



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y SERVICIO EN ZOOTECNIA

POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL

INCLUSIÓN DE TUNA Y GRANO DE JAMAICA (*Hibiscus sabdariffa* L.) EN EL ENSILAJE DE NOPAL-PAJA DE AVENA

TESIS

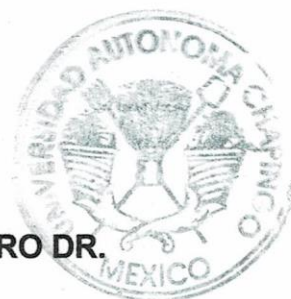
Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

Presenta:

FRANCISCO JAVIER CASTAÑEDA TRUJANO

Bajo la supervisión de: **LUIS ALBERTO MIRANDA ROMERO DR.**



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES



Enero, 2020
Chapingo, México.

Inclusión de tuna y grano de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) en el ensilaje de nopal-paja de avena

Tesis realizada por **FRANCISCO JAVIER CASTAÑEDA TRUJANO** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

DIRECTOR:



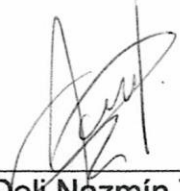
Dr. Luis Alberto Miranda Romero

ASESOR:



Dr. José Luis Zaragoza Ramírez

ASESOR:



Dra. Delí Nazmín Tirado González

CONTENIDO

Lista de cuadros.....	v
Lista de figuras.....	vi
Dedicatorias	vii
Agradecimientos	viii
Datos biográficos	ix
Resumen General.....	x
Abstract.....	xi
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1. Situación de la producción de esquilmos del cultivo de nopal.....	6
2.2. Efecto del nopal en el comportamiento productivo animal	7
2.2.1. Uso del nopal en la alimentación del ganado	8
2.2.2. Cosecha del nopal forrajero.....	8
2.3. Uso de diferentes tecnologías para conservación y aprovechamiento de los residuos del nopal y tuna en alimentación de rumiantes	9
2.4. El ensilado.....	11
2.4.1. Fase aeróbica	11
2.4.2. Fase de fermentación	12
2.4.3. Fase estable	12
2.4.4. Fase de deterioro aerobio.....	13
2.4.5. Cambios en la microflora durante el ensilado	13
2.5. Química del ensilado	15
2.5.1. Carbohidratos solubles en agua	15
2.5.2. Ácidos orgánicos	17

2.5.3. Compuestos nitrogenados	18
2.6. Comportamiento productivo de rumiantes alimentados con ensilado de nopal	18
2.7. Literatura citada.....	20
3. EFECTO DE LA TUNA Y GRANO DE JAMAICA EN ENSILADOS DE LA MEZCLA NOPAL-PAJA DE AVENA	27
3.1. Resumen	27
3.2. Abstract	28
3.3. Introducción	29
3.4. Materiales y métodos	30
3.4.1. Microsilos.....	30
3.4.2. Material vegetal	30
3.4.3. Tratamientos.....	31
3.4.4. Características organolépticas.....	31
3.4.5. Deterioración aeróbica.....	33
3.4.6. Nitrógeno amoniacal	33
3.4.7. Carbohidratos solubles	34
3.4.8. Ácido láctico.....	35
3.5. Resultados y discusión.....	36
3.5.1. Temperatura	36
3.5.2. Potencial Hidrógeno (pH).....	36
3.5.3. Evaluación organoléptica.....	38
3.5.4. Materia seca, humedad y lixiviados	38
3.5.5. Carbohidratos solubles	40

3.5.6. Ácido láctico.....	42
3.5.7. Nitrógeno amoniacal	42
3.5.8. Deterioración aerobia.....	43
3.6. Conclusiones.....	43
3.7. Literatura citada.....	44
4. TUNA Y GRANO DE JAMAICA EN LA FERMENTACIÓN <i>IN VITRO</i> DE ENSILADOS DE NOPAL–PAJA DE AVENA	48
4.1. Resumen.....	48
4.2. Abstract	49
4.3. Introducción.....	50
4.4. Materiales y métodos	51
4.4.1. Microsilos.....	51
4.4.2. Material vegetal	51
4.4.3. Tratamientos.....	51
4.4.4. Digestibilidad y fermentación ruminal <i>in vitro</i>	52
4.5. Resultados y discusión.....	54
4.5.1. Cinética de fermentación ruminal <i>in vitro</i>	54
4.5.2. Fracciones fermentables.....	56
4.6. Conclusiones.....	58
4.7. Literatura citada.....	59

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Porcentaje de los ingredientes para ensilados.....	31
Cuadro 2. Indicadores de propiedades organolépticas para la evaluación de ensilados de nopal.....	32
Cuadro 3. Promedios de lixiviados, CO ² , materia seca, evaluación organoléptica y temperatura del ensilado.....	36
Cuadro 4. Porcentajes promedio obtenidos de carbohidratos solubles, ácido láctico y nitrógeno de la materia vegetal antes y después del proceso de ensilado.....	41
Cuadro 5. Porcentaje de los ingredientes para ensilados.....	52
Cuadro 6. Parámetros de la cinética de producción de gas, obtenidos por la fermentación <i>in vitro</i> de ensilados de nopal-tuna-grano de jamaica.....	55
Cuadro 7. Parámetros de las fracciones fermentables, obtenidas por la fermentación <i>in vitro</i> de ensilados de nopal-tuna-grano de jamaica (g kg ⁻¹).....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cambios cualitativos de la microflora durante el cambio de pH por efecto del ensilaje (Woolford, 1984).....	14
Figura 2. Proceso de la fermentación de fructosa y glucosa por bacterias homofermentativas (Woolford, 1984).....	16
Figura 3. Proceso de la fermentación de fructosa y glucosa por bacterias heterofermentativas (Woolford, 1984).....	17
Figura 4. Cambios en el pH de los microsilos durante su fermentación.	37

DEDICATORIAS

Este trabajo está dedicado a las personas que siempre han creído en mí y me han brindado su apoyo y confianza desde el inició o cuando cruzamos caminos.

A **Javier Castañeda Mares** y **Ana Lilia Trujano Flores** mis padres, quienes son los pilares más importantes en mi vida, gracias por el esfuerzo que hicieron para brindarme estudios, por las palabras de apoyo que siempre tuvieron en los momentos difíciles, pero sobre todo gracias por siempre creer en mi y dejarme crecer en todos los ámbitos. **Los amo.**

A **Gaby** y **Manuel**, por siempre tener una mano dispuesta a apoyarme.

A mis sobrinos **Santi** y **Mateo**, por ser mi mayor motivación, espero sea un ejemplo de que pueden llegar a ser lo que sueñan, si nunca dejan de creer en ellos mismos.

A **Jime** por su amor y cariño incondicional, además por todo el apoyo y sus palabras de aliento siempre oportunas. Gracias por ser parte de esto, gracias por entrar en mi vida.

A mis amigos **Joel**, **Orlando**, **Rosalba** y **Citlali** por siempre brindarme su amistad y apoyo en los momentos difíciles.

Con cariño

Francisco

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo al otorgarme la beca para realizar mis estudios de maestría.

A mi alma mater, la Universidad Autónoma Chapingo, a través del Posgrado en Producción Animal del departamento de Zootecnia por brindarme la oportunidad de cumplir este objetivo profesional.

Al Dr. Luis Alberto Miranda Romero, no solo por dirigir este trabajo, sino también por el apoyo, las enseñanzas, los consejos y la motivación para realizarlo.

A mis asesores: Dra. Deli Nazmín Tirado González y José Luis Zaragoza Ramírez, por la dedicación, tiempo, esfuerzo y sugerencias, brindadas al presente trabajo con el fin de mejorarlo.

A los profesores del Posgrado en Producción Animal, por los invaluable conocimientos que me proporcionaron para mi formación profesional.

A Jime por las noches de desvelo que estuviste ahí conmigo en el laboratorio y por la sincera y siempre muy puntal ayuda en todo momento.

A Rosalba, Carmen y Laura por su amistad y apoyo brindado dentro del Laboratorio de Microbiología Pecuaria para la realización de los análisis.

A Orlando, Aldo, Luis, Agustín y José Antonio por su ayuda y apoyo a la realización de la fase de campo.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Francisco Javier Castañeda Trujano
Fecha de nacimiento	27 de junio de 1991
Lugar de nacimiento	Ciudad de México
CURP	CATF910627HDFSRR03
Profesión	Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia
Cédula Profesional	10157446

Desarrollo académico

2006 - 2009	Bachillerato General Escuela Preparatoria Texcoco (EPT)
2011 - 2015	Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia Departamento de Enseñanza Investigación y Servicio en Zootecnia Universidad Autónoma Chapingo.
2018 – 2019	Maestro en Ciencias en Innovación Ganadera Posgrado en Producción Animal Departamento de Enseñanza Investigación y Servicio en Zootecnia Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN GENERAL

Inclusión de tuna y grano de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) en el ensilaje de nopal-paja de avena

Con el objetivo de evaluar el efecto de la inclusión de tuna y grano de jamaica en las características del ensilaje, ensilado y fermentación ruminal *in vitro* de mezcla de nopal – paja de avena. Se elaboraron microsilos con capacidad de 3.1 kg de materia vegetal. Los tratamientos fueron seis: cinco mezclas de material a ensilar, constituidos por nopal (58, 60, 65, 74 y 78%), tuna (0, 11, 12, 18 y 24%), grano de jamaica (0, 9, 10, 17 y 23%) y paja de avena (0, 1, 5, 13, y 22%), y un ensilado de alfalfa como referencia. El ensilado se llevó hasta los 45 días y se midió pH, temperatura y cantidad de lixiviados a tiempos determinados. Se tomaron muestras al inicio y al final del ensilaje, en donde se midieron variables organolépticas, deterioración aeróbica por producción de CO², N-amoniacal, ácido láctico y carbohidratos solubles, además de las variables de la fermentación *in vitro*: volumen máximo (Vm, mL g⁻¹), tasa (S, h⁻¹) y fase Lag (L, h) de la producción de gas; la degradación *in vitro* de la materia seca (%DIV) y las fracciones fermentables (g kg⁻¹) rápida (FFR), media (FFM), lenta (FFL) y total (FFT). Al final del proceso de ensilaje, la cantidad de carbohidratos solubles fue menor y el ácido láctico mayor (P<0.05) (25.0 vs. 7.3% y 0.23 vs. 0.52%, respectivamente). La inclusión de tuna, incrementó el contenido de carbohidratos solubles, haciendo que el pH de los ensilados tuviera un mejor descenso, mientras que el grano de jamaica mejoró el ensilaje y la conservación de nutrientes. El proceso de ensilado no modificó sustancialmente el Vm (P<0.05) pero aumento la DIV. Respecto a las fracciones fermentables, la mezcla nopal-paja de avena tuvo la menor FFR (P<0.05), la alfalfa la mayor FFM (P<0.05), y la inclusión alta (23%) de grano de jamaica disminuyó la FFL (P<0.05). El proceso de ensilado disminuyó 5.8% la FFR de la alfalfa, comparada con la alfalfa sin ensilar, mientras que en la FFM disminuyó un 2.7%, en el caso de la mezcla con grano de jamaica (23%) la FFR disminuyó un 5.0%, mientras que la FFR 4.9%.

Palabras clave: cinética de fermentación, técnica de producción de gas, evaluación de ensilados.

Tesis de Maestría en Ciencias en Innovación Ganadera, Chapingo.

Autor: Francisco Javier Castañeda Trujano.

Director de tesis: Dr. Luis Alberto Miranda Romero.

ABSTRACT

Inclusion of prickly pear and jamaica grain (*Hibiscus sabdariffa* L.) in the cactus-oat straw silage

The objective was to analyze the effects of the inclusion of prickly pear and *Hibiscus sabdariffa* L. grain in the ensilaging process to improve the *in vitro* ruminal fermentation of cactus-oat straw silage. The experiment was performed in microsilos of 3.1 kg. Treatments included mixtures of 58, 60, 65, 74, and 78% of cactus, and 0, 11, 12, 18, and 24% of prickly pear, 0, 9, 10, 17, and 23% of *Hibiscus* grain, and 0, 1, 5, 13, and 22% of oat straw, alfalfa was ensiled to compare the further *in vitro* fermentation. During the 45 days of ensiling process, it was measured the pH, temperature and the quantity of leachates. Samples were taken at the beginning (SE) and at the end of the ensilaging process (E), and it was evaluated the color, smell, texture, humidity, aerobic deterioration (CO₂), N-ammonia, lactic acid, and soluble carbohydrates. In addition, maximum volume (Vm, mL g⁻¹), rate (S, h⁻¹) and Lag phase (L, h) of gas production; *in vitro* degradation of dry matter (% DIV) and fermentable fractions (g kg⁻¹) fast (FFR), medium (FFM), slow (FFL) and total (FFT) were evaluated during the *in vitro* fermentation. At the end of the ensilaging process, soluble carbohydrates reduced, and the lactic acid increased (25 vs. 7.3%, and 0.23 vs. 0.52%, respectively) (P<0.05). The inclusion of prickly pear increased the soluble carbohydrate content and reduced the pH of silage, *Hibiscus* grains improved the silage nutrient conservation, reducing the leaching, and improving the DM, without affecting the organoleptic characteristics. Although the ensilaging process did not affect the Vm (P<0.05), it increased the DIV. Regarding the fermentable fractions, the cactus-oat straw mixture had the lowest FFR (P<0.05), and alfalfa the highest FFM (P<0.05). The maximum inclusion (23%) of *Hibiscus* grains decreased the FFL (P<0.05). Silage decreased 5.8 and 5.0% FFR, 2.7 and 4.9% FFM the alfalfa and the mixture with the maximum dose of *Hibiscus* grains (23%).

Keywords: fermentation kinetics, gas production technique, silage evaluation.

Tesis de Maestría en Ciencias en Innovación Ganadera, Chapingo.
Autor: Francisco Javier Castañeda Trujano.
Director: Dr. Luis Alberto Miranda Romero.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

México es de los principales países productores de fruta y verdura de nopal en el mundo, siendo el cultivo de nopal una especie vegetal importante para la economía nacional (Griffith, 2004).

La producción de tuna en 2019 fue de 344,000 toneladas, con una superficie estimada sembrada de 53,000 ha, mientras que la superficie destinada a la producción de nopal verdura fue de 12,630 ha y con una producción de 796,953 toneladas (SIAP, 2019).

La producción de tuna en México se realiza en 17 estados, de los cuales los estados de México (41.4%), Zacatecas (20.2%) y Puebla (21.9%), concentran el 83.4% de la misma. Por su parte, el 46.1% de la producción de nopal verdura se realiza en el estado de Morelos (SIAP, 2019). No toda la producción de tuna y nopal verdura se logra comercializar, pues se estima que anualmente se desechan 83,784 toneladas de la de nopal verdura y 10 t ha^{-1} de nopal maduro, derivado de la poda por manejo de cultivo (Aranda, Segundo, Flores, & Cruz, 2008). La acumulación y mal manejo de estos residuos orgánicos del nopal trae consigo un impacto negativo en el ambiente (Yepes, Montoya, & Orozco, 2008), la cual no ha sido cuantificada.

Puesto que los cladodios del nopal son ricos en minerales (Torres, 2010), su descomposición en campo libera, además de compuestos orgánicos, calcio, fosfatos y otros minerales, los cuales, al ser lixiviados hacia los mantos freáticos, favorece la eutroficación de lagos y lagunas (Lozano-Rivas, 2012). Por otro lado, la descomposición anaeróbica de dichos residuos produce compuestos volátiles y metano; mientras que su descomposición aeróbica genera óxidos de nitrógeno (Kiss & Encarnación, 2006); ambos gases con fuerte impacto en el calentamiento global, 25 y 298 veces más que el CO_2 (Maqueda, Carbonell, Ramírez, & García, 2005; Rojas-Valencia, 2011). La descomposición de los desechos de nopal y tuna

también ocasionan plagas y enfermedades para los mismos cultivos de nopal (Altieri & Nicholls, 1994).

Existen alternativas de manejo de los desechos orgánicos, como el compostaje para reducir su impacto ambiental y obtener abono para la nutrición de plantas o como sustrato para la obtención de biogás (Cardona-Alzate, Sánchez-Toro, Ramírez-Arango, & Alzate-Ramírez, 2004; Tavares, Salinas, & Galicia, 2009); sin embargo, como el 80% de la MS del cladodio es materia orgánica y es 60 % digestible, puede ser aprovechado como alimento para animales. La inclusión de 15 a 30% de nopal en una dieta para ganado, ha mostrado disminuir los costos de producción de carne entre 48 a 65% (Aranda et al., 2008).

Se han investigado diversas tecnologías para el manejo de nopal como ingrediente alimenticio en rumiantes, tales como la elaboración y formulación de bloques multinutricionales (Mejía-Haro, Delgado-Hernández, Mejía Haro, Guajardo-Hernández, & Valencia-Posadas, 2011), la deshidratación y molido del cladodios (Díaz-Ayala, Álvarez-García, & Sima-Moo, 2015), la fermentación sólida y semisólida (Pandey, 2003) y, el ensilado del nopal (Vázquez, 2016).

A pesar de que se han obtenidos buenos resultados en el uso de nopal como alimento para rumiantes (Gebremariam, Melaku, & Yami, 2006), algunas de éstas tecnologías son difíciles de implementar por su costo y falta de maquinaria y equipo para su manejo y conservación. Dado que el nopal y la tuna de desecho contienen poco más del 80% de humedad y el proceso de ensilaje requiere entre 60 y 70% de humedad, el objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de la inclusión de grano de jamaica en el ensilaje de nopal-tuna y la digestibilidad y fermentabilidad ruminal *in vitro*, para saber si resulta ser una alternativa tecnológica útil para la conservación y manejo de los residuos del cultivo de nopal, en la alimentación de rumiantes. El ensilaje consiste en conservar entre 1 a 5 años, la calidad nutritiva del alimento por medio de su acidificación por fermentación anaeróbica (Noguer & Valles , 1977).

La semilla de la jamaica también es un residuo de cosecha que contiene alta proporción de materia seca (92.5%), proteína (20.5%) y extracto etéreo (17.9%) (Jínez, Cortés, Ávila, Casaubon, & Salcedo, 1998), por lo cual tiene potencial para usarse como grano alimenticio.

La inclusión del grano de la jamaica para el ensilaje de tuna y nopal puede ser útil para regular la humedad y balancear la composición nutricional para obtener un ensilado de alta calidad fermentativa y nutritiva. Sin embargo, no se ha estudiado el efecto de la inclusión del grano de jamaica en la calidad nutritiva y fermentativa de los ensilados de nopal-tuna.

Literatura citada

Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (1994). Biodiversity and pest management in agroecosystems. In: *Biodiversity and pest management in agroecosystems* (p. 240).

Aranda O., G., Segundo E., M., Flores V., C., & Cruz M., M. (2008). Inclusión de nopal en dietas de finalización para corderos de pelo. In: *Memorias de la XXXVI Reunión anual de la Asociación Mexicana de Producción Animal A. C. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León.*

Cardona-Alzate, C. A., Sánchez-Toro, O. J., Ramírez-Arango, J. A., & Alzate-Ramírez, L. E. (2004). Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 2, 78–89.

Díaz-Ayala, F., Álvarez-García, G. del S., & Sima-Moo, E. (2015). Drying kinetics of slices of nopal (*Opuntia ficus indica*) cladodes in a convective transversal flow dryer. *Agrociencia*, 49, 845–857.

- Gebremariam, T., Melaku, S., & Yami, A. (2006). Effect of different levels of cactus (*Opuntia ficus-indica*) inclusion on feed intake, digestibility and body weight gain in tef (*Eragrostis tef*) straw-based feeding of sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 131(1–2), 43–52. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2006.02.003
- Griffith, M. P. (2004). The origins of an important cactus crop, molecular evidence. *American Journal of Botany*, 91(11), 1915–1921.
- Jínez, T., Cortés, A., Ávila, E., Casaubon, M. T., & Salcedo, R. (1998). Efecto de niveles elevados de semilla de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) en dietas para pollos sobre el comportamiento productivo y funcionamiento hepático. *Veterinaria México*, 29, 7.
- Kiss, G., & Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de los residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica* 79, 39–40.
- Lozano-Rivas, W. A. (2012). Uso de Extracto de Figue (*Furcraea* sp.) como Coadyuvante de Coagulación en Tratamientos de Lixiviados. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 28, 219–227.
- Maqueda-González, M. R., Carbonell-Padrino, M. V., Ramírez-Martínez, E., & García-Flórez, M. (2005). Fuentes de emisión de gases de efecto invernadero en la agricultura. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 2(2), 14–18.
- Mejía-Haro, J., Delgado-Hernández, J. L., Mejía, I.H., Guajardo-Hernández, I., & Valencia-Posadas, M. (2011). Efectos de la suplementación con bloques multinutricionales a base de nopal fermentado sobre la ganancia de peso de ovinos en crecimiento. *Acta Universitaria*, 21, 11–16.
- Noguer M, J. M., & Valles, C. A. (1977). El ensilado y sus ventajas. *Extensión Agraria*, 2(1), 1–16.

- Pandey, A. (2003). Solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 13, 81–84.
- SIAP. (2019). Avance de siembras y cosechas resumen por estado. Retrieved from:
http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do Consultado 5 abril 2019
- Tavares, M. E., Salinas, E., & Galicia, S. (2009). Elaboración de composta orgánica para productores de nopal, como alternativa para el cuidado del ambiente. *Revista Arbitradas*, 7, 3–9.
- Torres, S. A. (2010). Composición química del nopal y sus implicaciones en la nutrición de rumiantes. In: *IX Simposium-taller internacional de producción y aprovechamiento del nopal y el maguey*. Nuevo León, Noviembre, 2010.
- Vázquez M., P. (2016). Aprovechamiento del Nopal y Tuna en la Alimentación de Ovinos. Tesis Doctoral. *Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México*. 93 p.
- Yepes, S. M., Montoya Naranjo, L. J., & Orozco Sánchez, F. (2008). Valorización de residuos agroindustriales – frutas – en Medellín y el sur del valle del Aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61(1), 4422–4431.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Situación de la producción de esquilmos del cultivo de nopal

México es el mayor productor de fruto (tuna) y cladodio tierno (verdura) de nopal para consumo humano. Se estima que para los dos sistemas de cultivo (tuna y nopal verdura) se destina una superficie poco mayor a las 100,000 hectáreas (SIAP, 2019). El 95% de la producción de ambos cultivos se concentra en ocho estados del centro de la república (Distrito Federal, Estado de México, Morelos, San Luis Potosí, Jalisco, Aguascalientes, Hidalgo, Puebla).

Los sistemas de producción de tuna y nopal verdura, son semi intensivos o intensivos, con densidades que van de 15,000 a 60,000 plantas por hectárea, y en cuyo manejo agronómico se realizan anualmente podas de cladodios maduros con fines sanitarios, para regular el tamaño de la planta y permitir su manejo, y para estimular el rebrote y la producción.

El material vegetal resultado de la poda, por lo regular se deja tirado en el campo o amontonado en algún sitio del campo asignado (como cárcavas) para su descomposición. No existen estudios que determinen la cantidad real de cladodio podado y su impacto ambiental como contaminante de mantos friáticos por sales, de gases de efecto invernadero (metano y óxidos de nitrógeno) o como fuente de plagas y enfermedades. De acuerdo con otros tipos de estudios sobre nopal, se puede considerar que el peso fresco medio del cladodio de la poda es de aproximadamente de 850 g, y que al menos se poda un cladodio por planta, esto nos permite estimar que la cantidad de esquilmo del cultivo varía entre 12 y 51 toneladas por hectárea, según la densidad de plantas, equivalente a 1 a 5 toneladas de materia seca.

Puesto que en cinco de los estados productores de tuna y nopal verdura, también se concentra buena parte de la producción de ovinos (Hidalgo, Estado de México, San Luis Potosí, Puebla, Jalisco), el uso de tales esquilmos del cultivo de nopal,

tiene potencial para ser utilizado como alimento en los sistemas de producción de ovinos, para lo cual es necesario el desarrollo sistemas tecnológicos de producción ovina, que incluyan la conservación y manejo del nopal de desecho como ingrediente alimenticio.

2.2. Efecto del nopal en el comportamiento productivo animal

Las sequías recurrentes asociadas con la escasez de alimento han impulsado al uso de nopal para la alimentación animal; no obstante, la productividad de los cultivos de nopal forrajero es baja e inestable, dependiendo fuertemente del clima, condiciones del terreno, manejo, variedad, vigor de las pencas y del clima. En estas circunstancias, el rendimiento del cultivo varía de 25 a 125 t ha⁻¹, a partir de estos rendimientos se asume que el 75 – 80% de la masa aérea es lo que puede ser cosechada y utilizada para la alimentación del ganado (Martínez & Lara, 2003).

Existen diferentes sistemas de producción de nopal, desde la replantación de nopaleras silvestres hasta la producción intensiva de nopal forrajero; sin embargo, estas plantaciones a veces se pierden por completo, debido a la complejidad que tiene los sistemas de producción, los cuales son generalmente establecidos en suelos pobres, además de tener un manejo deficiente (Flores-Hernández, Araújo-Filho, Gomes da Silva, Ramírez-Ordoñez, & Murillo-Amador, 2017).

El nopal ha pasado a formar parte de la dieta del ganado, debido a que es un recurso forrajero en tiempos de sequía, capaz de proveer energía digestible, agua y vitaminas, no solo para rumiantes, ya que también ha sido utilizado como forraje para cerdos. A pesar de esto, el nopal debe ser complementado con diferentes ingredientes para poder tener una dieta balanceada, ya que el nopal es deficiente en proteína (Gutiérrez et al., 2009).

2.2.1. Uso del nopal en la alimentación del ganado

El nopal en México se ha utilizado para disminuir los costos de producción de carne de bovino, Aranda et al. (2008) obtuvieron una disminución del costo de la carne entre un 48 y 65 % en dietas que llevaban entre 15 y 30% de nopal picado.

Los cladodios de nopal se comportan como cualquier otro forraje. Conforme la edad del cladodio aumenta, su contenido de materia seca y fibra aumenta, mientras que el de proteína cruda disminuye (Ben-Salem & Nefzaoui, 2018). Además, los cladodios poseen entre el 85 y 90% de humedad, y 20% de cenizas en base seca. Su digestibilidad es comparable a la de un buen forraje (Vázquez, 2016).

El contenido de nutrientes que contiene el cladodio depende mucho de la variedad, el manejo y las condiciones en las que se encuentre la planta, como se ha mencionado a pesar de que su contenido de proteína no es alto, el nopal constituye una fuente de alimento para el ganado a un costo relativamente bajo (Salem & Nefzaoui, 2003). Tal variación de nutrimentos hace imprescindible analizar la composición química de las pencas, para formular la dieta para animales.

2.2.2. Cosecha del nopal forrajero

La cosecha de nopal depende de varios aspectos, como el terreno, la mano de obra, el contenido de espinas de nopal, entre otras, dando como resultado diferentes maneras para obtenerlo por parte de los productores. Las variantes observadas en las explotaciones son: 1) consumo directo, esta práctica es muy eficiente y sobre todo barata; sin embargo, implica el consumo casi por completo de la planta (cladodios con espinas), pudiendo causar daños a los animales; 2) despunte, consiste en quitar los cladodios más altos en donde se encuentran la mayor cantidad de espinas, para que los animales puedan consumir el resto; sin embargo, esto implica un gran desperdicio de material vegetal; 3) chamuscado en pie, consiste en someter a las pencas al fuego de un quemador para retirar las

espinas (puede causar alteraciones en la calidad del cladodio) para que después los animales puedan consumirlo; y 4) chamuscado y picado *in situ*, igualmente los cladodios son sometidos a fuego, al terminar son cosechados y picados por los productores, para después ser ofrecidos a los animales (López, Fuentes, & Rodríguez, 2003).

2.3. Uso de diferentes tecnologías para conservación y aprovechamiento de los residuos del nopal y tuna en alimentación de rumiantes

Es importante destacar que ningún método de conservación del forraje aumenta la calidad del alimento. Si acaso encontramos beneficios a nivel de consumo de materia seca como ocurre con los productos de henificados. No obstante, con base en el conocimiento de la relación inversa existente entre la edad de la planta y la calidad del forraje, hay ventajas importantes al cosechar cuando abunda y sobre todo cuando mantiene altos niveles de nutrientes digestibles que se reducirían en las plantas si siguen madurando (Esperance & Ojeda, 1997).

Los objetivos básicos de la conservación del forraje son: 1) asegurar la disponibilidad de alimento para el ganado en las épocas críticas donde no hay condiciones favorables para el crecimiento vegetal; y 2) mantener al máximo la calidad del forraje producido; y facilitar el almacenamiento y el transporte del forraje.

La conservación de forrajes se basa en los principios que rigen la conservación de alimentos. Dichos principios inhiben el desarrollo de los microorganismos descomponedores, mediante el establecimiento de condiciones adversas:

- Refrigeración: la aplicación de frío disminuye el desarrollo y la proliferación de microorganismos, reduciendo el tamaño de la población, siendo este un método eficiente, pero de muy alto costo, además de demandar un espacio muy grande para el almacenamiento de la materia vegetal y de las instalaciones (Fernández, 2005).

- **Deshidratación:** la eliminación del agua en los alimentos también elimina las condiciones favorables para el desarrollo de microorganismos, asegurando la conservación de la materia vegetal, entre los métodos de conservación se encuentran la henificación, el cual es el método más utilizado para la conservación del forraje, principalmente de leguminosas; el método consiste en deshidratar el forraje a niveles de 15 – 20% de humedad, una variable de esta es el henilaje, el cuál es un método mixto entre la deshidratación parcial de la materia vegetal y el almacenamiento en silos, sin que alcancen grandes niveles de fermentación, conservando la materia (Amella, Ferrer, Maestro, & Broca, 2011). Entrando en la clasificación de deshidratado también podemos destacar la harina de nopal, para la cual se tiene que realizar un picado de los cladodios, los cuales deben tener un tamaño de 2 cm de espesor, esto permite tener un secado más rápido y homogéneo, el secado de industrial se lleva a cabo en estufas tomando de 4 a 6 horas, mientras que de manera tradicional (secadas al sol) se lleva entre 10 y 15 días (utilizando gran cantidad de mano de obra), por último se necesita moler el nopal seco para posteriormente reservarlo (Castillo, Estrada, Margalef, & Tóffoli, 2011).
- **Acidificación:** algunos microorganismos son sensibles a las condiciones ácidas producidas por alguna fermentación anaerobia, como es el caso del ensilado o de la sopa de nopal.

El ensilaje es el proceso por medio del cual la materia vegetal se somete a condiciones anaerobias y esta materia es atacada por microorganismos anaerobios bajo condiciones anaerobias, obteniendo materia vegetal acidificada (Woolford, 1984). Con excepción del heno en pie, el ensilaje es la forma más barata para la conservación del forraje.

- **Fermentación:** se ha utilizado la fermentación sólida o líquida en sus dos maneras, aerobia y anaerobia, en donde las moléculas de glucosa son degradadas por acción enzimática, dando lugar a una mejor digestibilidad de la materia vegetal, incrementando la cantidad de proteína del sustrato, debido a la

biomasa microbiana o a la concentración de la proteína que se encuentra en la materia vegetal a medida que se van consumiendo los carbohidratos (Day & Morawicki, 2018). La fermentación sólida se caracteriza por llevarse a cabo en ausencia o cercano a la ausencia de agua libre; sin embargo, la materia vegetal debe contener cierta humedad para ayudar a la proliferación de los microorganismos, siendo los hongos los que desempeñan un papel clave (Pandey, 2003). Por otra parte, la fermentación líquida es un proceso que se lleva a cabo en presencia de abundante agua, la importancia de esta fermentación es que los esquilmos, bagazos, residuos agroindustriales y forrajes con alto contenido de humedad y bajo contenido nutricional pueden ser aprovechados y transformados en alimentos o complementos para la nutrición animal (Hansen, Lübeck, Frisvad, Lübeck, & Andersen, 2015).

2.4. El ensilado

En la ganadería, los forrajes son cosechados cuando el rendimiento y el valor nutritivo alcanzan su máximo para ensilarse y asegurar el suministro de alimento para el año. El ensilado es utilizado para sistemas de producción intensivo, semi intensivo y estabulado (Burgess, Misener, McQueen, & Nicholson, 1989). El ensilaje es un proceso de fermentación anaeróbica del material vegetal de alta humedad, con el objetivo de conservar por un largo período el valor nutritivo del forraje durante su almacenamiento. En este proceso las bacterias ácido lácticas fermentan anaerobiamente los carbohidratos solubles del forraje, acidificando la masa de forraje compactada e inhibiendo la actividad de las células tanto vegetales como microbianas (Day & Morawicki, 2018). Este proceso de ensilaje se divide en cuatro fases (Weinberg & Muck, 1996), aeróbica, fermentación, estable y deterioro aerobio.

2.4.1. Fase aeróbica

Es una fase de corta duración, en donde el poco oxígeno que quedo entre la materia vegetal es consumido rápidamente por los microorganismos aerobios y

aerobios facultativos (levaduras y enterobacterias); cuya presencia es indeseable, ya que fermentan azúcares produciendo etanos y CO₂, lo que crea una disminución en la producción de ácido láctico, evitando el descenso del pH y promoviendo el crecimiento de microorganismos indeseables. El desarrollo de enterobacterias en el ensilado es perjudicial, ya que compiten con las bacterias productoras de ácido láctico por los carbohidratos solubles disponibles en el ensilado; además, degradan la proteína, causando una reducción en la calidad del valor nutritivo del ensilaje (McDonald, McFeeters, Daeschel, & Fleming, 1987; Schlegel, 1987).

2.4.2. Fase de fermentación

Inicia al tener un ambiente completamente anaerobio. Si la fermentación anaerobia se lleva de manera exitosa, las bacterias ácido-lácticas proliferan, convirtiéndose en la población dominante, bajando la concentración de pH entre 5 y 3.5, con la ayuda de otros ácidos. Estas bacterias pertenecen a los géneros: *Lactobacillus*, *Pediococcus*, *Leuconostoc*, *Enterococcus*, *Lactococcus* y *Streptococcus*, las cuales pueden vivir a temperaturas entre 5 y 50 °C, capaces de bajar el pH a un valor entre 4 y 5 dependiendo de las cepas y de las características del cultivo, como carbohidratos solubles, contenido de materia seca, composición de los azúcares (Pandey, 2003; Singhania, Sukumaran, Patel, Larroche, & Pandey, 2010)

2.4.3. Fase estable

Los microorganismos que crecieron en la fase de fermentación reducen su presencia, algunos microorganismos acidófilos sobreviven y algunos otros forman esporas. Solo algunas enzimas degradadoras de proteína y de carbohidratos siguen activos, pero a un menor ritmo. Las bacterias ácido-tolerantes son indeseables en la fase estable, ya que pueden iniciar una deterioración en el ensilado.

El género *Clostridium* es anaerobio y puede fermentar carbohidratos y proteínas, por lo cual disminuye el valor nutritivo del ensilado. Los bacilos son bacterias aerobias facultativas que fermentan un amplio rango de carbohidratos, produciendo ácidos orgánicos, etanol, 2-3 butanodiol o glicerol; incluso algunas especies pueden llegar a producir sustancias fungicidas, las cuales se han utilizado para detener el proceso de descomposición aerobio del ensilado; sin embargo, a excepción de estas especies de bacilos, el desarrollo de bacilos en el ensilado es considerado como indeseable, debido a que son menos eficaces como productores de ácido láctico y acético comparado con las bacterias ácido lácticas, además de incrementar el deterioro aerobio (Lindgren, Pettersson, Kaspersson, Jonsson, & Lingvall, 1985).

2.4.4. Fase de deterioro aerobio

Se presenta al abrir los silos y exponer la materia vegetal al aire al momento de su empleo, ésta fase se puede subdividir en dos etapas, la primera se debe al inicio de la degradación de los ácidos orgánicos, causando un aumento el pH, lo que da paso a la segunda etapa de deterioro, donde se presenta un aumento en la temperatura y en la actividad de microorganismos aerobios que deterioran en ensilado, como enterobacterias y mohos, éstos últimos pueden disminuir drásticamente el valor nutricional del ensilado, además de disminuir la palatabilidad y puede ser un riesgo para la salud de los animales (Lindgren et al., 1985).

2.4.5. Cambios en la microflora durante el ensilado

En una secuencia regular en las primeras fases de ensilado tenemos que las enterobacterias se reproducen hasta cerca del quinto día, después empiezan a decaer las unidades formadoras de colonias. Durante este periodo son reemplazados periódicamente por *Lactococcus* (*Enterococos*, *Leuconostocs* y *Pediococcus*), de igual manera éstos son reemplazados por lactobacilos de lento

crecimiento, que son mayores productores de ácido láctico (Weissbach & Gordon, 1992).

En las primeras fases del ensilado puede haber dos desviaciones (Figura 1), dependiendo de diversos factores, tales como: capacidad de sobrevivencia de los microorganismos, capacidad de adaptabilidad al pH ácido de los ensilados, y el antagonismo que presentan los microorganismos (Nilson & Nilson, 1965).

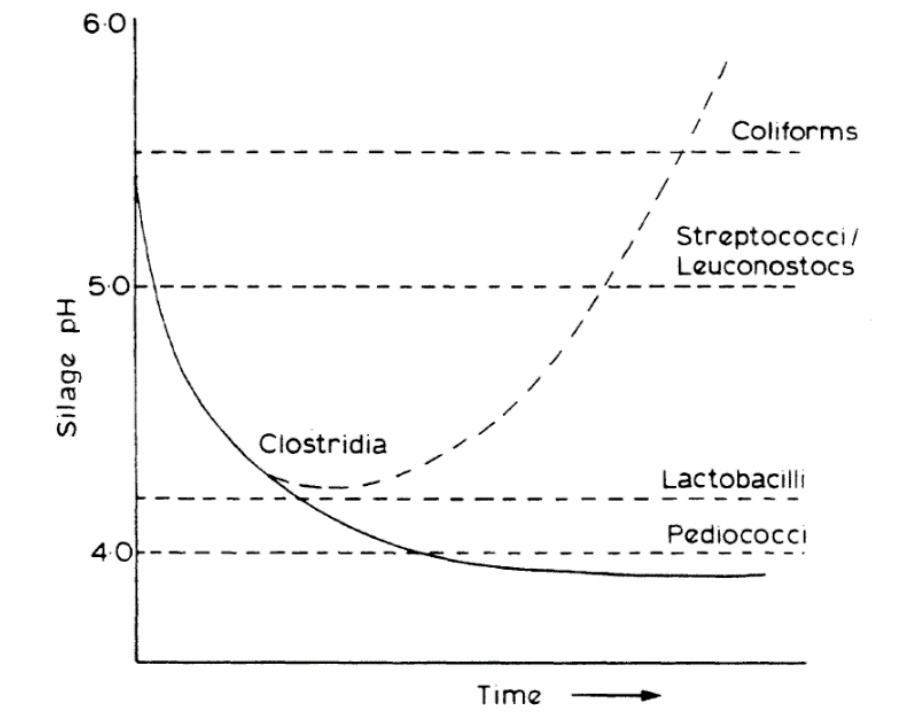


Figura 1. Cambios cualitativos de la microflora durante el cambio de pH por efecto del ensilaje (Woolford, 1984).

En las fases tardías de ensilado, el pH es un indicador confiable sobre el posible desarrollo microbiano, ya que las bacterias ácido-lácticas siguen produciendo ácido, aun cuando la población va en descenso. La fermentación del ácido láctico a butirato es la causa principal de deterioro en el ensilaje, éstas condiciones dan paso a la proliferación de clostridia proteolítica (Woolford, 1990).

Podríamos pensar que un ensilado de calidad tendría una alta cantidad de bacterias ácido-lácticas, y un ensilado de mala calidad tendría una dominancia de clostridia; sin embargo, no es así, las poblaciones de bacterias ácido-lácticas y algunos otros microorganismos pueden ser las mismas en ensilados de buena y mala calidad (Weissbach & Gordon, 1992).

2.5. Química del ensilado

Son tres los principales compuestos básicos del forraje que son sometidos a cambios químicos durante el ensilado, que tiene relevancia para el proceso de ensilaje y su eficiencia. Estos compuestos fundamentales son los carbohidratos solubles, ácidos orgánicos y compuestos nitrogenados (McDonald et al., 1987).

2.5.1. Carbohidratos solubles en agua

La glucosa, fructosa, sacarosa y los fructanos son los principales azúcares contenidos en los forrajes, cuyos monómeros son rápidamente hidrolizados durante el proceso de ensilado, siendo la fructosa y lactosa los carbohidratos más importantes para la fermentación.

Al iniciar el proceso de ensilaje, las bacterias ácido-lácticas empiezan a utilizar los carbohidratos que no fueron aprovechados por la respiración de las plantas ni por los microorganismos aerobios, en tanto se establecen las condiciones anaerobias propias de los ensilados.

Con la fermentación homoláctica, 1 mol de fructosa o glucosa es transformado a 2 moles de lactato por la vía de Embden – Meyerhoff (Figura 2) (Kandler, 1983). Con la fermentación heteroláctica los productos, además del lactato, son manitol, acetato y CO₂, la transformación ocurre por medio de la vía de pentosa monofosfato vía descrita en la Figura 3. Cuando la fructosa es utilizada como sustrato, el manitol y el acetato toman el lugar del etanol formado en la fermentación, hay que tomar en cuenta que la producción de ácido es más baja

con la fructosa que con la glucosa, y se tiene un ácido más débil producido por medio de la fermentación heteroláctica que con la fermentación homoláctica.

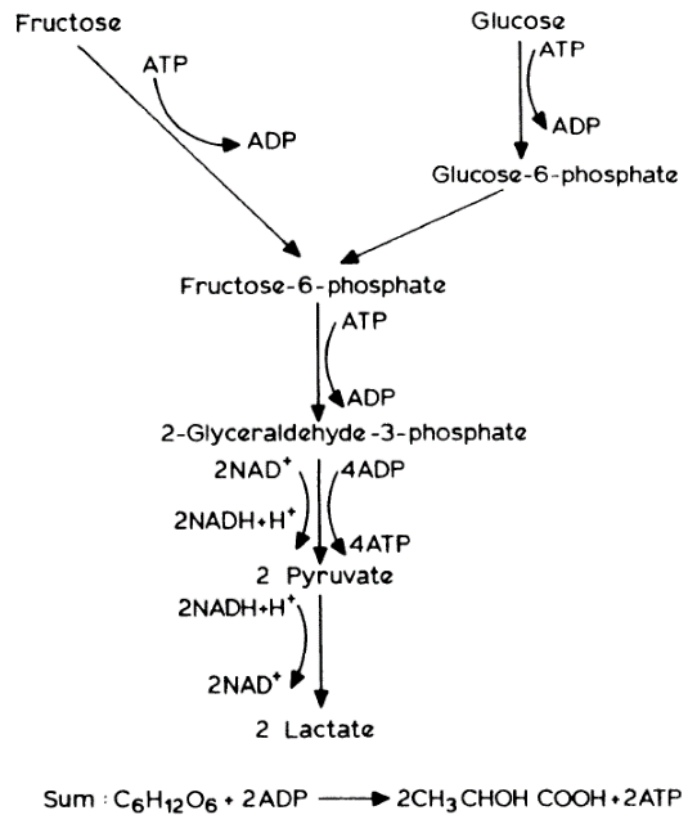


Figura 2. Proceso de la fermentación de fructosa y glucosa por bacterias homofermentativas (Woolford, 1984).

Es una desgracia que la fermentación heteroláctica de la fructosa es menos eficiente que la misma glucosa en términos de producción de ácido, ya que la presencia de esta en pastos es de 3:1 y de 1:5 en maíz (Jaster, 1995).

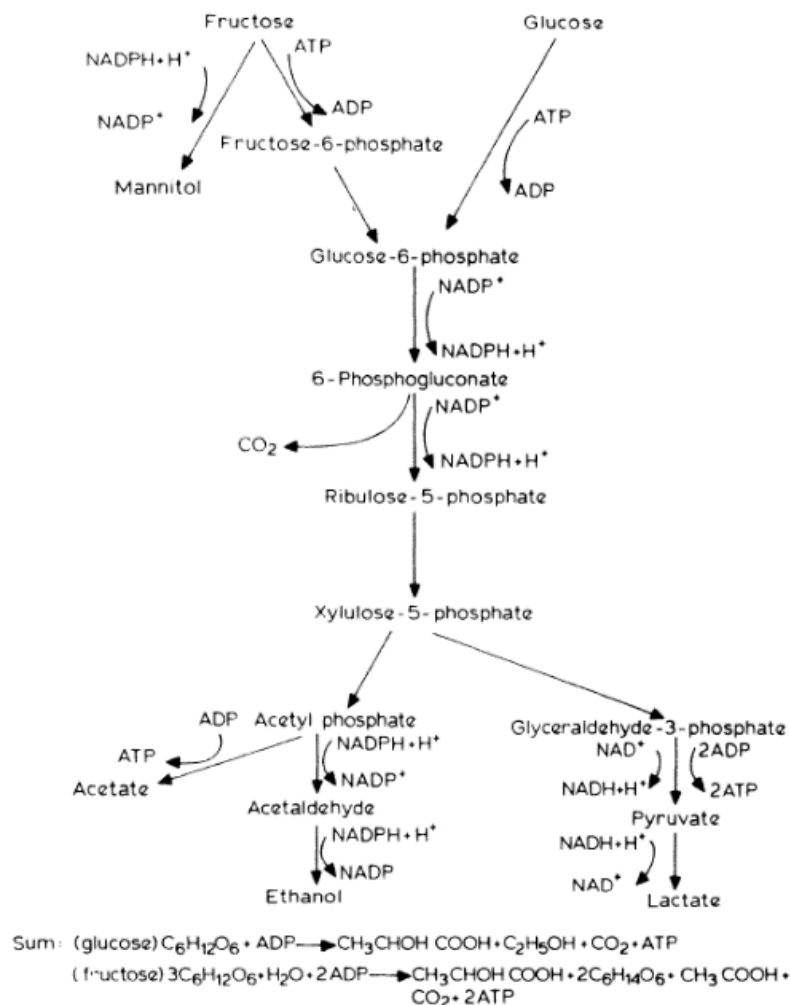


Figura 3. Proceso de la fermentación de fructosa y glucosa por bacterias heterofermentativas (Woolford, 1984).

2.5.2. Ácidos orgánicos

Existen diferentes ácidos orgánicos presentes en los cultivos; sin embargo, predomina el ácido cítrico y el málico, estos ácidos tienen una influencia significativa en la fermentación del ensilado, ya que, junto con sus sales y *buffers* naturales, amortiguan la caída del pH, manteniéndolo entre 6 y 4. El ácido cítrico y málico son productos que se metabolizan rápidamente en el ensilado; no obstante, el marchitamiento promueve la desaparición de estos ácidos, ya que prolonga el catabolismo de las enzimas de la planta.

Es difícil predecir que ruta tomarán los componentes de un ácido, debido a las diferentes desviaciones que puede tomar. Sin embargo, podemos decir que la producción de ácido láctico y málico en el ensilado es beneficioso, ya que estos ácidos contrarrestan las propiedades *buffer* de los forrajes, volviendo al ensilado entre tres y cuatro veces más ácido que el forraje original. Por otra parte, la pérdida de materia seca en forma de CO₂ puede ser considerable (Pahlow & Honig, 1993).

2.5.3. Compuestos nitrogenados

Inmediatamente después del corte de las gramíneas y leguminosas se presenta una proteólisis, causada principalmente por las enzimas de la planta misma. No obstante, durante el ensilado la actividad proteolítica continúa, de hecho, un 60% de la proteína falla en sobrevivir el proceso de ensilaje. Generalmente la cantidad de nitrógeno volátil en el ensilado es considerada como un indicador del grado de desaminación y esto es relacionado cercanamente con el pH. Solo algunas bacterias ácido-lácticas son consideradas por tener una leve, casi nula acción proteolítica. Estas; sin embargo, son capaces de fermentar aminoácidos, aunque esta capacidad solo la tienen las bacterias más parecidas a clostridia, solo arginina y serina son atacadas en un grado significativo. Clostridia por su parte puede fermentar aminoácidos por tres mecanismos: desaminación, descarboxilación y óxido-reducción (Umaña, Staples, Bates, Wilcox, & Mahanna, 1991).

2.6. Comportamiento productivo de rumiantes alimentados con ensilado de nopal

Durante el siglo XVIII, el nopal y el maguey eran utilizados como forraje, una vez cortados, los ganaderos se los daban como alimento al ganado (Flores & Aranda-Osorio, 1997). La importancia del nopal como forraje fue el resultado de la necesidad de alimentar al ganado en zonas áridas y semi-áridas de México, donde las temporadas de sequías son prolongadas.

El ganado, sobre todo caprinos y ovinos, consumen nopal casi todo el año en el norte de México, los ganaderos queman las espinas de las pencas, para hacer accesibles el recurso vegetal a sus animales (Vázquez-Alvarado, Valdez-Cepeda, Gutiérrez-Ornelas, & Blanco-Macias, 1992), aunque ocasionalmente el nopal puede incluirse de diferentes maneras en las dietas, ya sea seco y molido e incorporado en la en una dieta balanceada (Aguilar-Yáñez et al., 2011). Otras alternativas de la inclusión de nopal en la dieta de los rumiantes es el enriquecimiento en proteína del nopal por medio de la inoculación de microorganismos. *Saccharomyces cerevisiae* incrementa de 4.4 hasta un 10.4 %, al incubar el nopal durante seis horas a temperatura ambiente (Araújo, Silva, Brito, Oliveira, & Santos, 2008).

La principal causa que limita el consumo de nopal en los rumiantes es su alto contenido de agua (Andrade-Montemayor, Cordova-Torres, García-Gasca, & Kawas, 2011). Flores y Aguirre (1992) mencionan que, al disminuir la concentración de agua en el nopal, 99, 77 y 12 %, los animales también empiezan a tener un consumo de agua mayor en el bebedero. Esto es similar en los bovinos, aunque los borregos y cabras son mucho más eficientes para llenar sus requerimientos de agua a partir del nopal, por dos razones: 1) las excretas de ovinos y caprinos contienen mayor materia seca, y 2) porque consumen mayor cantidad de alimento en relación con su peso vivo que los bovinos.

Gutiérrez et al. (2009) observaron consumos diarios de nopal que variaron de 500 a 600 g de materia seca (3.8 a 4.6 kg base húmeda), en machos adultos con un peso vivo de aproximadamente 50 kg. El nopal representó el 56 % de la dieta. Al comparar el consumo de materia seca de animales alimentados con dietas que contenían nopal, contra los de aquellos alimentados por la dieta testigo, se observó que los animales que recibieron nopal consumieron un 58 % más de materia seca (630 vs. 1000 g animal⁻¹ día⁻¹). La carne de caprinos alimentados con nopal presenta una mayor proporción de ácidos grasos insaturados y en especial ácido linoléico (Atti, Mahouachi, & Rouissi, 2006).

El ensilaje por otra parte, es una alternativa de conservación del nopal y su fruto, la tuna. Çürek y Özen (2004) evaluaron la calidad del ensilado de cladodios de nopal, jóvenes y viejos, para la alimentación animal, encontrando una menor cantidad de materia seca y proteína (20% MS y 2.1% PC) que la encontrada en el maíz (26% MS y 6%PC), concluyendo en que el ensilado de nopal podría ser una alternativa viable para el uso en la nutrición del ganado, llegando a ser competitivo en una ración integral y balanceada del alimento ofrecido a los animales (Gebremariam et al., 2006).

2.7. Literatura citada

- Aguilar-Yáñez, M. I., Hernández-Mendo, O., Guerrero-Legarreta, I., Ramírez-Bribiesca, J. E., Aranda-Osorio, G., & Crosby-Galván, M. M. (2011). Productive response of lambs fed with fresh or dehydrated spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* L.). *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 13, 23–35.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (1994). Biodiversity and pest management in agroecosystems. Boca Raton CRC Press.
- Amella, A., Ferrer, C., Maestro, M., & Broca, A. (2011). Henificación en la depresión media prepirenaica; producciones, mermas y calidad. *Pastos y Forrajes*, 12, 77–91.
- Andrade-Montemayor, H. M., Cordova-Torres, A. V., García-Gasca, T., & Kawas, J. R. (2011). Alternative foods for small ruminants in semiarid zones, the case of Mesquite (*Prosopis laevigata* spp.) and Nopal (*Opuntia* spp.). *Small Ruminant Research*, 98, 83–92.

- Aranda O., G., Segundo E., M., Flores V., C., & Cruz M., M. (2008). Inclusión de nopal en dietas de finalización para corderos de pelo. In: *Memorias de la XXXVI Reunión anual de la Asociación Mexicana de Producción Animal A. C. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León. Octubre 2008*
- Araújo, F. L., Silva, F. L., Brito, E. A., Oliveira, S., & Santos, E. S. (2008). Protein enrichment of cactus pear with *Saccharomyces cerevisiae* for ruminants feeding. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinaria e Zootecnia*, 60, 401–407.
- Atti, N., Mahouachi, M., & Rouissi, H. (2006). The effect of spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* F. *inermis*) supplementation on growth, carcass, meat quality and fatty acid composition of male goat kids. *Meat Science*, 73, 229–235.
- Ben-Salem, H., & Nefzaoui, A. (2018). Opuntia forraje estratégico y herramienta eficiente para combatir la desertificación en la región wana. In: *Cuaderno Técnico de La FAO. Viale delle Terme di Caracalla, Roma, Italia.*
- Burgess, P. L., Misener, G. C., McQueen, R. E., & Nicholson, J. W. G. (1989). Evaluation of barley and wheat head-chop silages for dairy cows. *Journal of Animal Science*, 69, 947–954.
- Cardona-Alzate, C. A., Sánchez-Toro, O. J., Ramírez-Arango, J. A., & Alzate-Ramírez, L. E. (2004). Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 2, 78–89.
- Castillo, S. F., Estrada, L., Margalef, M. I., & Tóffoli, S. L. (2011). Obtención de harina de nopal y formulación de alfajores de alto contenido en fibra. *Diaeta*, 31(142), 20–26.
- Çürek, M., & Özen, N. (2004). Feed value of cactus and cactus silage. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 28(4), 633–639.

- Day, C. N., & Morawicki, R. O. (2018). Effects of fermentation by yeast and amylolytic lactic acid bacteria on grain sorghum protein content and digestibility. *Journal of Food Quality*, 2018, 1–8. doi:10.1155/2018/3964392
- Díaz-Ayala, F., Álvarez-García, G. del S., & Sima-Moo, E. (2015). Drying kinetics of slices of nopal (*Opuntia ficus indica*) cladodes in a convective transversal flow dryer. *Agrociencia*, 49, 845–857.
- Esperance, M., & Ojeda, F. (1997). Conservación de forraje. *Pastos y Forrajes*, 20, 45.
- Fernández R., E. (2005). Tecnologías de conservación por métodos combinados en pimiento, chaucha y berenjena. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 37, 73 - 81.
- Flores, C. & Aguirre, R. (1992). Nopal como forraje. *CIESTAAM-UACH*. Chapingo, Estado de México, 2nd reimpresión. 80p.
- Flores, V. C., & Aranda-Osorio, G. (1997). Opuntia-based ruminant feeding systems in México. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 2, 2–8.
- Flores-Hernández, A., Araújo-Filho, J. T., Gomes da Silva, F., Ramírez-Ordoñez, S., & Murillo-Amador, B. (2017). Dietas a base de forraje tradicional y nopal (*Opuntia* spp.) enriquecido con proteínas para alimentar cabras. *Nova Scientia*, 9, 149–166.
- Gebremariam, T., Melaku, S., & Yami, A. (2006). Effect of different levels of cactus (*Opuntia ficus-indica*) inclusion on feed intake, digestibility and body weight gain in tef (*Eragrostis tef*) straw-based feeding of sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 131(1–2), 43–52. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2006.02.003

- Griffith, M. P. (2004). The origins of an important cactus crop, molecular evidence. *American Journal of Botany*, 91(11), 1915–1921.
- Gutiérrez, O. E., Elias, A., Santos, H. A., Facundo, A., Morales, H., & Bernal, B. H. (2009). Uso del nopal nativo y cultivado en la alimentación de rumiantes. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 2.
- Hansen, G., Lübeck, M., Frisvad, J. C., Lübeck, P. S., & Andersen, B. (2015). Production of cellulolytic enzymes from ascomycetes: Comparison of solid state and submerged fermentation. *Process Biochemistry*, 50, 1327–1341.
- Jaster, E. (1995). Legume and grass silage preservation. *Post-harvest physiology and preservation of forages*. New York. Van Nostrand Reinhold Inc.
- Jínez, T., Cortés, A., Ávila, E., Casaubon, M. T., & Salcedo, R. (1998). Efecto de niveles elevados de semilla de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) en dietas para pollos sobre el comportamiento productivo y funcionamiento hepático. *Veterinaria México*, 29, 35 - 40.
- Kandler, O. (1983). Carbohydrate metabolism in lactic acid bacteria. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 49, 209–224.
- Kiss, G., & Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de los residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, 79, 39–40.
- Lindgren, S., Pettersson, K., Kaspersson, A., Jonsson, A., & Lingvall, P. (1985). Microbial dynamics during aerobic deterioration of silages. *Science of Food and Agriculture*, 36, 765–774.
- López, J. J., Fuentes, J. M., & Rodríguez, A. (2003). Producción y uso de Opuntia como forraje en el centro-norte de México. *Cuaderno Técnico de La FAO*. Viale delle Terme di Caracalla, Roma, Italia.

- Lozano-Rivas, W. A. (2012). Uso de extracto de fique (*Furcraea* sp.) como coadyuvante de coagulación en tratamientos de lixiviados. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 28, 219–227.
- Maqueda, M. R., Carbonell, M. V., Ramírez, E., & García, M. (2005). Fuentes de emisión de gases de efecto invernadero en la agricultura. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 2(2), 14–18.
- Martínez, O. U., & Lara, G. J. (2003). Potencial productivo de áreas de temporal en el estado de Coahuila una propuesta de conversión productiva. *Campo experimental Saltillo*. INIFAP, 1, 88p.
- McDonald, L. C., McFeeters, R. F., Daeschel, M. A., & Fleming, H. P. (1987). A differential medium for the enumeration of homofermentative and heterofermentative lactic acid bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 53(6), 1382–1384.
- Mejía-Haro, J., Delgado-Hernández, J. L., Mejía, I. H., Guajardo-Hernández, I., & Valencia-Posadas, M. (2011). Efectos de la suplementación con bloques multinutricionales a base de nopal fermentado sobre la ganancia de peso de ovinos en crecimiento. *Acta Universitaria*, 21, 11–16.
- Nilson, G., & Nilson, P. E. (1965). The microflora on the surface of some fodder plants at different stages of maturity. *Archiv Für Mikrobiologie*, 24, 412–422.
- Noguer M., J. M., & Valles C., A. (1977). El ensilado y sus ventajas. *Extensión Agraria*, 2(1), 1–16.
- Pahlow, G. & Honig, H. (1993). Dry matter losses during storage and unloading as influenced by different types of silage additives. In: *10th International Conference on Silage Research, Dublin City University, Ireland. March 1993* (Pp. 118–119).

- Pandey, A. (2003). Solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 13, 81–84.
- Rojas-Valencia, M. N. (2011). Manejo integral de residuos sólidos, impacto ambiental y costos. *Ingeniería Civil*, 477, 12–16.
- Salem, H. B., & Nefzaoui, A. (2003). Opuntia forraje estratégico y herramienta eficiente para combatir la desertificación en la región Wana. Cuaderno Técnico de La FAO. Viale delle Terme di Caracalla, Roma, Italia.
- Schlegel, H. G. (1987). General Microbiology. Camdridge, UK. Press Syndicate of the Univiversity of Cambridge.
- SIAP. (2019). Avance de siembras y cosechas resumen por estado. Retrieved from:
http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do/. Consultada el 5 de abril de 2019
- Singhanian, R. R., Sukumaran, R. K., Patel, A. K., Larroche, C., & Pandey, A. (2010). Advancement and comparative profiles in the production technologies using solid-state and submerged fermentation for microbial cellulases. *Enzyme and Microbial Technology*, 45, 541–549.
- Tavares, M. E., Salinas, E., & Galicia, S. (2009). Elaboración de composta orgánica para productores de nopal, como alternativa para el cuidado del ambiente. *Revista Arbitradas*, 7, 3–9.
- Torres, S. A. (2010). Composición química del nopal y sus implicaciones en la nutrición de rumiantes. In: *IX Simposium-taller internacional de producción y aprovechamiento del nopal y el maguey*. Nuevo León, Noviembre, 2010.
- Umaña, R., Staples, C., Bates, D., Wilcox, C., & Mahanna, W. (1991). Effects of a microbial inoculant and (or) sugarcane molasse on fermentation, aerobic

stability and digestibility of Bermuda grass ensiled at two moisture contents. *Journal of Animal Science*, 69, 4588–4601.

Vázquez-Alvarado, R. E., Valdez-Cepeda, R., Gutiérrez-Ornelas, E., & Blanco-Macias, F. (1992). Caracterización e identificación de nopal forrajero en el noreste de México. In: VI simposium taller producción y aprovechamiento del nopal en el Noreste de México. Nuevo León, agosto 1992

Vázquez M., P. (2016). Aprovechamiento del Nopal y Tuna en la Alimentación de Ovinos. Tesis Doctoral. *Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 93 p.*

Weinberg, Z. G., & Muck, R. E. (1996). New Trends and opportunities in the development and use of inoculants for silage. *FEMS Microbiology Reviews*, 19, 53–68.

Weissbach, F., & Gordon, F. (1992). Grassland based animal production in Europe. In: Proceedings of the 14th General Meeting of the European Grassland Federation (pp. 1–18).

Woolford, M. K. (1984). The silage fermentation. New York, Marcel Dekker, Inc.

Woolford, M. K. (1990). The detrimental effects of air in silage. *Journal of Applied Bacteriology*, 68, 101–116.

Yepes, S. M., Montoya, L. J., & Orozco, F. (2008). Valorización de residuos agroindustriales – frutas – en Medellín y el sur del valle del Aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61(1), 4422–4431.

3. EFECTO DE LA TUNA Y GRANO DE JAMAICA EN ENSILADOS DE LA MEZCLA NOPAL-PAJA DE AVENA

3.1. Resumen

Con el objetivo de evaluar la inclusión de tuna y grano de jamaica en el proceso de ensilaje de nopal-paja de avena, se elaboraron microsilos con capacidad para 3.1 kg de materia vegetal. Los tratamientos fueron seis: cinco mezclas de material a ensilar, constituido por nopal (58, 60, 65, 74 y 78%), tuna (0, 11, 12, 18 y 24%), grano de jamaica (0, 9, 10, 17, y 23%) y paja de avena (0, 1, 5, 13 y 22%, base tal cual), y alfalfa como forraje de referencia. El ensilaje se realizó durante 45 días. El pH, temperatura y cantidad de lixiviados se midieron a tiempos predeterminados durante el ensilaje. Se tomaron muestras al inicio y al final de ensilaje para medir variables organolépticas (color, olor, textura, humedad), deterioración aeróbica por producción de CO₂ y químicas (nitrógeno amoniacal, ácido láctico y carbohidratos solubles). El pH a los 45 días de ensilaje fluctuó entre 4 – 5.1, los ensilados con mayor cantidad de nopal (74 y 78%) produjeron más ($P<0.05$) lixiviado (1015 y 1230 mL silo⁻¹) que el de alfalfa o los que contenían grano de jamaica. La deterioración fue mayor ($P<0.05$) para el ensilado con alto contenido de nopal (74%) mezclado con tuna-grano-paja de avena (11, 10 y 5%), respecto a los ensilados de alfalfa, nopal-paja de avena (78, 22%) o nopal-tuna-grano (65, 12, 23%), atribuido al menor ($P<0.05$) contenido de MS (8.2 vs 22, 20 y 31.4 %). La cantidad de carbohidratos fue menor y el ácido láctico mayor ($P<0.05$) al final respecto al inicio del ensilaje (25 vs. 7.3% y 0.23 vs. 0.52% respectivamente). La inclusión de tuna, incrementa el contenido de carbohidratos solubles, mientras que el grano de jamaica mejora el ensilaje y conservación de nutrientes, en virtud de que reduce la lixiviación, incrementa la MS, sin afectar las características organolépticas, por lo que se consideró que estos ensilados pueden ser de calidad nutritiva y palatabilidad aceptables para rumiantes.

Palabras clave: respiración de ensilados, *Hibiscus sabdariffa* L.

EFFECT OF PRICKLY PEAR AND GRAIN OF JAMAICA ON THE SILAGE OF NOPAL AND OAT STRAW

3.2. Abstract

In order to evaluate the inclusion of prickly pear and jamaica grain in cactus–oat straw silage process, microsilos with capacity for 3.1 kg of plant matter were developed. The treatments were six: five mixtures of material to be ensiled, consisting of cactus (58, 60, 65, 74, and 78%), prickly pear (0, 11, 12, 18, and 24%), jamaica grains (0, 9, 10, 17, and 23%) and oat straw (0, 1, 5, 13 and 22%, base as feed), and alfalfa as reference fodder. Silage was performed for 45 days. The pH, temperature and amount of leachate was made at predetermined times during silage. Samples were taken at the beginning and at the end of silage to measure organoleptic variables (color, smell, texture, humidity), aerobic deterioration due to CO² and chemical production (N-ammonia, lactic acid, soluble carbohydrates). The pH after 45 days of silage fluctuated between 4 - 5.1, silages with a greater amount of prickly pear cactus (74 and 78%) produced more (P <0.05) leached (1015 and 1230 mL silo⁻¹) than that of alfalfa or the one wich contained jamaica grain. The deterioration was greater (P<0.05) for the high nopal silage (74%) mixed with tuna-grain- oat straw (11, 10, and 5%), compared to alfalfa, nopal- oat straw silage (78, 22%) or cactus - prickly pear (65, 12, 23%), attributed to the lower (P<0.05) DM content (8.2 vs. 22, 20, and 31.4%). The amount of carbohydrates was lower, and the lactic acid was greater (P<0.05) at the end with respect to the onset of silage (25 vs. 7.3, and 0.23 vs. 0.52%). It is concluded that the inclusion of prickly pear, increases the content of soluble carbohydrates, while jamaica grains improves silage and nutrient conservation, because it reduces leaching, increases DM, without affecting the organoleptic characteristics, so it was considered that these silages can be of acceptable nutritional quality and palatability for ruminants.

Keywords: silage breathing, *Hibiscus sabdariffa* L., seed

3.3. Introducción

En la zona norte del país, el nopal es utilizado como fuente de forraje, energía y agua (alimento) para el ganado; mientras que en el centro y sur de México, principalmente se usa como alimento para humanos (Anaya-Pérez & Bautista-Zane, 2008). México es el mayor productor mundial de verdura (nopalito) y fruta (tuna) del nopal, cultivos que son de importancia en la economía nacional (Griffith, 2004). La superficie destinada a la producción de nopal verdura es de 12,630 ha, con una producción anual de 796,953 toneladas (SIAP, 2019). El 46.1% de la producción de nopal verdura se realiza en Morelos (SIAP, 2019). El cultivo de nopal genera esquilmos en virtud de que no toda la producción alcanza a comercializarse. Se estima que la cantidad de nopal verdura que se desecha es equivalente al 10.5% de la producción (83,784 toneladas) y aproximadamente 10 t ha⁻¹ de nopal maduro derivado de la poda anual como parte del manejo del cultivo.

Dado que el nopal y la tuna de desecho son una fuente nutritiva para alimentación animal, se han estudiado alternativas para su utilización, como el compostaje para reducir la producción de agentes contaminantes y producir abonos orgánicos (Tavares et al., 2009), la deshidratación del cladodio (Díaz-Ayala et al., 2015), la producción de harina (Castillo, Estrada, Margalef, & Tóffoli, 2013), o el ensilado del nopal (Vázquez, 2016).

El ensilaje es una tecnología de conservación de forrajes ricos en humedad ($\pm 70\%$) (Noguer & Valles, 1977), que puede ser aprovechada como una alternativa para la conservación y manejo del nopal o nopal-tuna, en alimentación de rumiantes, y reducir el impacto ambiental por la descomposición de estos desperdicios en los terrenos agrícolas y los costos de producción de carne por ganado (Aranda et al., 2008).

Dado que el nopal llega a tener más del 85% de humedad, el riesgo de un mal ensilaje es alto, pues se favorecen las condiciones para su descomposición y

putrefacción. En este sentido, es conveniente mezclar al nopal o nopal-tuna con otros esquilmos agrícolas capaces de retener agua, con el fin de ajustar su humedad y favorecer el ensilaje. Lo más común es incluir paja; sin embargo, esto baja la calidad del producto, por lo que es conveniente buscar otros esquilmos que además de reducir la humedad aporten nutrimentos al ensilado, tal es el caso de granos como los de la jamaica. Este grano contiene alta cantidad de proteína y grasa (Jínez et al., 1998). Dado que no existen estudios del efecto de estos granos en el ensilaje de nopal o nopal-tuna, se realizó la presente investigación con el objetivo de evaluar el efecto de la inclusión de grano de la jamaica en el ensilaje y deterioración aeróbica del ensilado de nopal y nopal-tuna.

3.4. Materiales y métodos

3.4.1. Microsilos

Se diseñaron microsilos en forma de cilindros de PVC de 11 cm de diámetro y 50 cm de altura ($\text{Volumen}=4751.6 \text{ cm}^3$), donde se almacenaron 3.1 kg de material vegetal húmedo, y alcanzaron una densidad de 700 kg m^{-3} . Los microsilos tuvieron una válvula para la recolección de lixiviados y nueve orificios tapados herméticamente con tapón de goma, y distribuidos a tres niveles (alto, medio y bajo) para la medición del pH y la temperatura, a tres alturas y en tres tiempos del ensilaje (tres mediciones por tiempo, una a cada nivel).

3.4.2. Material vegetal

El material usado en las mezclas a ensilar fue: cladodios maduros del cultivar platanillo para nopal verdura del municipio de Otumba, México, tuna madura de desecho (no comercializada) variedad cristal, de la central de abastos de Chicoloapan. El grano provino de la cosecha de jamaica de productores del estado de Guerrero. Este material fue picado y mezclado para formular los tratamientos.

3.4.3. Tratamientos

Los tratamientos fueron seis, uno de alfalfa como referente (T6) y cinco mezclas de cladodio-paja de avena sola (T3) o combinada con tuna-paja de avena-grano de jamaica, en distintas proporciones (T1, T2, T4 y T5; Cuadro 1).

Cuadro 1. Porcentaje de los ingredientes para ensilados.

Ingrediente	Tratamiento					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Nopal	58	60	78	74	65	0
Tuna	24	18	0	11	12	0
Grano de jamaica	17	9	0	10	23	0
Paja avena	1	13	22	15	0	0
Alfalfa	0	0	0	0	0	100

Al inicio y antes de cerrar el silo, se tomaron dos submuestras de cada mezcla sin ensilar (SE). El material se fue compactando en capas usando un pistón de madera, con base circular de diámetro poco menor al de los silos. Posteriormente los silos fueron cerrados herméticamente y el proceso de ensilaje duró 45 días. Durante este período se midió la temperatura y pH a los 9, 16 y 31 días de ensilaje, a través de los orificios que previamente se hicieron a los silos y a la apertura del silo (45 días), usando un equipo *4 in 1 Soil Survey Instrument* (Modelo AMT-300, código SR300B). A la apertura de los silos, una capa de ensilado de 15 cm de profundidad se desechó y se tomaron muestras para hacerles las siguientes determinaciones.

3.4.4. Características organolépticas

Inmediatamente después de abierto el silo, a una muestra de ensilado se les caracterizó organolépticamente, mediante la metodología propuesta por Ojeda y Esparance (1991) considerando los criterios de color, olor, textura y humedad. La calificación de cada criterio correspondió al promedio del valor otorgado por

cuatro evaluadores, utilizando una escala de 1 a 4, donde: 4 es excelente; 3 es bueno; 2 es regular; y 1 es malo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Indicadores de propiedades organolépticas para la evaluación de ensilados de nopal.

Característica Organoléptica	Categoría	Descripción
Color	4	Verde aceituna.
	3	Verde amarillento.
	2	Verde oscuro, con tonalidad rojo.
	1	Café parduzco, casi negro.
Olor	4	Agradable, a fruta madura y aceitunas o hierba, no deja olores desagradables al ser tocado.
	3	Agradable, con un toque a vinagre, no deja olor residual al ser tocado.
	2	Ácido, con fuerte olor a vinagre; al ser tocado deja en las manos olor a mantequilla rancia.
	1	Desagradable, putrefacto o con fetidez a humedad, deja en las manos un penetrante y duradero olor a mantequilla rancia.
Textura	4	Se conservan los bordes originales.
	3	Los bordes se mantienen, pero no se encuentran bien definidos algunas espías se desprenden fácilmente.
	2	Las espinas se caen, es una masa con aun un poco de consistencia.
	1	No se aprecian diferencias entre componentes, todo es una masa sin forma, que puede llegar a ser jabonosa al tacto.
Humedad	4	Al ejercerse presión sobre un puño de forraje no se humedece la mano y una vez que se deja de ejercer presión el forraje se suelta.
	3	Al ejercerse presión sobre un puño de forraje la mano queda húmeda y una vez que se deja de ejercer presión el forraje no queda completamente suelto.
	2	Al ser comprimido el forraje en el puño escurren gotas, una vez que se le suelta permanece compactado con apariencia de formar una masa.
	1	Escurre abundante humedad al tomarse un puñado de ensilado, se compacta con facilidad y se le puede moldear.

Adaptado de Ojeda & Esparance (1991).

3.4.5. Deterioración aeróbica

Otra muestra de 40 g de cada ensilado fresco se transfirió a frascos de un litro de capacidad. Sobre la muestra del frasco de un litro se colocó un pequeño recipiente de 50 mL de capacidad con 30 mL de KOH (1 N). Los frascos se cerraron herméticamente para evitar la fuga de gas y se dejaron incubando al ambiente por cinco días. Diariamente se extrajo el recipiente con KOH y se sustituyó por otro con solución fresca. Del recipiente recién extraído se tomaron alícuotas de dos mililitros y se le agregó dos gotas de cloruro de bario (2N) y tres gotas de fenolftaleína. Posteriormente, la alícuota fue titulada con HCl (0.5 N). Se usaron frascos blancos (sin ensilado). Los μmoles de CO_2 producidos por día se obtuvieron mediante la siguiente fórmula.

$$\mu\text{moles CO} = \frac{(T - P) \times N_{\text{HCl}} \times 1000}{2}$$

Donde: T= gasto de ml de HCl en el blanco, P= gasto de ml de HCl en la muestra por analizar, N_{HCl} = normalidad del HCl estandarizado, 2= constante estequiométrica.

3.4.6. Nitrógeno amoniacal

El nitrógeno amoniacal (N-NH_3) en los ensilados se midió por la técnica propuesta por McCullough (1967). A un gramo de muestra se mezcló con 9 mL de hipoclorito de sodio (2.5%) y se centrifugó a 6000 RPM por 10 min. Se tomaron 20 μL del sobrenadante (extracto) y se les adicionó un mililitro de fenol y se mezcló en vórtex por 5 s. Posteriormente se les añadió un mililitro de solución de hipoclorito de sodio y se mezcló en vórtex por 10 s. Esta última mezcla se incubó en baño maría a 37 °C por 30 minutos, y después se diluyó con cinco mL de agua destilada, se dejaron enfriar y se leyó su absorbancia en espectrofotómetro a 630 nm.

La solución de hipoclorito de sodio se preparó con 750 mg de NaOH, 2.13 g Na_2HPO_4 y 1.5 mL de hipoclorito de sodio grado comercial (5%) en 100 mL de agua destilada. La solución fenol se preparó con cinco miligramos de nitroprusiato de sodio ($\text{Na}_2(\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y un gramo de fenol en cristales en 100 mL de agua destilada.

La cuantificación de N-NH_3 se estimó mediante la ecuación de regresión obtenida con 250, 500, 1000, 1500 y 2000 μL de una solución de sulfato de amonio (0.4714 g de sulfato de amonio deshidratado en 100 mL de agua) aforadas a 10 mL con agua destilada y se siguió el procedimiento descrito anteriormente, tomando una alícuota de 20 μL de cada solución.

3.4.7. Carbohidratos solubles

Se cuantificó la concentración de carbohidratos solubles siguiendo el procedimiento propuesto por (Dubois, Gilles, Hamilton, Rebers, & Smith, 1951). Una muestra de cada ensilado fue secada a 65 °C por 48-72 h en estufa y molida (1 mm). Cincuenta mg de muestra molida se colocaron en mortero y se le adicionaron 5 gotas de etanol (80%) y 1 mL de H_2O destilada. El extracto y la muestra se transfirieron a tubos de centrifuga, el residuo de muestra se lavó con 5 mL de etanol (80%) caliente y se centrifugó a 3500 rpm por 4 min. El sobrenadante se transfirió a un matraz volumétrico de 25 mL y el sedimento al mortero para repetir la extracción. Este procedimiento se repitió tres veces y finalmente se aforó a 25 mL. Un mL de cada extracto se transfirió a tubos de ensayo y se les adicionó 1 mL de fenol (5%) y 4 mL de H_2SO_4 concentrado y se mezcló en vórtex por 20 s, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se leyó la absorbancia a 490 nm.

Para estimar la cantidad de carbohidratos solubles (mg g^{-1} MS), se obtuvo la ecuación de regresión de absorbancia vs concentración, para lo cual se preparó una solución (0.1%) *stock* de D-glucosa, a partir de la cual se preparó una dilución (1:10) equivalente a 0.01% de D-glucosa. Para la curva patrón se usaron 0.1, 0.2,

0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 y 1.0 mL, aforados a 1 mL con agua destilada, equivalentes a un intervalo de 1 a 10 mg de glucosa, y se siguió el procedimiento descrito anteriormente.

3.4.8. Ácido láctico

Se preparó una solución estándar de lactato de litio acidulada [(538.6 mg en 500 mL de agua y 0.5 mL de H_2SO_4 concentrado (96%)), otra solución de sulfato de cobre pentahidratado (4%), y otra de p-hidroxidifenil (1.5%) en etanol (96%). Un gramo de ensilado se diluyó con agua destilada (1:10) y se incubó en baño maría agitado a temperatura ambiente por 20 min. Posteriormente, a dos mL de este extracto se le adicionaron 500 microlitros de ácido metafosfórico (20%), se mantuvieron en refrigeración (4-6°C) durante toda la noche. Después se centrifugaron a 5000 rpm durante cinco minutos. Una muestra de sobrenadante se diluyó a 1:50 y se transfirió en 500 μL de esta dilución a un tubo de ensayo, se le agregaron 3 mL de H_2SO_4 concentrado y se mezcló en vórtex. La mezcla se incubó en baño de agua en ebullición por 10 min, se enfrió en agua a temperatura ambiente por otros 10 min. Después se le adicionaron 50 μL de $\text{CuSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ (4%) y 100 microlitros de solución p-hidroxidifenil, y se mezcló con un agitador vórtex hasta que el precipitado se disolvió. Los tubos se dejaron en reposo por otros 10 min más hasta su cambio de color, y se leyó la absorbancia a 570 nm.

La estimación de la cantidad de ácido láctico se realizó con la ecuación de regresión de absorbancia vs concentración de lactato, para lo cual la solución estándar de ácido láctico se diluyó a 1:25 en agua destilada, de la cual se colocó a una serie de tubos de ensayo con 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 μL y se aforaron a 500 μL con agua destilada. Posteriormente se siguió el procedimiento descrito anteriormente.

La materia seca (MS) se obtuvo secando una muestra de ensilado de peso conocido a 65 °C durante 5 d, después de lo cual se pesó y por diferencia de pesos se obtuvo el porcentaje de la MS y de humedad.

3.5. Resultados y discusión

3.5.1. Temperatura

La temperatura en el ensilaje (Cuadro 3) se mantuvo baja (21 °C) y no fue diferente ($P<0.05$) entre tratamientos. Esta temperatura es considerada fría para el ensilaje y es indicativa de que predominó la fermentación láctica, se redujo al mínimo la respiración y se favoreció un proceso de ensilaje apropiado (Wilkinson & Davies, 2012).

Cuadro 3. Promedios de lixiviados, CO², materia seca, evaluación organoléptica y temperatura del ensilado.

Tratamiento	Lixiviado (ml)	CO ² (gkg ⁻¹ MS)	MS (%)	Evaluación Organoléptica	Temperatura (°C)
T1	768.6 ^{bc}	8.46 ^{ab}	29.3 ^a	3.5 ^b	21.3 ^a
T2	577.9 ^{cd}	6.12 ^{ab}	31.4 ^a	3.7 ^a	21.5 ^a
T3	1230 ^a	5.93 ^{bc}	20.1 ^{bc}	3.7 ^a	21.5 ^a
T4	1014.7 ^{ab}	13.27 ^a	18.2 ^c	3.5 ^b	21.3 ^a
T5	624.9 ^{bcd}	3.82 ^{bc}	30.1 ^a	2.2 ^d	21.4 ^a
T6	206.6 ^d	1.93 ^c	22.7 ^b	3.2 ^c	21.5 ^a

Literales en la misma columna son diferentes estadísticamente ($P<0.05$)

3.5.2. Potencial Hidrógeno (pH)

A los nueve días de ensilaje, los ensilados tenían un pH entre 4.7 y 5.0. A los 30 días de ensilaje, el pH de los ensilados mostró un comportamiento irregular, al incrementar su pH entre 5 y 6. El pH final (45 días) de los ensilados con la menor cantidad de grano de jamaica (T2, T3, T4) fue más bajo ($P<0.05$) que el del ensilado con más grano de jamaica (T5; 4.0 vs. 5.1). Los ensilados de alfalfa con una cantidad media de grano de jamaica (T6 y T1) tuvieron un pH final de 4.5 (Figura 4).

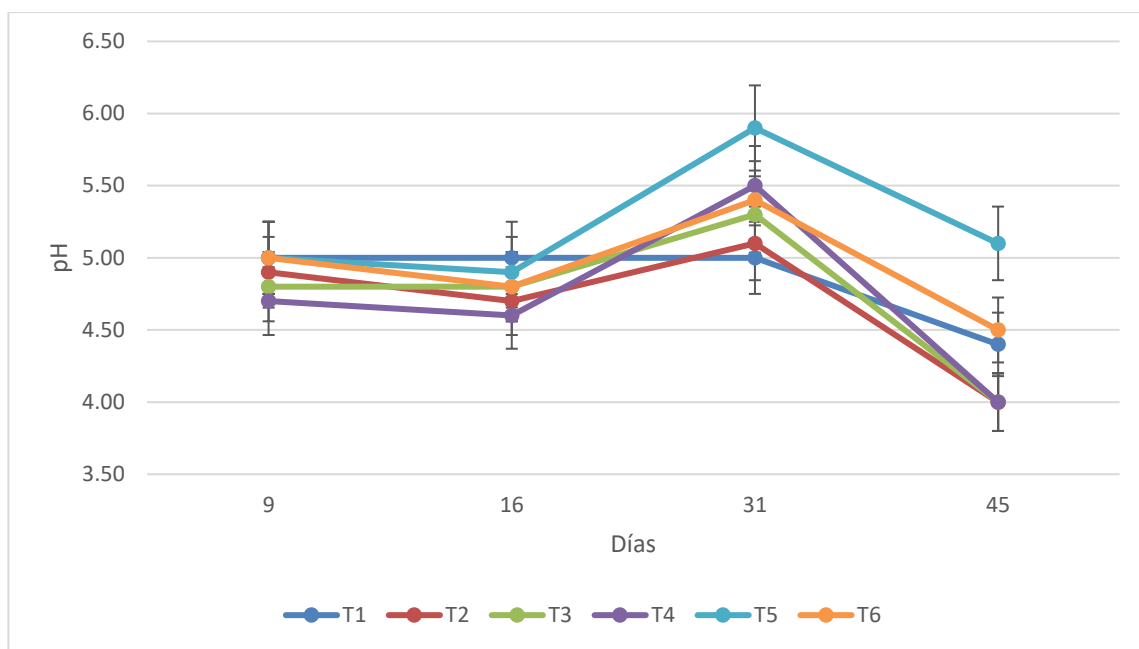


Figura 4. Cambios en el pH de los microsilos durante su fermentación.

Jínez *et al.*(1998) encontraron que el grano de jamaica es rico en proteína (20.5%). Los forrajes altos en proteína como la alfalfa no alcanzan valores de pH suficientemente bajos durante el ensilaje (Demanet-Filippi, 2018) como se demostró en este estudio, lo cual se atribuye a que las proteína tienen alta capacidad *buffer* (López-Herrera & Briceño-Arguedas, 2017). Esta puede ser la razón por la que el ensilado del tratamiento seis, con 17% de grano de jamaica, tuvo un pH similar al ensilado de alfalfa, y en el ensilado con más grano de jamaica (23%, T5) el pH final fue aún más alto (5.0); mientras que cuando la cantidad de grano de jamaica fue menor que 10%, el pH que se alcanzó en el ensilado fue el apropiado para su conservación (4.0; T2, T3 y T4).

Los valores de pH de los ensilados de esta investigación, fueron semejantes a los encontrados por Tobía, Villalobos, Rojas, Soto, & Moore (2008) para el ensilado de forraje de soya (4.01 – 5.81), pero mayores a los obtenidos por Batista y colaboradores (2003) para el ensilado de haba y soya (3.85 – 4.3) a 45

días de fermentación, e incluso cercanos a los encontrados por López-Herrera & Briceño-Arguedas (2017) para ensilados de leguminosas tropicales con fuentes de carbohidratos (5.4 – 4.5).

3.5.3. Evaluación organoléptica

De acuerdo con Betancourt, González, y Martínez (2005), la coloración de un ensilado puede indicar el tipo de proceso que se desarrolló en la fermentación, aunque siempre se espera un cambio de color en la materia vegetal. Se espera que ensilados en donde ocurren los procesos adecuados de fermentación, posean coloraciones verdes. En cuanto al olor es una característica que permite conocer el desarrollo del proceso de ensilaje, ya que depende de la concentración y tipo de ácido orgánico que se haya formado durante la fermentación (Adesogan, 2006). La textura de los ensilados depende principalmente de las características del forraje. López-Herrera y Briceño-Arguedas (2017) encontraron una correlación alta entre olor y textura. En la presente investigación se encontraron diferencias ($P < 0.05$) entre tratamientos (Cuadro 3). Los ensilados mejor evaluados fueron aquellos que tuvieron bajo pH, lixiviado bajo y MS alta (T2 y T3), mientras que el peor evaluado fue aquel que contuvo alta cantidad de grano de jamaica y bajo en tuna (T5). Los otros ensilados tuvieron una evaluación de media a buena (Betancourt et al., 2005).

3.5.4. Materia seca, humedad y lixiviados

La proporción de materia seca y humedad es fundamental para favorecer el ensilaje y disminuir la pérdida de nutrimentos por lixiviados. Es posible lograr ambos cuando el contenido de humedad en el material a ensilar se encuentra entre 60 y 70%, sin afectar el proceso de ensilaje (McDonald, 1981; Alomar et al., 1993). En los tratamientos T1, T2 y T5, que tuvieron el contenido de MS mayor ($P < 0.05$) en comparación con T3, T4 y T6 (Cuadro 3), se logró tener un porcentaje de MS favorable para el ensilaje. De estos, el ensilado T2 tuvo un pH final más bajo (4.0) que T1 y T5 (4.5 y 5.0), lo que es indicador de un buen ensilaje.

Los tratamientos que tuvieron menor contenido de MS y, por ende, mayor de humedad, fueron en los que la cantidad de nopal fue menor (Cuadro 1).

Respecto a los lixiviados, estos fueron de un color amarillento. Los recolectados en los primeros días tuvieron una tonalidad café que tornó a verde olivo, con café en la última colecta. Los lixiviados fueron tornándose líquidos, viscosos y espesos, conforme transcurrió en ensilaje. Los tratamientos con mayor contenido de nopal y agua (T3 y T4) produjeron poco más de un litro de lixiviado, mayor ($P<0.05$) al volumen de lixiviado producido por T1, T2, T5 y T6 (Cuadro 3). El ensilaje de alfalfa (T6) produjo menor volumen de lixiviado (206.6 mL) pese a tener 22.7% de MS (87.3% de humedad), similar ($P>0.05$) al del tratamiento T3 el cual produjo mayor lixiviado. También resalta el hecho de que el tratamiento T2 tuvo mayor contenido de MS que el ensilado de alfalfa (31.4 vs. 22.7%), produjo mayor volumen de lixiviado (577.9 vs. 206.6 mL; $P<0.05$) (Cuadro 3). Esto puede estar relacionada a las características de material a ensilar. Pese a que en todos los tratamientos el forraje fue picado, en el caso de alfalfa mantuvo una estructura más integra y esto quizás le permitió retener el agua en sus tejidos, en comparación con las mezclas nopal-tuna, las cuales tomaron un aspecto licuado después de picar y durante la elaboración de las mezclas.

Mardones, Cordero, Augsburger y Ríos-Escalante (2015) encontraron que el ensilaje de maíz produce más volumen de lixiviado (1648 mL) que los que se obtuvieron en esta investigación con nopal-tuna. Nocet y Grant (1987) a los 15 días de haber tapado el silo, obtuvieron entre 646 y 480 ml, lo que fue aproximado a lo que se obtuvo en los tratamientos T2 y T5. Un incremento en el contenido de materia seca del ensilado está asociado a un descenso en la fracción soluble del forraje y a la pérdida de algunos nutrientes a través del lixiviado (Lindgren et al., 1985).

3.5.5. Carbohidratos solubles

La cantidad de carbohidratos solubles (CSA) fue mayor ($P < 0.05$) en las mezclas de nopal antes de ensilar en comparación con los ensilados (Cuadro 4), lo cual se atribuye al consumo de los carbohidratos solubles durante la fermentación microbiana. En promedio, la reducción por consumo de los carbohidratos fue 67%. El nopal-paja (T3) fue la mezcla que tuvo la menor cantidad de CSA (11.9%) y similar a uno de los ensilados que tuvieron el menor pH (4.0), lo cual indicó que esta proporción de CSA es suficiente para mantener una fermentación que logré reducir el pH del ensilado a un valor óptimo, para lograr la conservación de este forraje. El contenido de CSA en el resto de las mezclas (T1, T2, T4 y T5) incrementó, en algunos casos más del doble, por efecto de la inclusión de tuna respecto a la mezcla tuna-paja; sin embargo, tal incremento no fue proporcional a la inclusión de tuna, probablemente debido a la variación en la madurez de la tuna, este fruto incrementa el contenido de CSA conforme madure, y su tasa de maduración es alta, lo que implica que el contenido de CSA pueden variar grandemente en un corto tiempo, y en llenado de los silos no se tuvo el cuidado de homogenizar la biomasa de tuna después de haber sido picada.

De acuerdo con estos resultados, se consideró que para lograr una disminución apropiada del pH con el fin de lograr la conservación del ensilado de nopal-paja, no requirió de la inclusión de tuna ni de grano de jamaica, pero si se desea incluir grano de jamaica con el fin de mejorar la calidad nutritiva de este ensilado, debe también incluirse una fuente de CSA como la tuna, y esta investigación, mostró que la proporción de tuna que debe incluirse a la mezcla de tuna-paja fue en el intervalo de 11 a 18% (base tal cual), cuando la inclusión de grano de jamaica fue del 10%.

Cuadro 4. Porcentajes promedio obtenidos de carbohidratos solubles, ácido láctico y nitrógeno de la materia vegetal antes y después del proceso de ensilado.

Proceso (P)	Tratamiento(T)	Carbohidratos (%)	Ac. Lac (%)	NH ³ (%)
Ensilado	1	5.4	0.77	1.63
	2	9.2	0.85	1.12
	3	8.6	0.18	1.07
	4	8.7	0.57	1.25
	5	6.6	0.40	1.79
	6	10.7	0.34	2.15
Sin ensilar	1	31.6	0.17	1.73
	2	29.4	0.08	1.13
	3	11.9	0.69	2.14
	4	27.8	0.27	3.00
	5	22.2	0.09	2.35
	6	27.6	0.06	1.67
R ²		0.96	0.76	0.82
EE		0.73	0.07	0.10
DMS 0.05		1.12	0.10	0.15

EE=Error estándar, DMS=Diferencia mínima significativa

Peláez-Acero et al. (2008) encontraron una concentración menor de carbohidratos solubles al momento inicial del proceso de ensilaje (9.28 – 9.00%) con *Pleurotus sapidus* y caña de azúcar, siendo 20 puntos porcentuales menor a la encontrada en el T2 sin ensilar, el cual es el que tiene el contenido de carbohidratos solubles más alto. Elizalde & Gallardo, (2003) obtuvieron valores más bajos (0.78 – 1.73 %) de CSA residuales en los ensilados de avena y cebada.

La tuna madura de desecho fue una buena fuente de CSA, de tal manera que la proporción de CSA hallada en las mezcla nopal-paja adicionada de tuna, fue más alta a la encontrada por Sánchez-Matta (2005) en la mezcla de pasto elefante y mijo antes del proceso de ensilaje (2.7 – 4.24%). El nopal también es una buena fuente de CSA, pues el T3 tuvo 2.75 veces más CSA a la mezcla ensilada por Sánchez-Matta (2005).

3.5.6. Ácido láctico

En el Cuadro 4 se puede observar que antes de ensilar hubo diferencias significativas ($P < 0.05$) entre el T3 con respecto a los demás tratamientos. Como se esperaba, al finalizar el proceso de fermentación del ensilado hubo un incremento en la concentración de ácido láctico en la materia vegetal de la mayoría de los tratamientos, encontrando diferencias ($P < 0.05$) entre los tratamientos con ensilados. Se puede destacar que no hubo diferencia significativa ($P < 0.05$) entre el T4 ensilado y T3 sin ensilar.

Wing-Ching y Rojas-Bourrillón (2006) obtuvieron concentraciones mayores a las encontradas en el presente trabajo (2.45 – 2.16) con *Arachis pinto*, mientras que Lindgren et al. (1985) obtuvieron concentraciones de 2.8% de ácido láctico en base seca, con ensilados de pasto y trébol rojo, teniendo según ellos, ensilados con buenas características y de buena calidad.

3.5.7. Nitrógeno amoniacal

El nitrógeno amoniacal de T4 antes de ensilar fue diferente ($P < 0.05$) a los demás tratamientos (Cuadro 4), siendo casi dos veces más alto que en los otros tratamientos. El nitrógeno contenido después del proceso de ensilado fue diferente ($P < 0.05$) entre tratamientos, destacando el T6, el cual fue diferente significativamente a los demás tratamientos. Fransen y Strubi (1998) obtuvieron concentraciones mayores de nitrógeno amoniacal utilizando diferentes materiales absorbentes de humedad; además, López-Herrera, Wing-Ching, y Rojas-Bourrillón (2009) indican que, cuando se utilizan aditivos con baja concentración de humedad, se reducen las pérdidas por nitrógeno amoniacal en el silo.

El nitrógeno amoniacal es afectado por diversos factores, los cuales pueden aumentar o disminuir su producción y concentración dentro de los ensilados, como son el tipo y cantidad de azúcar que se fermenta, el forraje, si es leguminosa o gramínea. En ensilados donde el pH es más bajo, se presenta

menor contenido de nitrógeno amoniacal, ya que se da una correcta acidificación del medio, impidiendo el crecimiento de microorganismos como las enterobacterias, las cuales degradan la proteína mediante la desaminación (López-Herrera & Briceño-Arguedas, 2017).

3.5.8. Deterioración aerobia

La deterioración del ensilaje empieza desde el momento en el que el aire tiene contacto con ellos, la rapidez en la descomposición puede estar relacionada con la difusión del oxígeno a través del ensilado. En el Cuadro 3 se presenta la deterioración aeróbica del ensilado, enfocado en la producción de CO₂, en donde podemos observar que T4 fue el que mayor CO₂ produjo, teniendo diferencia ($P < 0.05$) con T6, produciendo 6.8 veces más CO₂ que el T6, los resultados obtenidos fueron similares a los reportados por Lindgren et al. (1985), con ensilados de pastos combinados con trébol rojo, el cual a las 96 horas de deterioro obtuvo valores entre 12 y 6 g kg⁻¹ MS; sin embargo, estos valores fueron menores a los reportados por Ashbell, Weinberg, Hen, y Filya (2002) con ensilados de maíz y trigo, obteniendo valores entre 24.1 y 25.2 g kg⁻¹ MS a los 6 días de exposición al aire de los ensilados.

3.6. Conclusiones

A pesar de que el ensilaje de nopal-paja, por su contenido de CSA (11.9%), puede alcanzar un pH suficientemente bajo para la conservación del ensilado y una evaluación organoléptica muy buena (3.7), por su bajo contenido de MS (20%) tiene mayor volumen de lixiviado, y por consiguiente, de pérdida de nutrientes. La inclusión de 18% de tuna madura de desecho y 10% de grano de jamaica, mantiene las características ya mencionada de un buen ensilaje, pero además incrementa el contenido de CSA y de MS (30%), lo cual reduce los lixiviados y la deterioración aeróbica, y es factible que la calidad nutritiva del ensilado sea mejor, dado que el grano aporta nutrientes. Cantidades de grano de jamaica mayores al 10% afectan negativamente el proceso de ensilaje.

3.7. Literatura citada

- Adesogan, A. T. (2006). Factors affecting corn silage quality in hot and humid climates. In: *Proceedings of the 17th Florida Ruminant Nutrition Symposium*. February 2006 (Pp. 108–127).
- Alomar, D., Latrille, L., Ferrando, A., Anrique, R., Balocchi, O., Fuchslocher, R., & Quezada, A. (1993). Efecto de adicionar heno, coseta o afrechillo de trigo a un ensilaje de pradera permanente de corte directo en la décima Región. *Agro Sur*, 21, 52–28.
- Anaya-Pérez, M. A., Bautista-Zane, R. (2008). El nopal forrajero en México: del siglo XVI al Siglo XX. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 5, 167–183.
- Aranda O., G., Segundo E., M., Flores V., C., & Cruz M., M. (2008). Inclusión de nopal en dietas de finalización para corderos de pelo. In: *Memorias de la XXXVI Reunión anual de la Asociación Mexicana de Producción Animal A. C. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León. Octubre 2008*
- Ashbell, G., Weinberg, Z. G., Hen, Y., & Filya, I. (2002). The effects of temperature on the aerobic stability of wheat and corn silages. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 28, 261–263.
- Betancourt, M., González, I., & Martínez De A., M. (2005). Evaluación de la calidad de los ensilajes. *Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Venezuela*, 8, 1–5.
- Castillo, S. F., Estrada, L., Margalef, M. I., & Tófoli, S. L. (2013). Obtención de harina de nopal y formulación de alfajores de alto contenido en fibra. *Diaeta*, 31(142), 20–26.
- Demagnet-Filippi, R. (2018). Nitrógeno amoniacal en ensilajes. *Plan Lechero Watt's*, 8, 1 - 2.

- Díaz-Ayala, F., Álvarez-García, G. del S., & Sima-Moo, E. (2015). Drying kinetics of slices of nopal (*Opuntia ficus indica*) cladodes in a convective transversal flow dryer. *Agrociencia*, 49, 845–857.
- Dubois, M., Gilles, K., Hamilton, J. K., Rebers, P., & Smith, F. (1951). A colorimetric method for the determination of sugars. *Nature*, 168, 167 – 167. doi:10.1038/168167a0
- Elizalde, H. F., & Gallardo, M. (2003). Evaluación de ensilajes de avena y cebada en la ganancia de peso de vaquillas en crecimiento. *Agricultura Técnica*, 63, 380–386.
- Fransen, S. C., & Strubi, F. J. (1998). Relationships among absorbents on the reduction of grass silage effluent and silage quality. *Journal of Dairy Science*, 81, 2633–2644.
- Griffith, M. P. (2004). The origins of an important cactus crop, molecular evidence. *American Journal of Botany*, 91(11), 1915–1921.
- Jínez, T., Cortés, A., Ávila, E., Casaubon, M. T., & Salcedo, R. (1998). Efecto de niveles elevados de semilla de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) en dietas para pollos sobre el comportamiento productivo y funcionamiento hepático. *Veterinaria México*, 29, 35 - 40.
- Lindgren, S., Pettersson, K., Kaspersson, A., Jonsson, A., & Lingvall, P. (1985). Microbial dynamics during aerobic deterioration of silages. *Food Agriculture*, 36, 765–774.
- López-Hernandez, M., Wing-Ching, J. R., & Rojas-Bourrillón, A. (2015). Valoración nutricional de ensilajes de corona de piña con adición de heno y urea. *Nutrición Animal Tropical*, 9, 65–90.

- López-Herrera, M., & Briceño-Arguedas, E. (2017). Efecto de la especie de leguminosa y la fuente de carbohidratos en la calidad física y química de mezclas para ensilaje. *Nutrición Animal Tropical*, 11, 52–73.
- López-Herrera, M., Wing-Ching J, R., & Rojas-Bourrillón, A. (2009). Características fermentativas y nutricionales del ensilaje de rastrojo de piña (*Ananas comosus*). *Agronomía Costarricense*, 33, 1–15.
- Mardones, A., Cordero, A., Augsburg, A., & De los Ríos- Escalante, P. (2015). Desarrollo del ensilado de alga *Gracilaria chilensis* para la alimentación del abalón rojo *Haliotis rufescens*. *Latin American Journal of Aquatic Research*. 43, 295 – 303.
- McCullough, H. (1967). The determination of ammonia in whole blood by direct colorimetric method. *Clinical Chemical Acta*, 17, 297–2004.
- McDonald, P. (1981). *The biochemistry of silage*. Chichester, U.K. John Wiley & Sons, Ltd.
- Nocet, J. E., & Grant, A. L. (1987). Characterization of “*in situ*” nitrogen and fiber digestion and bacterial nitrogen contamination of hay crop forages preserved at different dry matter percentages. *Journal of Animal Science*, 64, 552–564.
- Noguer M., J. M., & Valles C., A. (1977). El ensilado y sus ventajas. *Extensión Agraria*, 2(1), 1–16.
- Ojeda, F., & Esparance, M. (1991). *Conservación de forrajes*. España. Editorial Pueblo y Educación.
- Peláez-Acero, A., Meneses-Mayo, M., Miranda-Romero, L. A., Megías-Rivas, M. D., Barcena-Gama, R., & Loera, O. (2008). Ventajas de la fermentación sólida con *Pleurotus sapidus* en ensilajes de caña de azúcar. *Archivos de Zootecnia*, 57, 25–33.

- Sánchez-Matta, L. (2005). Estrategias modernas para la conservación de forrajes en sistemas de producción bovina tropical. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 6, 69–80.
- SIAP. (2019). Avance de siembras y cosechas resumen por estado. Retrieved from:
http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do Consultado 5 abril 2019
- Tavares, M. E., Salinas, E., & Galicia, S. (2009). Elaboración de composta orgánica para productores de nopal, como alternativa para el cuidado del ambiente. *Revista Arbitradas*, 7, 3–9.
- Tobía, C., Villalobos, E., Rojas, E., Soto, H., & Moore, K. J. (2008). Nutritional value of soybean (*Glycine max* L.) silage fermented with molasses and inoculated with *Lactobacillus brevis* 3. *Livestock Research for Rural Development*, 20, 1–9.
- Vázquez M., P. (2016). Aprovechamiento del Nopal y Tuna en la Alimentación de Ovinos. Tesis Doctoral. *Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 93 p.*
- Wilkinson, A.G., & Davies, D.R. (2012). The aerobic stability of silage: Key findings and recent development. *Grass Forage Science*. 68, 1 - 19
- WingChing-Jones, R., & Rojas-Bourrillón, A. (2006). Composición nutricional y características fermentativas del ensilaje de maní forrajero. *Agronomía Costarricense*, 30, 87–100.

4. TUNA Y GRANO DE JAMAICA EN LA FERMENTACIÓN *IN VITRO* DE ENSILADOS DE NOPAL-PAJA DE AVENA

4.1. Resumen

Con el objetivo de mejorar la fermentación ruminal de ensilados de nopal-paja de avena, se determinó el efecto de la inclusión de tuna (0, 11, 12, 18 y 24%) y grano de jamaica (0, 9, 10, 17, y 23%). Se probaron cinco tratamientos: cinco mezclas de nopal-paja-tuna-grano de jamaica y un ensilado de alfalfa como referencia. Se midieron: el volumen máximo (V_m , mL g⁻¹), la tasa (S , h⁻¹) y fase Lag (L , h) de la producción de gas; la degradación *in vitro* de la materia seca (DIV), y las fracciones fermentables (g kg⁻¹) rápida (FFR), media (FFM), lenta (FFL) y total (FFT), por la técnica de producción de gas *in vitro*. La mezcla con más grano de jamaica tuvo el menor V_m ($P < 0.05$) antes y después de ensilar. El ensilaje no modificó el V_m ($P > 0.05$), pero incrementó S y DIV. Es de destacar que la mezcla con alta cantidad de grano de jamaica tuvo el menor V_m ($P < 0.05$), pero con mayor DIV. Respecto a las fracciones fermentables, la mezcla nopal-paja de avena tuvo la menor FFR ($P < 0.05$), la alfalfa la mayor FFM ($P < 0.05$), y la inclusión alta (23%) de grano de jamaica disminuyó la FFL ($P < 0.05$). El ensilaje disminuyó 5.8 y 5.0% la FFR, 2.7 y 4.9% la FFM en alfalfa y la mezcla con más grano de jamaica (23%). La FFL disminuyó por efecto del ensilaje, menos en alfalfa (1%) y más en las mezclas de nopal-paja de avena. En general, el ensilaje de alfalfa y la mezcla de nopal-paja de avena adicionada con alta cantidad de grano de jamaica son los que perdieron mayor contenido de FFT respecto a la mezcla bajo en grano y tuna (10 y 11%). Se concluyó que el ensilado de nopal-paja de avena muestra buenas características de fermentación ruminal con respecto al ensilado de alfalfa, y mejora cuando se adiciona de 10% de grano de jamaica y 11% de tuna.

Palabras clave: alfalfa, cinética de fermentación, técnica de producción de gas *Hibiscus sabdariffa* L.

4.2. Abstract

Prickly pear and jamaica grains in the *in vitro* fermentation of nopal–oat straw silages

In order to improve the ruminal fermentation of cactus – oat straw silage, the effect of the inclusion of prickly pear (0, 11, 12, 18 and 24%) and jamaica grains (0, 9, 10, 17, and 23%). Five treatments were probed of five mixtures of cactus-oats straw-prickly pear-jamaica grain and an alfalfa silage as a reference. The maximum volume (V_m , mL g⁻¹), rate (S , h⁻¹) and Lag phase (L , h) of gas production were measured; *in vitro* degradation of dry matter (%IVD) and fractions (g kg⁻¹) of fast (FFR), medium (FFM), slow (FFL) and total (FFT) fermentation, by the technique of producing *in vitro* gas the mixture with the highest content of jamaica grain had the lowest V_m ($P < 0.05$) before silage and silage. The silage did not substantially modify the V_m ($P > 0.05$), but increased the IVD rate. It is noteworthy that the mixture with the highest content of jamaica grains had the lowest V_m ($P < 0.05$), but with higher IVD. Regarding the fermentable fractions, the nopal- oat straw mixture had the lowest FFR ($P < 0.05$), alfalfa the highest FFM ($P < 0.05$), and the highest inclusion (23%) of jamaica grain decreased the FFL ($P < 0.05$). Ensiling process decreased 5.8 and 5.0% the FFR, and 2.7 and 4.9% FFM in alfalfa and the mixture with more jamaica grain (23%). The FFL decreased due to silage, less in alfalfa (1%) and more in the nopal- oat straw mixtures. In general, alfalfa silage and nopal- oat straw mixture added with a high amount of jamaica grains promoted more reduction of the FFT content than the low grain and prickly pear mixture (10 and 11%). Nopal- oat straw silage showed good characteristics of ruminal fermentation compared with the alfalfa silage, and it improved when 10% of jamaica grains and 11% of prickly pear were added.

Keywords: alfalfa, fermentation kinetics, gas production technique, *Hibiscus sabdariffa* L.

4.3. Introducción

La producción intensiva y semi intensiva del nopal verdura y tuna en México tiene gran importancia para la economía nacional (Griffith, 2004; SIAP, 2019). Se destinan 12,630 ha al cultivo de nopal verdura, con una producción anual de 796,953 toneladas (SIAP, 2019). Esta actividad agrícola genera desperdicios de nopal verdura (10.5% de la producción anual) y tuna que no logra comercializarse, y cladodios maduros (10 t ha^{-1}) que resulta de la poda anual del cultivo, los cuales pueden usarse en la alimentación de rumiantes (Ben-Salem, & Nefzaoui, 2018). Una tecnología estudiada para la conservación y manejo del nopal es el ensilaje (Garcés-Molina, Berrio-Roa, Ruiz-Alzate, Guillermo-Serna de León, & Builes-Arangos, 2004), por su alto contenido de agua (Kamel, Dellal, Halbouche, & Ghazi, 2012).

Los cladodios de nopal contienen más del 80% de agua, por lo que para ensilarlo se mezclan con rastrojos o pajas, con el fin de absorber el exceso de agua (McDonald et al., 1987) y favorecer el ensilaje. Esto va en detrimento de su valor nutritivo, pues se incrementa la cantidad de fibra, lo que potencialmente lo hace menos digestible. Por otro lado, en la producción de tuna se destinan 53,000 ha, con una producción anual de 344,000 t (SIAP, 2019) comercializadas, pero se desconoce con exactitud la cantidad real de tuna que se deja madurar y pudrir en campo.

En otros tipos de cultivo, la semilla o grano puede ser otro tipo de esquilmos, como en la producción de jamaica (Cayetano-Catarino & Bernabé-González, 2008). El grano de jamaica, es rico en grasa y proteína (Jínez et al., 1998). La inclusión de tuna y grano de jamaica puede incrementar el contenido de carbohidratos solubles, proteína y grasa, para mejorar el proceso de ensilaje y el valor nutritivo de ensilado (balance de nutrientes, digestibilidad y fermentación ruminal); sin embargo, se desconoce el efecto de la inclusión de tuna madura y grano de jamaica, por lo que el objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de la inclusión de tuna madura y grano de jamaica, como

fuentes de azúcares, proteína y grasa, en la digestibilidad y calidad fermentativa ruminal de ensilados de nopal-paja de avena.

4.4. Materiales y métodos

4.4.1. Microsilos

Se diseñaron microsilos en forma de cilindros de PVC de 11 cm de diámetro y 50 cm de altura ($Volumen=4751.6 \text{ cm}^3$), donde se almacenaron 3.1 kg de material vegetal húmedo, y alcanzaron una densidad de 700 kg m^{-3} . Los microsilos tuvieron una válvula para la recolección de lixiviados y nueve orificios tapados herméticamente con tapón de goma, y distribuidos a tres niveles (alto, medio y bajo) para la medición del pH y la temperatura, a tres alturas y en tres tiempos del ensilaje (tres mediciones por tiempo, una a cada nivel).

4.4.2. Material vegetal

El material usado en las mezclas a ensilar fue: cladodios maduros del cultivar platanillo para nopal verdura del municipio de Otumba, México, tuna madura de desecho (no comercializada) variedad cristal, de la central de abastos de Chicoloapan. El grano provino de la cosecha de jamaica de productores del estado de Guerrero. Este material fue picado y mezclado para formular los tratamientos.

4.4.3. Tratamientos

Los tratamientos fueron seis, uno de alfalfa como referente (T6) y cinco mezclas de cladodio-paja de avena sola (T3) o combinada con tuna-paja de avena-grano de jamaica, en distintas proporciones (T1, T2, T4 y T5; Cuadro 5).

Cuadro 5. Porcentaje de los ingredientes para ensilados.

Ingrediente	Tratamiento					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Nopal	58	60	78	74	65	0
Tuna	24	18	0	11	12	0
Grano jamaica	17	9	0	10	23	0
Paja	1	13	22	15	0	0
Alfalfa	0	0	0	0	0	100

Al inicio y antes de cerrar el silo, se tomaron dos submuestras de cada mezcla sin ensilar (SE). El material se fue compactando en capas usando un pistón de madera, con base circular de diámetro poco menor al de los silos. Posteriormente los silos fueron cerrados herméticamente y el proceso de ensilaje duró 45 días. A la apertura de los silos, una capa de ensilado de 15 cm de profundidad se desechó y se tomaron muestras para determinar la digestibilidad y fermentación ruminal *in vitro* por la técnica de producción de gas.

Las muestras sin ensilar y de 45 días de ensilaje, se pesaron en fresco, se secaron a 65 °C por 48 h y se pesaron en seco, para calcular el contenido de materia seca y humedad. Las muestras secas se molieron (1 mm) y se almacenaron en un lugar fresco para su uso en las pruebas de fermentación.

4.4.4. Digestibilidad y fermentación ruminal *in vitro*

Las muestras se fermentaron por la técnica de producción de gas *in vitro* (Menke & Steingass, 1988) modificada (Miranda-Romero, Vázquez-Mendoza, Burgueño-Ferreira, & Aranda-Osorio, 2018), en el Laboratorio de Microbiología Pecuaria de la Universidad Autónoma Chapingo. Se colocaron 500 mg de muestra molida en frascos de vidrio color ámbar de 125 mL de capacidad, se adicionó 90 mL de inóculo ruminal acompañado de un flujo continuo de CO₂. Los frascos fueron

tapados herméticamente con un tapón de goma y un aro metálico, una vez tapados se incubaron a 39°C en un baño maría. Se midió la presión de gas de fermentación con un manómetro (0 - 1 kg cm²) a 0, 2, 4, 6, 8, 10, 14, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 60 y 72 h de incubación. Las unidades de presión fueron transformadas a volumen con el modelo de regresión $V \text{ (mL)} = [P \text{ (kg cm}^2\text{)} + 0.0495]/0.0185$ ($R^2= 0.98$). A las 72 h de incubación, el contenido de cada frasco se filtró a través de papel filtro previamente pesado. El papel con el material filtrado se secó a 65 °C por 48 h y se pesó. Por diferencia en peso se obtuvo la MS residual, para calcular la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIV).

El inóculo ruminal usado en estas pruebas fue obtenido de un becerro con cánula ruminal. El líquido ruminal se filtró a través de ocho capas de tela de gasa y se diluyó en nueve partes de una solución mineral reducida, la cual contuvo por cada litro, 0.45g de KH₂PO₄, 0.45 g de (NH₄)₂SO₄, 0.90 g de NaCl, 0.18 g MgSO₄, 0.12 g de CaCl₂, 4 g de Na₂CO₃ y 20 mL de solución reductora.

Se obtuvo también el volumen acumulado para cada tiempo de medición, el cual se usó para calcular los parámetros de la cinética de la producción de gas: volumen máximo (Vm; mL g⁻¹), tasa (S, h⁻¹) y fase Lag (L; h), del modelo logístico $V_0=V_m/(1+e^{(2-4*S*(T-L)})$ (Pitt, Cross, Pell, Schofield, & Doane, 1999) y los procedimientos GLM, MEANS y MIXED de SAS (SAS, 2004).

Los valores de volumen (mL g⁻¹ de sustrato) de cada tiempo de medición, se usaron para obtener el volumen fraccional de gas para los intervalos de 0 a 8, 8 a 24 y 24 a 48 h de incubación, posteriormente se transformaron a fracciones fermentables (g kg⁻¹) de rápida (FR), media (FM) y lenta fermentación (FL), con los modelos de regresión lineal $V_{f0-8}=0.4266*(mg \text{ FR})$; $V_{f8-24}=0.6152*(mg \text{ FM})$, y $V_{f24-72}= 0.3453*(mg \text{ FL})$. Con la suma de estas fracciones se obtuvo la fracción total fermentable (Miranda-Romero, Sandoval-González, & Amendola-Massiotti, 2015).

4.5. Resultados y discusión

4.5.1. Cinética de fermentación ruminal *in vitro*

El volumen de gas producido por la fermentación de los ensilados de nopal-tuna-grano de jamaica fluctuó entre 99.28 y 472.27 mL g⁻¹ (Vm) a 72 horas de incubación, lo que fue menor a lo obtenido por Martínez-Loperena, Castelán-Ortega, González-Ronquillo, & Estrada-Flores (2011) para una mezcla 80:20 rastrojo de maíz avena (256.6 ml g⁻¹); sin embargo, los resultados obtenidos son muy parecidos a los encontrados por Antolín-Domínguez, González-Ronquillo, Goñi-Cedeño, Domínguez-Vara, & Ariciaga-González (2009) ensilando 4 variedades de maíz (217.58 ml g⁻¹).

De los materiales a ensilar, la alfalfa tuvo el mayor ($P < 0.05$) potencial de fermentación ($V_m = 252.35$ mL g⁻¹), en comparación con la mezcla de nopal-paja con alta cantidad de grano de jamaica (T5; $V_m = 168.2$ mL g⁻¹) (Cuadro 6). El V_m de la mezcla nopal-paja (T3), y de nopal-paja adicionada con una cantidad moderada de grano de jamaica y tuna (T2 y T4), fueron similares ($P > 0.05$) al de alfalfa. Sin embargo, la DIV fue menor ($P < 0.05$) para alfalfa (59.7%) que las mezclas nopal-paja con alta proporción de grano de jamaica (T1 y T5) (73.6 y 82.8%, respectivamente).

Al comparar entre forrajes sin ensilado y ensilado, se observó que incrementaron el V_m , S y DIV (Cuadro 6), después del proceso de ensilaje. No obstante, al comparar entre tratamientos se observó que para el caso de V_m , solo el ensilado de alfalfa fue el que incrementó ($P < 0.05$), en el resto de los ensilados disminuyó el V_m .

Cuadro 6. Parámetros de la cinética de producción de gas, obtenidos por la fermentación *in vitro* de ensilados de nopal-tuna-grano de jamaica.

Proceso	Tratamiento	Vm	S	Lag	DIV
		mL g ⁻¹	h ⁻¹	h	%
Ensilado	1	141.57	0.058	3.42	72.39
	2	187.50	0.039	1.76	73.08
	3	215.04	0.027	2.88	72.11
	4	227.73	0.029	1.90	66.87
	5	99.18	0.054	5.14	80.08
	6	472.27	0.042	5.12	64.25
Sin ensilar	1	139.95	0.045	2.70	73.35
	2	203.50	0.032	3.35	67.87
	3	219.35	0.028	4.96	66.71
	4	232.65	0.031	3.34	59.90
	5	168.20	0.045	3.45	82.75
	6	252.35	0.043	3.74	59.72
R ²		0.18	0.96	0.79	0.86
EE		96.85	0.00	0.27	1.02
DMS 0.05		149.63	0.00	0.42	1.58

Vm= Volumen máximo, S= tasa de acumulación, Lag= fase de retardo de producción de gas, DIV= Digestibilidad *in vitro*

Peláez-Acero et al. (2008) encontraron valores similares en la tasa de producción de gas (S) (0.0299 y 0.0364 h⁻¹) con ensilados de caña de azúcar integral y *Pleurotus*. Al comparar entre no ensilado y ensilado, se observó que la tasa de producción de gas (S) incrementó (P<0.05) en los ensilados de las mezclas a las que se les incluyó tuna, por consiguiente, se redujo el contenido de nopal (T1, T2 y T5). Como mencionan López-Herrera y Briceño-Arguedas (2017), la baja respuesta a la fermentación puede deberse a la cantidad de proteína y de carbohidratos que se contengan dentro del ensilado, ya que la proteína puede actuar como una sustancia *buffer*, afectando la DIV.

La alfalfa tuvo el mayor (P<0.05) potencial de fermentación, demostrado con el volumen máximo de fermentación (252.35 mL g⁻¹), en comparación con la mezcla de nopal-paja con alta cantidad de grano de jamaica (T5; Vm=168.2 mL g⁻¹) (Cuadro 6). El Vm de la mezcla nopal-paja (T3), y de nopal-paja adicionada con una cantidad moderada de grano de jamaica y tuna (T2 y T4), fueron similares

($P>0.05$) al de alfalfa. Sin embargo, la DIV fue menor ($P<0.05$) para alfalfa (59.7%) con respecto a las mezclas nopal-paja con alta proporción de grano de jamaica (T1 y T5) (73.3 y 82.7%, respectivamente).

Al comparar entre forrajes no ensilado y ensilado, se observó de manera general que incrementaron el Vm, S y DIV (Cuadro 6). No obstante, al comparar entre tratamientos se observó que para el caso de Vm, solo el ensilado de alfalfa fue el que incrementó ($P<0.05$), en el resto de los ensilados el Vm disminuyó.

Peláez-Acero et al. (2008); Rodríguez, Acevedo, y Riquelme (1997) y Vázquez (2016) encontraron valores semejantes a los obtenidos en el presente estudio, teniendo un promedio de 68% de DIV, lo cual nos da una idea que el forraje podría tener una buena calidad digestible en el rumen de los animales.

4.5.2. Fracciones fermentables

Las proporciones de fracciones fermentables en alfalfa y las mezclas de nopal-tuna, variaron en función de la inclusión de tuna y grano de jamaica y por efecto del proceso de ensilaje (Cuadro 7). En virtud de los intervalos de tiempo de incubación usados para el cálculo de las fracciones fermentables, en la FFR, FFM y FFL se fermentan principalmente, pero no exclusivamente, carbohidratos solubles, almidón y carbohidratos estructurales, respectivamente (Miranda et al., 2015). Se observó que la mezcla ensilada de nopal-paja del T5 tuvieron la menor FFR ($P<0.05$), lo que es indicativo de que contiene menor cantidad de carbohidratos solubles en comparación con las mezclas de nopal-paja adicionadas de tuna y grano de jamaica. Abidi et al. (2009) y Batista et al. (2003) reportan valores de 87 y 75 ml g⁻¹ MS para la FFR de diferentes variedades de nopal.

Cuadro 7. Parámetros de las fracciones fermentables, obtenidas por la fermentación *in vitro* de ensilados de nopal-tuna-grano de jamaica (g kg⁻¹)

Proceso	Tratamiento	FFR	FFM	FFL	FFT
Ensilado	1	112.1	131.6	42.2	285.9
	2	136.1	142.0	164.9	443.0
	3	103.8	133.3	296.8	533.9
	4	130.4	149.0	283.6	563.0
	5	55.4	98.4	48.1	201.8
	6	99.2	189.4	204.7	493.3
Sin ensilar	1	100.6	114.8	99.1	314.5
	2	100.5	143.9	252.9	497.3
	3	78.7	147.3	320.1	546.2
	4	110.1	152.8	303.2	566.1
	5	105.3	146.9	122.8	375.1
	6	157.0	216.4	215.1	588.5
R ²		0.74	0.88	0.98	0.94
EE		0.65	0.63	0.64	1.38
DMS 0.05		10.10	9.70	9.90	21.30

FFR= Fracción fermentable rápida, FFM= Fracción fermentable media, FFL= Fracción fermentable lenta, FFT= Fracción fermentable total

La alfalfa ensilada y sin ensilar fue el forraje con mayor FFM ($P < 0.05$), con 189.4 y 216.4 g kg⁻¹, respectivamente, en comparación con las distintas mezclas de nopal-paja, lo que indica que la inclusión de tuna y grano de jamaica, no incrementa la FFM, sugiriendo que el contenido de almidón o carbohidratos de reserva no fue incrementado. El valor promedio de FFM de los tratamientos de ambos procesos (E y SE) fue mayor a lo obtenido por Vázquez (2016); Batista *et al.* (2009) y Abidi *et al.* (2009) con FFM promedios de 106, 72 y 110 ml g⁻¹; sin embargo, fueron similares a los obtenidos por Salem *et al.* (2002) con 134.5 ml g⁻¹.

Se observó mayor concentración de FFL en las mezclas de nopal-paja de avena a las que se incluyó una cantidad moderada de grano de jamaica (9 y 10%) y de tuna (11 y 18%), pero esta misma fracción (FFL) fue menor en las mezclas de nopal-paja de avena conteniendo una alta proporción de grano de jamaica (23%; T1 y T5), en comparación con la alfalfa (Cuadro 7).

No se tiene una explicación clara a este resultado, pero es posible que los cladodios de nopal contribuyan a aumentar la FFL, pues se observó que los T3 y T4, que contienen mayor cantidad de nopal (78 y 74%, respectivamente) tuvieron una FFL mayor que T2, con menor cantidad de nopal (60%). Lo anterior puede atribuirse al mucílago del nopal (Sepúlveda, Sáenz, Aliaga, & Aceituno, 2007). Los T1 y T5, con una cantidad similar de nopal a la del T2, mostraron menor FFL, lo cual fue atribuido a que se incluyó más tuna y grano de jamaica (24 y 11% tuna, y 17 y 23% grano de jamaica, respectivamente). Vázquez (2016) reporta FFL de diferentes variedades de nopal y de tuna con valores muy por debajo de lo obtenido en el presente estudio (102 y 10 ml g⁻¹, respectivamente).

Respecto a la fracción fermentable total (FFT), se encontró que la alfalfa y las mezclas con mayor proporción de nopal T3 y T4 (78 y 74%, respectivamente) tuvieron la mayor FFT ($P < 0.05$), seguida de la mezcla con 60% de nopal (T2), adicionada con 18% de tuna y 9% grano de jamaica (Cuadro 7). Las mezclas con cerca del 60% de nopal (T1 y T5) pero con alta cantidad de tuna (24 y 12%, respectivamente) y grano de jamaica (17 y 23%, respectivamente) tuvieron la menor FFT. A pesar de ser un forraje, la alfalfa ensilada y sin ensilar presentó un FFT alto (493.3 y 588.5 ml g⁻¹), parecido al promedio del grano de maíz (440 – 690 ml g⁻¹) reportado por Lara, Canché, Magaña, Aguilar, y Sanginés (2009).

4.6. Conclusiones

Los parámetros de fermentación ruminal (Vm, S y L) del ensilado de nopal-paja de avena son buenos y similares a los del ensilado de alfalfa, los cuales al analizarlos como fracciones fermentables (FFR, FFM, FFL y FFT), son mejores que los del ensilado de alfalfa. Las características fermentativas mejoraron cuando se incluyó tuna (11%) y grano de jamaica (10%), reduciendo la pérdida de FFT, además, la tuna aporta carbohidratos a la dieta de ganado. Por sus características fermentativas, los ensilados de nopal-tuna-grano de jamaica pueden ser una buena fuente de forraje para la nutrición animal, teniendo una buena fermentación en el rumen; la cual además de servir para la alimentación

de rumiantes, podría ayudar a reducir el impacto de contaminación al utilizar materiales provenientes de subproductos agrícolas, dando un valor agregado a estos, beneficiando y ayudando a pequeños y medianos productores, ofreciendo una nueva alternativa de alimentación para la época de estiaje del forraje.

4.7. Literatura citada

Abidi, S., Ben-Salem, H, Martín-García, A. I. & Molina-Alcaide, E. (2009). Ruminant fermentation of spiny (*Opuntia amyclae*) and spineless (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) cactus cladodes and diets including cactus. *Animal Feed Science and Technology*, 149, 333–340.

Antolín-Domínguez, M., González-Ronquillo, M., Goñi Cedeño, S., Domínguez-Vara, I. A., & Ariciaga-González, C. (2009). Rendimiento y producción de gas *in vitro* de maíces híbridos conservados por ensilaje o henificado. *Técnica Pecuaria en México*, 47, 413–423.

Batista, A. M., Mustafa, A. F., McAllister, T., Wang, Y., Soita, H., & McKinnon, J. J. (2003). Effect of variety on chemical composition, *in situ* nutrient disappearance and *in vitro* gas production of spineless cacti. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83, 440-445.

Ben-Salem, H., & Nefzaoui, A. (2018). *Opuntia* forraje estratégico y herramienta eficiente para combatir la desertificación en la región wana. In: *Cuaderno Técnico de La FAO*. Viale delle Terme di Caracalla, Roma, Italia.

Cayetano-Catarino, M., & Bernabé-González, T. (2008). Cultivo de *Pleurotus* sobre residuos de las cosechas de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) y plátano (*Musa paradisiaca*). *Revista Mexicana de Micología*, 26, 57–60.

Garcés-Molina, A. M., Berrio-Roa, L., Ruiz-Alzate, S., Guillermo-Serna de León, G., & Builes-Arangos, A. F. (2004). Ensilaje como fuente de alimentación para el ganado. *Revista Lasallista de Investigación*, 1, 66–71.

- Griffith, M. P. (2004). The origins of an important cactus crop, molecular evidence'. *American Journal of Botany*, 91(11), 1915–1921.
- Jínez, T., Cortés, A., Ávila, E., Casaubon, M. T., & Salcedo, R. (1998). Efecto de niveles elevados de semilla de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) en dietas para pollos sobre el comportamiento productivo y funcionamiento hepático. *Veterinaria México*, 29, 35 - 40.
- Kamel, L. B., Dellal, A., Halbouche, M., & Ghazi, K. (2012). Effect of incorporation of spineless *Opuntia ficus indica* in diets on biochemical parameters and its impact on the average weight of ewes during the maintenance. *Global Veterinarian*, 8, 352–359.
- Lara, P. E., Canché, M. C., Magaña, H., Aguilar, E., & Sanginés, J. R. (2009). Producción de gas *in vitro* y cinética de degradación de harina de forraje de morera (*Morus alba*) mezclada con maíz. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 43 (3), 273 – 279.
- López-Herrera, M., & Briceño-Arguedas, E. (2017). Efecto de la especie de leguminosa y la fuente de carbohidratos en la calidad física y química de mezclas para ensilaje. *Nutrición Animal Tropical*, 11, 52–73.
- Martínez-Loperena, R., Castelán-Ortega, O. A., & González-Ronquillo, M. Estrada-Flores, J. G. (2011). Determinación de la calidad nutritiva, fermentación *in vitro* y metabolitos secundarios en arvenses y rastrojo de maíz utilizados para la alimentación del ganado lechero. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 525–536.
- McDonald, L. C., McFeeters, R. F., Daeschel, M. A., & Fleming, H. P. (1987). A differential medium for the enumeration of homofermentative and heterofermentative lactic acid bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 53(6), 1382–1384.

- Menke, K. H., & Steingass, H. (1988). Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid. *Animal Research Development*, 28, 7–55.
- Miranda-Romero, L. A., Sandoval-González, L., & Amendola-Massiotti, R. (2015). Producción de gas como método para estimar *in vitro* la concentración de carbohidratos fermentables en rumen. In: *XXIV Congreso de la Asociación Latinoamericana de Producción Animal*. Puerto Varas, Chile. Noviembre 2015.
- Miranda-Romero, L. A., Vázquez-Mendoza, P., Burgueño-Ferreira, J. A., & Aranda-Osorio, G. (2018). Nutritive value of cactus pear silages for finishing lambs. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 20, 196–215.
- Peláez-Acero, A., Meneses-Mayo, M., Miranda-Romero, L. A., Megías-Rivas, M. D., Barcena-Gama, R., & Loera, O. (2008). Ventajas de la fermentación sólida con *Pleurotus sapidus* en ensilajes de caña de azúcar. *Archivos de Zootecnia*, 57, 25–33.
- Pitt, R. E., Cross, T. L., Pell, A. N., Schofield, P., & Doane, P. H. (1999). Use of *in vitro* gas production models in ruminal kinetics. *Mathematical Biosciences*, 159(2), 145–163.
- Rodríguez, A. A., Acevedo, J. A., & Riquelme, E. O. (1997). Estabilidad aeróbica de ensilaje de pasturas tropicales nativas. efecto del ácido propiónico y tiempo de exposición aeróbica. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 5, 83–85.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., & Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Enviroments*, 68, 534–545.

SIAP. (2019). Avance de siembras y cosechas resumen por estado. Retrieved from:

http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do Consultado el 5 abril 2019

Vázquez M., P. (2016). Aprovechamiento del Nopal y Tuna en la Alimentación de Ovinos. Tesis Doctoral. *Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 93 p.*