Tukey ($p < 0.01$).

Fuente: Elaboración propia formulada a partir de la información obtenida.

Los criterios ligados a la PG fueron más eficientes para las variedades criollas San Diego y Cacahuacintle, con excepción del tiempo de retardo de incubación del híbrido P-1832 que registro el menor tiempo con 0.96 h, y que de acuerdo a Franco et al. (2015) fue el material vegetal más tardío con 176 días a la cosecha para ensilar, sobre esto Van Soest (1994) dice que un genotipo de madurez tardía que vegetativamente perdura durante un periodo más largo de tiempo, tendera a ser menos lignificado que un genotipo de madurez temprana.

Conclusiones

Con la adición de xilanasa, celulasa y miel de maguey a ensilados de maíz almacenados por seis meses, se incrementa la materia seca disponible, principalmente para las variedades San Diego y Cacahuacintle, haciendo al ensilaje más digerible dado el incremento de almidón y digestibilidad de la fibra detergente neutro, además de disminuir el pH.

Los maíces criollos Cacahuacintle y San diego tratados con xilanasa, celulasa y miel de maguey, mostraron la mayor producción continua de gas, mejorando el valor nutritivo de este alimento con la consecuente desaparición ruminal de la materia seca, lo que puede permitir un mayor consumo voluntario de forraje.

El contenido de almidón fue mayor en los genotipos de maíz amarillo San Diego y P-1832 cuando los ensilados fueron tratados con xilanasa.

La miel de maguey funciona como un aditivo que actúa en el proceso de fermentación y en la degradación de ensilajes de maíz.

Referencias

- Agama-Acevedo, E., Barba de la Rosa, A P., Méndez-Montalvo, G., y Bello-Pérez, A. (2008). Physicochemical and biochemical characterization of starch granules isolated of pigmented mayze hybrids. *Starch/Starke*, 60, 433-441.
- Alsersy, H., Salem, A. Z. M., Borhami, B. E., Olivares, J., Gado, H. M., Mariezcurrena, M. D., Yacuot, M. H., Kholif, A. E., El-Adawy, M., y Hernández, S. R. (2015). Effect of Mediterranean saltbush (*Atriplex halimus*) ensilaging with two developed enzyme cock-

- tails on feed intake, nutrient digestibility, and ruminal fermentation in sheep. *Journal of Animal Science*, 86, 51-58.
- Association of Official Analytical Chemists (1997). *Official Methods of Analysis* (16^a ed.). Association of Official Analytical Chemists.
- Álvarez, A. E. (2009). *Determination of starch. Animal Nutrition Lab Procedures*. Desert Research and Extension Center.
- Bates, G. (1998). *Corn silage*. Agricultural Extension Service. University of Tennessee.
- Beauchemin, K. A., Colombatto, D., Morgavi, P. D., y Yang, Z. W. (2003). Use of exogenous fibrolytic enzymes to improve feed utilization by ruminants. *Journal of Animal Science*, 81(2), 37-47.
- Beauchemin, K. A., Colombatto, D., Morgavi, D. P., Yang, W. Z., y Rode, L. M. (2004). Mode of action of exogenous cell wall degrading enzymes for ruminants. *Canadian Journal of Animal Science*, 84, 13-22.
- BMeditores (2019). *Digestibilidad del almidón en el ensilado de maíz y en el maíz con alto contenido de humedad*. <https://bmeditores.mx/secciones-especiales/centro-de-informacion-de-ensilaje-de-calidad/>
- Casler, M. D. (2001). Breeding forage crops for increased nutritional value. *Advances in Agronomy*, 7, 51-107.
- Colombatto, D., Mould, F. L. Bhat, M. K., y Owen E. (2003). Use of fibrolytic enzymes to improve the nutritive value of ruminant diets. A biochemical and in vitro rumen degradation assessment. *Animal Feed Science and Technology*, 107, 201-209.
- Cysneiros, C. S. S., Franco, G. L., Ulhoa, C. J., Diogo, J. M. S., y Ramos, A. K. B. (2006). Efeito de enzimas fibrolíticas sobre a composição química da silagem de milho. *Ciência Animal Brasileira*, 7(4), 339-348.
- Elghandour, M. M. Y., Vázquez, Ch. J. C., Salem, A. Z. M., Kholif, A. E., Martínez, C. J. S., Camacho, L. M., y Cerrillo-Soto, M. A. (2014). Effects of *Saccharomyces cerevisiae* at direct addition or pre-incubation on in vitro gas production kinetics and degradability of four fibrous feeds. *Italian Journal of Animal Science*, 13, 295-301.
- Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (2019). *Ensilado de maíz*. <http://www.fundacionfedna.org/forrajajes/ensilado-de-maiz/>
- Fernandez, O., Ishihara, G., George, G. M., Mengin, A., Flis, A., Summer, D., y Stitt, M. (2017). Leaf starch turnover occurs in long days and in falling light at the end of the day. *Plant Physiology*, 174, 2199-2212.
- Franco, M. J. R. P., González, H. A., Pérez, L. D. J., y González, R. M. (2015). Phenotypic characterization of hybrids and varieties of forage maize in High Valley State of Mexico, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(8), 1915-1927.
- Gado, H. M., Salem, A. Z. M., Robinson, P. H., y Hassan, M. (2009). Influence of exogenous enzymes on nutrient digestibility, extent of ruminal fermentation as well as milk production and composition in dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 154, 36-46.
- Gagliostro, G. A., y Gaggiotti, M. (2002). *Evaluación de alimentos para rumiantes e implicaciones productivas*. <http://www.produccionbovina.com/tablas-composicion-alimentos/>

- Giraldo, L. A., Ranilla, M. J., Tejido, M. L., y Carro, M. D. (2004). Effect of enzyme application method on in vitro rumen fermentation of tropical forages. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 13, 63-66.
- Huntington, G. B., Harmon D. L. and Richards C. J. (2006). Sites, rates and limits of starch digestion and glucose metabolism in growing cattle. *J Animal Sci* 84: E14.
- Krishnamoorthy, U., Soller, H., y Menke, K. H. (1991). A comparative study on rumen fermentation or energy supplements in vitro. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 65, 28-35.
- Kuhad, R. Ch., Gupta, R., y Singh, A. (2011). Microbial cellulases and their industrial applications. *Enzyme Research. SAGE-Hindawi Access to Research*, 280696, 110.
- Kung, J. L., Treacher, R. J., Nauman, G. A., Smagala, A. M., Endres, K. M., y Cohen, M. A. (2000). The effect of treating forages with fibrolytic enzymes on its nutritive value and lactation performance of dairy cows, *Journal of Dairy Sciences*, 83, 115-122.
- Meléndez, P. (2015). *El almidón y su importancia en la nutrición de las vacas lecheras*. <http://www.elmercurio.com/campo/noticias/analisis/el-almidon-y-su-importancia-en-la-nutricion-de-las-vacas-lecheras/>
- Meléndez, P. (2017). *Revisitando el concepto de la digestibilidad del almidón*. <http://www.elmercurio.com/campo/noticias/analisis/revisitando-el-concepto-de-la-digestibilidad-del-almidon/>
- Menke, K. H., y Steingass H. (1988). Estimation of the energetic fed value obtained from chemical analysis and in vitro gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development*, 28, 7-12.
- Nsereko, V. L., Morgavi, D. P., Rode, L. M., Beauchemin, K. A., y 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, 153-170.
- Patricia Coello, L. B., y Martínez-Barajas E. (2022). Regulación de la degradación del almidón en las hojas. *Revista de Fitotecnia Mexicana*, 45(4), 503-507.
- Prioul, J. L., Méchin V., Lessard P., Thévenot C., Grimmer M., Chateau-Joubert S., Coates S., Hartings H., Kloiber-Maitz M., Murigneux A., Sarda X., Damerval C., y Edwards K. J. (2008). A joint transcriptomic, proteomic and metabolic analysis of maize endosperm development and starch filling. *Plant Biotechnology Journal*, 6, 855-869.
- Rojo R., Kholif A. E., Salem A. Z. M., Elghandour M. M. Y., Odongo N. E., Montes de Oca R., Rivero N., y Alonso M. U. (2015). Influence of cellulase addition to dairy goat diets on digestion and fermentation, milk production and fatty acid content. *Journal of Agricultural Science*, 153(8), 1514-1523. www.researchgate.net/publication/281273665
- Schingoethe, D. J., Stegeman, G. A., y Treacher, R. J. (1999). Response of lactating dairy cows to a cellulase and xylanase enzyme mixture applied to forages at the time of feeding. *Journal of Dairy Science*, 82(5), 996-1003.
- Steel R. G. D., Torrie J. H., y Dickey D. A. (1997). *Principles and Procedures of Statistics. En A biometrical approach* (3ª ed.). McGraw Hill Book Co.

- Staples, C. R. (2003). *Corn silage for dairy cows*. Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida.
- Theodorou M. K., Williams B. A., Dhanoa M. S., McAllan A. B., y France J. (1994). A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 48, 185-197.
- Valdés, K. I., Salem, A. Z. M., López, S., Alonso, M. U., Rivero, N., Elghandour, M. M. Y., Domínguez, I. A., Ronquillo, M. G., y Kholif, A. E. (2015). Influence of exogenous enzymes in presence of *Salix babylonica* extract on digestibility, microbial protein synthesis and performance of lambs fed maize silage. *Cambridge Journal of Agriculture Science*, 153, 732-742.
- Vallejo, L. H., Salem, A. Z. M., Kholif, A. E., Elghandour, M. M. Y., Fajardo, R. C., Rivero, N., Bastida A. Z., y Mariezcurrena, M. D. (2016). Influence of cellulase or xylanase on the in vitro rumen gas production and fermentation of corn stover. *The Indian Journal of Animal Science*, 86(1), 70-74.
- Van Soest P. J., Robertson J. B., y Lewis B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74, 3583-3597.
- Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional ecology of the ruminant*. Cornell University. Press, Ithaca.