

ELABORACIÓN DE ENSILAJE A BASE DE NOPAL (*Opuntia SPP*), ALTERNATIVA FORRAJERA PARA LA ALIMENTACIÓN DE GANADO

Jimena Veleta Cruz¹, Wendy Enríquez Murillo²,
Magali Ordóñez García³, Laura Gabriela Villanueva Romero⁴, Juan Carlos Bustillos Rodríguez⁵

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Recibido: 19/01/2023 Aceptado: 29/11/2023

Resumen.- Las condiciones climatológicas presentes en las zonas áridas o semiáridas dificultan el desarrollo de las actividades agropecuarias, debido principalmente a la escasa presencia de agua. El nopal (*Opuntia spp.*) es un recurso vegetal importante en el norte de México, que puede ser utilizado como alternativa forrajera para la alimentación de ganado. El objetivo del presente trabajo fue la elaboración y caracterización fisicoquímica de un ensilaje a base de nopal, dicho ensilaje fue elaborado utilizando una fermentación aeróbica semisólida con levadura *Saccharomyces cerevisiae*, melaza como fuente rica en glucosa y urea para potenciar el fermento del nopal. Los valores de a_w y acidez obtenidos no mostraron diferencia significativa entre el tiempo cero (T_0) y a las 72 h de fermentación (T_{72}), mientras que el pH mostró un incremento gradual conforme transcurrían las horas de fermentación 5.01 (T_0) y 7.01 (T_{72}), al igual que el contenido de proteínas (%) incrementó significativamente de 6.60 y 32.77 al T_0 y T_{72} , respectivamente. Por lo que un ensilaje de nopal puede resultar una alternativa viable para la alimentación de ganado bovino al ser un alimento nutritivo y de fácil obtención.

Palabras Clave: Aprovechamiento forrajero, bovinos, fermentación, *Saccharomyces cerevisiae*.

PRODUCTION OF SILAGE BASED ON NOPAL (*Opuntia SPP*), FORAGE ALTERNATIVE FOR LIVESTOCK FEEDING

Abstract.- The climatic conditions in arid and semi-arid zones hinder the development of agricultural and livestock activities, mainly due to the scarce presence of water. The nopal (*Opuntia spp.*) is an important plant resource in northern Mexico, which can be used as a forage alternative for cattle feed. The objective of the present work was the elaboration and physicochemical characterization of a nopal-based silage, this was elaborated using a semisolid aerobic fermentation with *Saccharomyces cerevisiae* yeast, molasses as a rich source of glucose and urea to enhance the nopal ferment. The a_w and acidity values obtained did not show a significant difference between time zero (T_0) and 72 h of fermentation (T_{72}), while the pH showed a gradual increase as fermentation hours 5.01 (T_0) and 7.01 (T_{72}) elapsed, as well as the protein content (%) increased significantly from 6.60 and 32.77 at T_0 and T_{72} , respectively. Therefore, a nopal silage can be a viable alternative for cattle feeding as it is a nutritious and easily obtained food.

Keywords: Forage use, cattle, fermentation, *Saccharomyces cerevisiae*.

Introducción

Si bien la agricultura familiar es económicamente crucial para un país, los productores de las regiones semiáridas a nivel mundial son los más vulnerables a los impactos del cambio climático, la combinación de un entorno adverso y una actividad económica dependiente de la naturaleza conduce a una vulnerabilidad extrema de los sistemas de producción, representada por colapsos virtuales en condiciones climáticas desfavorables para la producción, esto resulta en una fragilidad económica, ya que en este tipo de regiones las sequías periódicas tienen un gran impacto en las poblaciones rurales, lo que provoca graves pérdidas socioeconómicas que se reflejan en la economía a nivel nacional (de Oliveira et al., 2019).

¹ Estudiante de la carrera Ingeniería en Industrias Alimentarias. Tecnológico Nacional de México Campus Cd. Cuauhtémoc. <https://orcid.org/0009-0008-4014-2165> 18610@itcdcuauhtemoc.edu.mx

² Estudiante de la carrera Ingeniería en Industrias Alimentarias. Tecnológico Nacional de México Campus Cd. Cuauhtémoc. <https://orcid.org/0009-0000-5861-3596> wendi.31@outlook.es

³ Profesor(a). Tecnológico Nacional de México Campus Cd. Cuauhtémoc. <https://orcid.org/0009-0009-4203-4632> mordonez@itcdcuauhtemoc.edu.mx

⁴ Profesor(a). Tecnológico Nacional de México Campus Cd. Cuauhtémoc. <https://orcid.org/0000-0002-4833-5286> lvillanueva@itcdcuauhtemoc.edu.mx

⁵ Profesor(a). Tecnológico Nacional de México Campus Cd. Cuauhtémoc. <https://orcid.org/0000-0002-5485-8323> jbustillos@itcdcuauhtemoc.edu.mx (**Autor corresponsal**)

En México se estima que el 66.2% de la superficie territorial se encuentra dentro de lo que se considera clima árido y semiárido, incluyendo al estado de Chihuahua (Hernández et al., 2019). Las regiones semiáridas se caracterizan por un ecosistema naturalmente frágil debido a la ocurrencia de limitaciones en la disponibilidad de agua (de Albuquerque Saraiva et al., 2020). Dichas condiciones climatológicas dificultan las actividades agropecuarias debido a la escasez de lluvias durante la mayor parte del año. Aunado a esto, los efectos del cambio climático han impactado directamente en la producción pecuaria (Sánchez et al., 2018). La producción de ganado lechero y de carne es una de las pocas actividades económicamente posibles en las regiones semiáridas en las que la alimentación del ganado se caracteriza por el uso de forrajes cultivados y vegetación nativa (Inácio et al., 2020).

De acuerdo con datos de la población ganadera en el año 2020, Chihuahua se encontraba en tercer y cuarto lugar en cuanto al número de cabezas de ganado bovino destinadas a la producción de leche y carne respectivamente (SIAP, 2022). En este sentido, el constante sobrepastoreo de los pastizales causa una gran pérdida de vegetación natural y por ende ocasiona la degradación del suelo, esta escasez de pasto aumenta cada año más y es perjudicial para la alimentación animal, lo que implica la búsqueda inmediata de soluciones.

Por otra parte, el incremento del hato ganadero trae como consecuencia que la demanda de alimentos para el ganado aumente considerablemente cada año, siendo la principal limitante la falta de forraje verde para la alimentación animal (Hajji et al., 2022). Por lo que el ganado es alimentado con recursos forrajeros de baja calidad nutricional, especialmente durante el periodo invernal y de sequía, trayendo como consecuencia bajos niveles de producción y productividad pecuaria, como consecuencia de esto, se emplean los esquilmos agrícolas, ya que son una fuente de energía abundante y barata para los rumiantes, y a pesar de que se utilizan durante gran parte del año en muchas regiones de México, su aporte nutricional resulta insuficiente (Fernández Taype et al., 2021; Inzunza et al., 2017). Aunado a esto, la limitación existente de alimentación es ocasionada en parte por la baja disponibilidad de plantaciones establecidas que permitan un abastecimiento continuo de material vegetal y, por otra parte, las pocas alternativas con las que cuentan los productores ganaderos para dar un mayor aprovechamiento a los escasos recursos con los que cuentan, y poder así mejorar la alimentación enfocada a los animales rumiantes (Fair et al., 2022).

De esta manera, los pequeños productores se han visto en la necesidad de implementar estrategias de alimentación. El uso de plantas de metabolismo ácido de las crasuláceas tiene un gran potencial ya que son cultivos altamente eficientes en el uso del agua, por ser el nopal una planta crasulácea, es una opción adecuada para expandir la producción a tierras marginales semiáridas de nuestro país (Ramírez-Arpide et al., 2018).

El nopal (*Opuntia* spp.) es un recurso vegetal importante en el norte de México, esta planta que pertenece a la familia de las cactáceas, es originaria de América y actualmente se cultiva en muchos países del mundo (México, Sicilia, Chile, Brasil, Turquía, Corea, Israel, Argentina, China, y el norte de África), el nopal se ha adaptado durante milenios a las temperaturas extremas y la prolongada sequía, por lo que se considera una fuente viable de energía digestible, agua y vitaminas durante la época de sequía en muchos de los entornos del mundo y se considera un alimento valioso en regiones donde otras plantas no pueden sobrevivir debido a condiciones ambientales extremas (Araiza-Rosales et al., 2021; Samir et al., 2023; Vastolo et al., 2020). El nopal tiene múltiples compuestos funcionales que podrían aplicarse en alimentos funcionales o como fuente de nutraceuticos, esto hace que sea utilizado en diferentes propósitos, por ejemplo además de alimentar al ganado, en productos de confitería, panadería y lácteos a base de azúcar, para mejorar la calidad y los atributos sensoriales y proporcionaron actividades biofuncionales, para purificar el agua y para restaurar o controlar la erosión de las tierras áridas y semiáridas, y mejorar la pintura de las casas (Guevara-Araza, 2021).

En los últimos años, el cultivo del nopal ha aumentado la seguridad alimentaria y reducido el hambre y la pobreza en las zonas áridas y semiáridas a nivel mundial, en México, la utilización del nopal como forraje se basa principalmente en la población de cactus silvestres, mientras que en otros países como Brasil, Túnez, Sudáfrica y Marruecos, el forraje de nopal se produce en huertas cultivadas, que pueden tener un uso múltiple como alimento (hojas y fruta), productos procesados industrialmente o solo forraje, todo esto es posible debido a que es una fuente de agua y energía, principalmente durante la estación seca del año (Dubeux Jr et al., 2021).

El nopal se caracteriza por presentar cladodios (hojas planas en forma de paletas comestibles de cactus espinosos de tallo plano), los cuales son apreciados para fines medicinales y alimenticios (Ramírez-Arpide et al., 2018). Estas estructuras (cladodios) del nopal son hojas químicamente modificadas, compuestas por clorofila y un gran porcentaje de agua en su interior que pueden servir como alimento para humanos y animales (da Silva Brito et al., 2020). Sin

embargo, respecto al contenido nutricional dicha planta presenta un bajo contenido proteico (4% aproximadamente) lo que limita su uso como única fuente de forraje (Torres-Ponce et al 2015).

Debido a esto, es necesario desarrollar tecnologías que permitan incrementar el valor nutrimental del nopal como, por ejemplo, mediante procesos fermentativos por medio de los cuales se puede obtener biomasa a partir del empleo de los carbohidratos presentes en el sustrato, estos procesos fermentativos permiten al mismo tiempo, hidrolizar la celulosa y el empleo de la glucosa, lo que facilita la disponibilidad de nutrientes hacia el ganado, y por ende resulta en una opción viable de alimentación alternativa (Herrera Torres et al., 2017). Cuando se utiliza en forma de ensilaje, el nopal presenta ventajas agronómicas y operativas, ya que su proceso de ensilado permite la cosecha de toda la plantación, lo que proporciona una mayor capacidad de crecimiento y, consecuentemente, un rendimiento uniforme del cultivo, además, permite reducir la mano de obra humana involucrada en la cosecha y el abastecimiento periódico no solo en el período de sequía, sino de manera intensiva durante todo el año (Elsheikh et al., 2023; Pereira et al., 2021).

El ensilaje es un proceso anaeróbico para la conservación de cultivos húmedos por fermentación en condiciones óptimas de ensilado, las bacterias fermentan principalmente carbohidratos solubles, preservando así los nutrientes en el forraje (Hajji et al., 2022). El proceso de ensilado se ha utilizado para la conservación de alimentos durante más de 3,000 años, actualmente es la técnica más utilizada para la conservación de alimentos para rumiantes (Ávila y Carvalho, 2020). El proceso de fermentación en estado sólido aumenta el contenido de proteína en el sustrato al aumentar la proteína unicelular contenida en la pared celular de los microorganismos fermentadores (Arreola et al., 2019).

El ensilado es uno de los ingredientes principales en las dietas del ganado rumiante y es una fuente importante de nutrientes, particularmente de energía y fibra digestible, lo que hace que este tipo de alimento se encuentre entre los ingredientes dietéticos más comunes que se utilizan en las operaciones modernas de producción de lácteos y carne (Grant y Ferraretto, 2018). Además, ante los cambios ambientales que se están experimentando, el aprovechamiento de algunos recursos vegetales presentes podría ser una forma de satisfacer las necesidades de los animales, al mismo tiempo que se hace más sostenible su producción y se reduce la producción de residuos o el daño causado por el sobrepastoreo (Vastolo et al., 2020). Sin embargo, la proteína soluble en combinación con una cantidad limitada de carbohidratos solubles en agua presentes en los insumos del ensilaje, podrían dificultar una producción y conservación eficiente del ensilado, disminuyendo la calidad del producto final e interfiriendo durante el proceso de ensilado (Lima et al., 2010).

La adición de ciertos aditivos al ensilaje del nopal como lo son la urea y la melaza conduce a una nutrición rica y abundante para los microorganismos presentes en el proceso fermentativo, ya que la melaza, por ejemplo, contiene altos niveles de carbohidratos solubles y disponibles, así mismo, se recomienda incluir a la urea dentro de la alimentación con forrajes como suplemento, esto con la finalidad de cubrir los requerimientos nutricionales y metabólicos de los rumiantes (Mat et al., 2020). En este mismo sentido, la melaza ha sido propuesta como un estimulante eficaz para mejorar la calidad del ensilado mediante el aumento de la carga microbiana inicial y el sustrato fermentable (Ni et al., 2017).

Por otra parte, se ha estudiado la inclusión de urea durante el proceso de ensilaje del forraje para disminuir también las pérdidas durante el proceso de fermentación del ensilaje y mejorar la estabilidad aeróbica, además de reducir o limitar el crecimiento poblacional de microflora ajena al ensilado, logrando una estabilidad en el producto (Santos et al., 2020). Por otra parte, la urea se utiliza como aditivo alimentario en rumiantes para facilitar la digestión de los forrajes mediante la fermentación digestiva, ya que la naturaleza de la lignificación unida al carbohidrato estructural presente en los piensos para ganado puede ser una barrera importante para la digestibilidad, sin embargo, se dispone de información limitada sobre el efecto de aditivos como la urea en la conservación de nutrientes y la calidad del ensilaje para rumiantes. (Kaewpila et al., 2020).

Respecto al ensilaje de nopal, resulta bastante viable debido a que permite una adecuada conservación de dicho material vegetal, y a pesar de su alto contenido de humedad, debido a la formación de mucílago se puede disminuir la actividad del agua, controlando el desarrollo de clostridios y enterobacterias, además de reducir las pérdidas de efluentes (Pereira et al., 2019). Otro aspecto a evaluar en el proceso de ensilado de nopal está relacionado con su porcentaje de carbohidratos solubles en agua, ya que el nopal es un forraje rico en polisacáridos pécticos y azúcares esterificados como galactosa, arabinosa, xilosa y fructosa que hacen posible la fermentación en el ensilaje, aunque presenta bajos contenidos de materia seca y proteína bruta. En este mismo sentido, la inclusión de ensilaje de nopal como alternativa

en la dieta de los rumiantes reduce la ingesta de agua y disminuye la competencia entre humanos y animales por el agua en ambientes áridos y semiáridos donde los recursos hídricos son limitados (da Silva Brito et al., 2020).

Dado lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue la elaboración y caracterización fisicoquímica a nivel de laboratorio de un ensilaje a base de nopal adicionado con melaza líquida y urea granulada con la finalidad de determinar su posible utilización como alternativa en la alimentación de ganado bovino.

Materiales y métodos

Elaboración del ensilaje de nopal

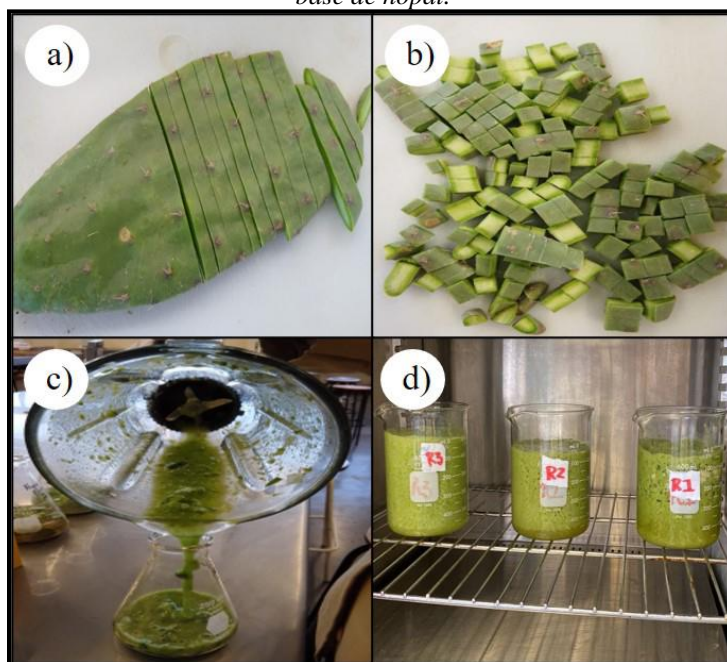
Para la elaboración del ensilaje de nopal se probaron cuatro tratamientos con la finalidad de determinar cuál presentaba mejores características de un ensilaje, la composición de cada uno de los tratamientos evaluados se muestra en la Tabla 1. Una vez realizados los tratamientos y de acuerdo a las características de un producto fermentado se decidió trabajar con el tratamiento #3, el cual consistió en lo siguiente. Se procesaron 93 g de nopal fresco mediante fermentación aeróbica semisólida, para lo cual un cladodio de *Opuntia* se lavó y desinfectó, se fraccionó en pequeñas partes de manera manual, luego se licuó y se vertió en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, posteriormente se añadió 1 g de levadura *Saccharomyces cerevisiae* (marca comercial), 1 g de urea y 5 g de melaza líquida, luego se cerró para generar las condiciones propias de la fermentación. La mezcla se mantuvo en movimiento con ayuda de un agitador magnético e incubada a 37 °C por 72 h (Figura 1).

Tabla 1. Tratamientos utilizados para elaboración del ensilaje de nopal (*Opuntia spp.*).

Tratamiento	Insumo (cantidades expresadas en gramos)				Triturado/Licuado
	Nopal	Levadura (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	Urea	Melaza	
1	93	1	1	5	Triturado
2	98	1	1		Triturado
3	93	1	1	5	Licuado
4	98	1	1		Licuado

Nota: En un estudio preliminar se evaluaron cuatro tratamientos para validar la formulación correcta de insumos y obtener una fermentación más óptima, resultando ser la formulación #3 la más adecuada.

Figura 1. Elaboración del ensilaje a base de nopal (*Opuntia spp.*). a) Cladodio de *Opuntia spp.*; b) Disminución del tamaño del nopal; c) Licuado y mezclado de los insumos del ensilaje; d) Fermentación y producción del ensilaje a base de nopal.



Nota: Etapas de desarrolladas para la obtención del ensilaje de nopal (*Opuntia spp.*).

Caracterización fisicoquímica del ensilaje de nopal

El análisis fisicoquímico se determinó de acuerdo a los métodos oficiales descritos por la AOAC, comprendiendo los siguientes análisis: proteína cruda (método 991.20) y acidez titulable (método 942.15).

pH

Para el análisis de pH se utilizó un phmetro de mesa (Orion 2 Star, Thermo Scientific), el cual fue calibrado previamente. Se tomaron muestras de 10 mL de la muestra de ensilaje y se colocaron en vasos de precipitado de 50 mL, lo suficiente para cubrir el electrodo del equipo, luego se introdujo el electrodo en la muestra, este permaneció ahí hasta que la lectura fue estable (Maki-Díaz et al., 2015).

Actividad de agua (a_w)

La actividad de agua (a_w) fue determinada mediante un equipo Series 3 AquaLab, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

Análisis estadístico

El experimento se llevó a cabo bajo un diseño completamente al azar con un mínimo de tres repeticiones. Los datos fueron analizados mediante un análisis de varianza balanceado (ANDEVA) y la prueba de Tukey ($p = 0.05$) utilizando el software Statistical Analysis System (SAS versión 9.0).

Resultados y discusión

Los resultados de la caracterización fisicoquímica se muestran en la Tabla 2. Los valores correspondientes a la actividad de agua (a_w) del ensilaje de nopal no mostraron diferencias significativas durante el proceso de fermentación 0.92 al tiempo cero de fermentación (T_0) y 0.88 a las 72 horas después de iniciado el proceso (T_{72}). Una baja variación en la actividad acuosa del ensilaje resulta deseable debido a que evita el desarrollo de microorganismos contaminantes, además de reducir las pérdidas de producto (Pereira et al., 2019). La nula variación en la actividad de agua puede estar relacionada con el mucílago del nopal, ya que los componentes mucilaginosos contienen polímeros tales como cadenas de ácido β -D-galacturónico enlazado (1-4) y residuos de L-ramnosa enlazados R(1-2) que sugieren que el papel fisiológico del mucílago vegetal es regular el contenido de agua celular durante sequías prolongadas permitiendo mantener estable su humedad y valor nutritivo, por lo que la cantidad de agua presente en el interior de las células vegetales se mantiene estable inclusive después de haber sido cortados los cladodios de la plata hasta por 21 días (Dubeux Jr et al., 2021). En este mismo sentido, se ha reportado que, debido a la presencia de mucílago de nopal, se reduce la pérdida de efluentes y la cantidad de carbohidratos solubles lo que favorece su utilización como alternativa alimenticia dirigida hacia el ganado (Pereira et al., 2021).

Por otra parte, Rezende et al., (2020), mostraron que el alimentar el ganado bovino con ensilaje a base nopal en lugar de ensilaje de sorgo, se logró un aumento en la eficiencia de alimentación y la disminución del tiempo de rumia, lo cual se atribuye a que el ensilaje de nopal contiene un mayor contenido de agua contenida en el mucílago y hay una menor pérdida de la misma durante el proceso fermentativo. En ocasiones los ensilajes a base de plantas de cereales requieren de ser humedecidos de manera ocasional para lograr un ensilaje estable, pero en el caso del ensilaje de nopal, se resuelve un problema importante asociado con el almacenamiento, ya que el nopal es una planta con un contenido de agua importante y no es necesario realizar esta actividad para mantener una humedad adecuada, lo que se refleja tanto en un menor gasto económico, así como en una mínima variación nutritiva (Pereira, et al., 2021).

Respecto a las características físicas del ensilaje en términos de color, aroma y textura una vez transcurrido el tiempo de fermentación se describen a continuación, el color del ensilado fue marrón verdoso, con un aroma agradablemente ácida-alcohólica, y una textura firme y ligeramente húmeda con ausencia de moho. De acuerdo a las características físicas observadas en el ensilaje, se considera que se encuentran dentro de los parámetros descritos para este tipo de productos fermentados, esto puede ser atribuido a que un adecuado proceso y la manipulación correcta de las condiciones permite la obtención de un ensilaje de buena calidad con ausencia de agentes extraños, principalmente moho y hongos (Mat et al., 2020). Por otra parte, Pereira, et al., (2021), mencionan que el someter las plantas a un proceso se puede mejorar el consumo y la digestibilidad de algunos nutrientes.

Los valores de pH fueron incrementando conforme transcurrió la fermentación partiendo de 5.01 al T_0 , hasta alcanzar un valor de 7.01 al T_{72} , valores neutros de pH son indicativo de un buen proceso de fermentación y conservación, además de garantizar la estabilidad del ensilaje al reducir la pérdida de nutrientes por fermentaciones secundarias o la acidificación por la carga microbiana ajena al bioproceso fermentativo (Araiza-Rosales et al, 2021). Resultados

similares de pH fueron reportados previamente por Hajji et al., (2022), al realizar un ensilaje de nopal (*Opuntia ficus-indica*) adicionado con melaza donde el valor de pH final fue de 6.65.

Por su parte, la acidez se mantuvo sin cambios significativos durante el proceso, la acidez está directamente relacionado con los valores de pH, ya que la acción de la levadura provoca un incremento del pH, ensilajes con valores de pH que tienden a la neutralidad (7.0) presentan una mayor estabilidad e indican una baja carga microbiana ajena al producto final (Alejos De La Fuente, 2013). Por su parte Santos et al., (2020), realizaron un estudio donde demostraron que el uso de urea como aditivo redujo las pérdidas y mejoró el valor nutricional y la estabilidad aeróbica de ensilajes de maíz, además de interferir en la caída del pH durante el proceso de ensilaje, restringiendo el crecimiento poblacional debido al taponamiento de la masa ensilada y elevando el pH en un rango adecuado a la actividad microbiana, así mismo, mencionan que la hidrólisis de la urea se produce en las primeras horas del proceso de fermentación, elevando el pH del ensilado y la resistencia a la acidificación rápida e intensa, por lo que no existe una variación significativa en la evaluación de este parámetro durante el proceso. Debido a la resistencia de los alimentos (forrajes) fibrosos a la digestión, se recomienda que durante el tratamiento fermentativo se tenga en cuenta la incorporación de ciertos aditivos al material vegetal, que sirven para mejorar o facilitar la digestibilidad, esto aunado al procesamiento mecánico, la adición de agua y el calor que se genera durante la fermentación (Fair et al., 2022).

Por otra parte, el valor de proteína se incrementó considerablemente conforme la fermentación transcurrió, iniciando en un valor promedio de 6.60 % al T₀ hasta alcanzar 32.77 % al T₇₂, resultados similares fueron reportados por Hernández et al., (2019), al mostrar un incremento de 7.08 a 33.52 % al finalizar el proceso fermentativo. El contenido proteico resulta muy relevante en los forrajes, ya que se refleja en el aumento de peso vivo del ganado (Herrera Torres et al., 2017). Sin embargo, el contenido proteico del producto obtenido a través de este tipo de fermentaciones semisólidas es muy variable, lo cual es atribuido principalmente a una variación significativa entre la eficiencia de las cepas para actuar en la fermentación del ensilaje (Ávila y Carvalho, 2020).

La adición de la melaza de remolacha cuyo contenido se basa principalmente en azúcares (carbohidratos) y elementos minerales (Ca, Mg, Na, K, Fe) permite un mayor desarrollo de los microorganismos fermentadores, agilizando y favoreciendo el proceso de ensilaje, además de aumentar el contenido de materia seca en el producto final, esto puede deberse a que las levaduras consumieron más carbohidratos cuando el azúcar estaba disponible en abundancia, la melaza proporcionó sustrato suficiente para el crecimiento de las levaduras en el ensilaje, lo que aceleró el proceso de fermentación y dio como resultado una mejor calidad de la fermentación (Hajji et al., 2022). En un estudio llevado a cabo por Lima et al., (2010), mostraron como el adicionar melaza a un ensilaje a base de sorgo aumenta el contenido de propionato en el producto final, lo que resulta beneficioso, ya que se ha descrito que este cambio en la fermentación del rumen (menos acetato y más propionato) beneficia a la producción animal, lo que resulta, por ejemplo, en un aumento de la producción de leche. Así mismo, el ácido propiónico tiene una alta acción antifúngica, lo que puede favorecer el aumento de la estabilidad aeróbica de los ensilajes (da Silva Brito et al., 2020).

Tabla 2. *Propiedades fisicoquímicas del ensilaje de nopal (Opuntia spp.) a través del proceso fermentativo.*

Tiempo de fermentación	Parámetro evaluado			
	(a _w)	pH	Acidez titulable	Proteína (%)
0 h	0.92 ± 0.01 ^a	5.01 ± 0.05 ^c	0.17 ± 0.00 ^a	6.60 ± 0.51 ^d
24 h	0.91 ± 0.02 ^a	5.56 ± 0.13 ^{bc}	0.15 ± 0.30 ^a	16.26 ± 1.02 ^c
48 h	0.89 ± 0.03 ^a	6.20 ± 0.38 ^{ab}	0.25 ± 0.08 ^a	21.84 ± 1.02 ^b
72 h	0.88 ± 0.02 ^a	7.01 ± 0.25 ^a	0.12 ± 0.05 ^a	32.77 ± 2.29 ^a

Nota: Los valores representan la media de al menos tres mediciones individuales ± error estándar. Los valores en la misma columna conectados por la misma letra no son estadísticamente diferentes.

Conclusiones

Finalmente, cuando se utilizan las técnicas apropiadas, existe la posibilidad de mejorar la productividad ganadera en ambientes secos al combinar la productividad del nopal y su valor nutritivo (dos Santos et al., 2021). El utilizar al nopal después de un proceso fermentativo adecuado resulta viable para generar un material alternativo para la alimentación animal, ya que el ensilaje es una técnica adecuada para conservar o mejorar los parámetros nutricionales del nopal, especialmente con la adición de aditivos que permitan enriquecer el alimento. Por lo que investigaciones futuras deben enfocarse en el aprovechamiento de los recursos disponibles para dar un valor agregado al nopal y una alternativa alimenticia al ganado, especialmente, el que se encuentra ubicado en zonas áridas o semiáridas de México.

Referencias bibliográficas

- Alejos De La Fuente, J.I. (2013). Ensilaje de pencas de nopal tunero con excretas pecuarias, in Posgrado de recursos Genéticos y Productividad Ganadera. Colegio de Posgraduados: Texcoco, Estado de México, México. p. 97.
- Araiza-Rosales, E., González-Arreola, A., Pámanes-Carrasco, G., Murillo-Ortiz, M., Jiménez-Ocampo R., y Herrera-Torres, E. (2020). Calidad fermentativa y producción de metano en ensilados de rastrojo de maíz adicionados con nopal fermentado y sin fermentar. *Abanico Veterinario*, 2021. 11. <https://doi.org/10.21929/abavet2021.24>
- Arreola, A.G., Ortiz, M.M., Carrasco, G.P., Saucedo, F.R., y Torres, E.H. (2019). Prickly pear cladodes. *Journal of Animal & Plant Sciences (J. Anim. Plant Sci.)*, 40(1), 6544-6553. <https://www.m.elewa.org/Journals/wp-content/uploads/2019/04/4.Gonzalez-1.pdf>
- Ávila, C.L.S., y Carvalho, B.F. Silage fermentation—updates focusing on the performance of micro-organisms. *Journal of applied microbiology*, 128(4), 966-984. <https://doi.org/10.1111/jam.14450>
- da Silva Brito, G.S.M., Santos, E.M., de Araújo, G.G.L., de Oliveira, J.S., Zanine, A. D. M., Perazzo, A.F., Campos, F.S., de Oliveira Lima, G.V., y Cavalcanti, H. S. (2020). Mixed silages of cactus pear and gliricidia: chemical composition, fermentation characteristics, microbial population and aerobic stability. *Scientific Reports*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63905-9>
- de Albuquerque Saraiva, T., de Figueiredo Monteiro, C.C., Feitosa, E. M.S., de Oliveira Moraes, G.S., Netto, A.J., Cardoso, D.B., Rodrigues Magalhães, A.L., y de Melo, A.A.S. (2020). Effect of association of fresh cassava root with corn silage in replacement for cactus cladodes on dairy cow performance. *Tropical animal health and production*, 52(3), 927-933. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-02087-7>
- de Oliveira Moraes, G. S., Guim, A., Tabosa, J. N., Chagas, J. C. C., de Paula Almeida, M., y de Andrade Ferreira, M. (2019). Cactus [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw] cladodes and corn silage: How do we maximize the performance of lactating dairy cows reared in semiarid regions?. *Livestock Science*, 221, 133-138. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.01.026>
- dos Santos Dubeux Jr, J.C.B., Ferreira dos Santos, M.V.F., Vieira da Cunha, M., Cordeiro dos Santos, D., de Almeida Souza, R.T., Leão de Mello, A.C., y Carvalho de Souza, T. Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 2021. 275: p. 114890. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>
- Dubeux Jr, J.C.B., dos Santos, M.V.F., da Cunha, M.V., dos Santos, D.C., de Almeida Souza, R.T., de Mello, A.C.L., y de Souza, T.C. (2021). Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 275, 114890. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>
- El Hajji, L., Azzouzi, H., Achchoub, M., Elfazazi, K., y Salmaoui, S. (2022). Ensiling characteristics of prickly pear (*Opuntia-ficus indica*) rejects with and without molasses for animal feed. *International Journal of Recycling Organic Waste in Agriculture*, 11(4), 541-552. <https://doi.org/10.30486/IJROWA.2022.1933535.1279>
- Elsheikh, H. A., Abo-Donia, F. M., y Nayel, U. A. (2023). The Impact of Substituting Corn Silage with Cactus Cladodes Silage on Growth Performance and Digestibility in Sheep Rations. *Journal of Animal and Poultry Production*, 14(9), 83-89. <https://doi.org/10.21608/JAPPMU.2023.229940.1086>
- Fair, W. T., Breeden, J. B., Atchley, T. W., Lambert, B. D., Aljoe, Z., Owsley, W. F., & Smith, W. B. (2022). The Use of Removed Mesquite Brush as a Fiber Replacement in Silage Production. *Animals*, 12(20), 2795. <https://doi.org/10.3390/ani12202795>
- Fernández Taype, R., Contreras Paco, J. L., Curasma Ccente, J., Cordero Fernández, A., Rojas De La Cruz, Y. C., Ruiz Vilchez, D., y Huaman Jurado, R. (2021). Efecto de *Saccharomyces cerevisiae* y tiempos de fermentación sobre la composición química del ensilado de avena y cebada. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(6). <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i6.21681>
- Guevara-Arauz, J.C. (2021). Industrial Uses of *Opuntia* spp. By-products. In *Opuntia* spp.: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications (pp. 707-752). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78444-7_37
- Grant, R. J., y Ferraretto, L. F. (2018). Silage review: Silage feeding management: Silage characteristics and dairy cow feeding behavior. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 4111-4121. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13729>
- Hernández, A.F., Rodríguez, F.J.M., Herrera, C.M., Herrera, G.G., Arriaga, O.E., Salazar, J.O., y Bautista, C.B. Fermentación semisólida del nopal (*Opuntia* spp) para su uso como complemento proteico animal. *Revista de Geografía Agrícola*, 2019(63): p. 87-100. <https://doi.org/10.5154/r.ga.2019.63.04>
- Herrera Torres, E., Murillo, M., Berumen, L., Soto-Cruz, N.O., y Páez-Lerma, J.B. Protein enrichment of *Opuntia ficus-indica* using *Kluyveromyces marxianus* in solid-state fermentation. *Ciencia e Investigación Agraria*, 2017. 44(2): p. 113-120. <https://doi.org/10.7764/rcia.v44i2.1767>
- Herrera-Torres, E., Murillo, M., Berumen, L., Páez, J., y Villarreal, G. Efecto de *Sacharomyces cerevisiae* y *Kluyveromices marxianus* durante el tiempo de fermentación en la calidad nutritiva del nopal forrajero. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 2014. 1(1): p. 33-40. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282014000100004&lng=es&tlng=es.

- Inácio, J.G., da Conceição, M.G., Dos Santos, D.C., de Oliveira, J.C.V., Chagas, J.C.C., de Oliveira Moraes, G.S., dos Santos Silva, E.T. y de Andrade Ferreira, M. (2020). Nutritional and performance viability of cactus *Opuntia*-based diets with different concentrate levels for Girolando lactating dairy cows. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 33(1), 35. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0916>
- Inzunza, H.D.J.L., García, B.C., León, O.L., Liera, J.E., López, M.L., Camacho, S.J., y Juárez, L.A. (2017). Digestibilidad *in situ* de rastrojo de maíz tratado con enzimas fibrolíticas. *Revista Ciencia y Agricultura*. 14(1): p. 31-37. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5966734>
- Kaewpila, C., Khota, W., Gunun, P., Kesorn, P., & Cherdthong, A. (2020). Strategic addition of different additives to improve silage fermentation, aerobic stability and *in vitro* digestibility of Napier grasses at late maturity stage. *Agriculture*, 10(7), 262. <https://doi.org/10.3390/agriculture10070262>
- Pereira, G.A., Santos, E.M., Araújo, G.G.L., Oliveira, J. S., Pinho, R.M.A., Zanine, A.D.M., Souza, A.F.N., Macedo, A.J.S., Neto, J.M.C., y Nascimento, T.V.C. (2019). Isolation and identification of lactic acid bacteria in fresh plants and in silage from *Opuntia* and their effects on the fermentation and aerobic stability of silage. *The Journal of Agricultural Science*, 157(9-10), 684-692. <https://doi.org/10.1017/S0021859620000143>
- Pereira, D.M., Santos, E.M., Oliveira, J.S., Santos, F.N.S., Lopes, R.C., Santos, M.A.C., Corrêa, Y.R., Justino, E.S., Leite, G.M., Gomes, P.G.B., Cruz, G.F.L., y Júnior, P.T. (2021). Effect of cactus pear as a moistening additive in the production of rehydrated corn grain silage. *The Journal of Agricultural Science*, 159(9-10), 731-742. <https://doi.org/10.1017/S002185962100099X>
- Pereira, G.A., Santos, E.M., de Oliveira, J.S., de Araújo, G.G.L., de Sá Paulino, R., Perazzo, A.F., de Farias, J.J., Neto, J.M.C., Lima, G.F., y Leite, G. M. (2021). Intake, nutrient digestibility, nitrogen balance, and microbial protein synthesis in sheep fed spineless-cactus silage and fresh spineless cactus. *Small Ruminant Research*, 194, 106293. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2020.106293>
- Ramírez-Arpide, F. R., Demirer, G. N., Gallegos-Vázquez, C., Hernández-Eugenio, G., Santoyo-Cortés, V. H., y Espinosa-Solares, T. (2018). Life cycle assessment of biogas production through anaerobic co-digestion of nopal cladodes and dairy cow manure. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2313-2322. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.180>
- Rezende, F.M., Vêras, A.S.C., Siqueira, M.C.B., Conceição, M.G., Lima, C.L., Almeida, M.P., Mora-Luna, R.E., Neves, M.L.M., Monteiro, C.C.F., y Ferreira, M.A. (2020). Nutritional effects of using cactus cladodes (*Opuntia stricta* Haw Haw) to replace sorghum silage in sheep diet. *Tropical Animal Health and Production*, 52(4), 1875-1880. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02213-w>
- Sánchez, H., Ochoa, G., Alfaro, R., y Peña, P. Evaluación de la capacidad forrajera de *Opuntia ficus*. *Manglar*, 2018. 14(2): p. 115-124.
- Santos, A.P.M.D., Santos, E.M., Araújo, G.G.L.D., Oliveira, J.S.D., Zanine, A.D.M., Pinho, R.M.A., Lima, C.G.F., Ferreira D.J., Perazzo, A.F., Pereira, D.M., y Santos, F. N.D.S. (2020). Effect of Inoculation with Preactivated *Lactobacillus Buchneri* and Urea on Fermentative Profile, Aerobic Stability and Nutritive Value in Corn Silage. *Agriculture*, 10(8), 335. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080335>
- Samir, M., Raul, B., y López, S. (2023). Potential of *Opuntia Ficus-Indica* Cladodes In M'sila (North ALGERIA) as feed for ruminants: chemical composition and *in vitro* assessment. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A—Animal Science*, 1-7.
- SIAP, Población ganadera: Información sobre el número de animales que se crían en el país con fines de producción, S.D.I.A.y. Pesquera, Editor. 2022: México.
- Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C.B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M.L., Calderón-Zavala, G., y Anaya-Rosales, S. Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, 2015. 49(1): p. 31-51.
- Mat, K., Taufik, H.A., Rusli, N.D., Hasnita, C.H., Al-Amsyar, S.M., Rahman, M.M., y Mahmud, M. (2020). Effects of fermentation on the nutritional composition, mineral content and physical characteristics of banana leaves. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 596, No. 1, p. 012089). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/596/1/012089>
- Ni, K., Wang, F., Zhu, B., Yang, J., Zhou, G., Pan, Y.I., Tao, Y. y Zhong, J. (2017). Effects of lactic acid bacteria and molasses additives on the microbial community and fermentation quality of soybean silage. *Bioresource Technology*, 238, 706-715. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.055>
- Torres-Ponce, R.L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M.D.L., y Nevárez-Moorillón, G.V. El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2015. 6(5): p. 1129-1142.
- Vastolo, A., Calabrò, S., Cutrignelli, M.I., Raso, G., y Todaro, M. (2020). Silage of Prickly Pears (*Opuntia* spp.) juice by-products. *Animals*, 10(9), 1716. <https://doi.org/10.3390/ani10091716>

