



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA**

**“Efecto de la etapa fenológica y uso de aditivos en el
contenido de taninos en ensilado de sorgo”**

TESIS

Que para obtener el título de:
Médica Veterinaria Zootecnista

PRESENTA:

Karla Galván Camacho

ASESORES:

Dr. Carlos Manuel Arriaga Jordán

Dr. Jesús Israel Vega García

M.V.Z. Alejandro Adelaido Morales Cruz

REVISORES:

Dr. Ernesto Morales Almaraz

Dr. Juan Edrei Sánchez Torres



Toluca de Lerdo, México, 2024

RESUMEN

Ante la situación actual, de forma general tanto el sector agrario como el sector ganadero enfrentan múltiples desafíos a consecuencia del cambio climático, mismos que representan dificultades para los sistemas de producción lechera, en particular los de pequeña escala, mismos que basan su producción en el uso de forrajes de la temporada para la alimentación del ganado. Los cambios en los patrones de precipitación y el aumento de temperatura afectan el manejo alimenticio de los sistemas de producción de leche a pequeña escala (SPLPE) por lo cual es necesario buscar alternativas. En este caso se evaluó el uso del ensilado de sorgo, ya que ha demostrado una gran capacidad de adaptación a distintos climas, especialmente resistiendo a las altas temperaturas y el estrés hídrico.

Siguiendo la misma línea y ante la necesidad de cambiar los sistemas de producción para reducir las emisiones de metano entérico al ambiente, se estudió el contenido de taninos y compuestos fenólicos presentes en el ensilado de sorgo, puesto que los metabolitos secundarios, como los taninos, han demostrado tener un papel importante en la modificación de los patrones de fermentación ruminal, reduciendo así las emisiones finales de metano entérico; por lo cual el uso de ensilado de sorgo representa dos beneficios: en primera el aprovechamiento de la biomasa producida, además de su almacenaje para la época de estiaje; y segundo, ayudar a mitigar la huella ambiental de la ganadería logrando producciones rurales más sustentables.

El objetivo de este trabajo fue determinar el contenido de fenoles totales, fenoles no tánicos, taninos totales y taninos condensados, presentes en el ensilado de sorgo. Las muestras analizadas provinieron de ensilados elaborados a base de sorgo forrajero variedad "Caña Dulce" cosechados en tres fechas diferentes a los 120, 135 y 150 días post siembra; cortados a 15 cm del suelo. Durante su elaboración en el laboratorio, el sorgo fue dividido en tres grupos de tratamientos; control, urea e inóculo bacteriano; los metabolitos secundarios se determinaron mediante técnica espectrofotométrica.

Los resultados obtenidos mostraron que, todos los factores, tanto los tratamientos como las fechas de cosecha influyeron de manera significativa en el contenido de los metabolitos secundarios; fenoles totales, fenoles no tánicos, taninos totales y taninos condensados; puesto que presentaron valores $p \leq 0.05$. Para fenoles totales tuvieron su valor más alto el grupo control, seguido por el grupo inóculo y urea. Para fenoles no tánicos, el grupo control presentó el valor más alto, seguido de los grupos inóculo y urea. Para taninos totales, el grupo control presentó el valor más alto, seguido del grupo inóculo y urea. Para taninos condensados, el grupo inóculo presentó la medida más alta, seguido por los grupos control y urea.

La realización de este estudio pretende aportar información sobre el contenido de ciertos metabolitos secundarios presentes en el sorgo, en este caso en el ensilado del mismo, analizando los efectos de los tratamientos y la fecha de cosecha en el contenido de compuestos fenólicos y tánicos; a fin de fomentar su uso como forraje alternativo que apoye el régimen alimentario de los SPLPE; ofreciendo así alternativas a la problemática ambiental exponiendo los beneficios del uso de estos

compuestos en la alimentación animal, por su efecto anti metanogénico descrito en investigaciones previas.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
I.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
1.	Cambio climático.....	3
1.1.	Efecto del cambio climático en la producción de forrajes	3
1.2.	Efecto del cambio climático en la producción animal	4
1.3.	México y el cambio climático	5
2.	Sistemas de producción ganadera en México	5
3.	Sorgo	7
3.1	Etapas fenológicas del sorgo	8
4.	Ensilado	9
4.1	Uso de aditivos en el ensilaje	10
5.	Metabolitos secundarios	10
5.1	Taninos	11
5.2	Uso de aditivos en ensilados en relación con el contenido de taninos y sus efectos. 11	
II.	JUSTIFICACIÓN.....	13
III.	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	14
IV.	HIPÓTESIS	15
V.	OBJETIVOS	16
	Objetivo General	16
	Objetivo Específico	16
VI.	MATERIAL	17
	Material Biológico	17
VII.	MÉTODO.....	18
	Análisis Químico	19
	Análisis estadístico	20
VIII.	LÍMITE DE ESPACIO	22
IX.	LÍMITE DE TIEMPO	23
X.	RESULTADOS.....	24
XI.	DISCUSIÓN.....	33
XII.	CONCLUSIONES.....	36
XIII.	SUGERENCIAS	37
XIV.	LITERATURA CITADA.....	38

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, hablar del cambio climático refiere a los pormenores de un fenómeno global que ha captado la atención mundial debido a su impacto significativo en múltiples aspectos de la vida en la Tierra. Este fenómeno se refiere al aumento gradual de la temperatura promedio en la superficie terrestre y los océanos (Svatetz, 2023), así como modificaciones en los regímenes de precipitación y la intensificación de fenómenos meteorológicos extremos (Tirado Blázquez, 2010).

Las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles fósiles, la deforestación, la agricultura intensiva y la ganadería, han aumentado la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, especialmente de CO₂ (Cabrera-López et al., 2021), lo que ha contribuido significativamente al cambio climático.

La ganadería tiene un impacto en el cambio climático debido a la producción de gases de efecto invernadero, especialmente metano y óxido nitroso, que son liberados durante el proceso de digestión del ganado y la gestión de los desechos animales (Castelán-Ortega et al., 2014). El metano en particular es un gas de efecto invernadero mucho más potente que el dióxido de carbono en el corto plazo, por lo que su capacidad de calentamiento es mayor.

Debido a la dependencia de la producción ganadera de los recursos naturales, en cuanto a insumos para la alimentación como los forrajes, granos y agua, se ve directamente afectada por el cambio climático. Las altas temperaturas en combinación con sequías más frecuentes y prolongadas, así como los eventos climáticos extremos como inundaciones y tormentas, afectan la disponibilidad y calidad de los pastizales naturales, praderas cultivadas, y cultivos forrajeros reduciendo la capacidad de pastoreo y la producción de forrajes.

Al existir una menor disponibilidad de los forrajes, aumentan los costos de producción; y al ser estos de baja calidad, resulta en una disminución en la producción de carne y leche, una mayor presión sobre los sistemas de cultivo y pastoreo, así como de los recursos hídricos. Por su parte, el estrés térmico causado por las olas de calor puede afectar negativamente la salud y el bienestar de los animales, reduciendo su rendimiento productivo y afectando su salud, lo que representa pérdidas económicas significativas para los ganaderos.

La producción de cultivos también se ve afectada por el cambio climático pues es susceptible a los cambios en las condiciones climáticas, como son la temperatura, precipitación y patrones de sequía. Estos cambios causan alteraciones en los ciclos de crecimiento de los cultivos, aumentan el estrés hídrico y la incidencia de plagas y enfermedades, dando como resultado una evidente disminución de los rendimientos de los cultivos.

Además, las variaciones en las estaciones de siembra y cosecha, así como la limitación o incertidumbre en la disponibilidad de agua para riego, son factores que dificultan la planificación y gestión de las operaciones agrícolas, lo que afecta la

seguridad alimentaria y la estabilidad económica de los productores y el resto del sector primario, de cuyas actividades de producción se sostienen muchas familias en México (Rello y Saavedra, 2013).

Los posibles efectos del cambio climático para México se prevén en términos de disminución de la precipitación pluvial o cambio en el patrón de lluvias con periodos secos más prolongados, lo cual representa grandes retos de estrés hídrico para la actividad agropecuaria (Zamora-Martínez, 2015).

En México, como en todo el mundo, es necesario aumentar la sostenibilidad de los sistemas ganaderos, disminuyendo la huella ambiental que contribuye al cambio climático, así como la producción de alimentos de origen animal cuya demanda aumenta en nuestros países, lo cual requiere aumentar la productividad para disminuir la intensidad de las emisiones de gases efecto invernadero (Makkar, 2016).

A fin de lograrlo, es importante desarrollar estrategias de alimentación apropiadas para los sistemas de producción ganadera, basadas en forrajes de calidad. Ante los efectos del cambio climático, se hace necesario investigar forrajes mejor adaptados a los posibles efectos del cambio climático (Thornton et al., 2009).

El ensilado de sorgo ha sido planteado como un forraje alternativo para los valles altos del centro de México dados su menor requerimientos de agua y resistencia a periodos prolongados de sequía que afectan a otros cultivos forrajeros como el maíz (Rosas-Dávila et al., 2024).

El sorgo se caracteriza por la presencia de metabolitos secundarios como taninos que tienen efectos en la fermentación ruminal, pudiendo reducir la emisión de metano (Rosas-Dávila, sin publicar, Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México); pudiendo ser una alternativa forrajera en las estrategias de alimentación del ganado lechero en sistemas de producción de leche en pequeña escala, y una opción para reducir la huella ambiental de la ganadería.

La concentración de nutrientes en los forrajes está determinada por la etapa fenológica (etapa de crecimiento) en que se encuentren al momento de la cosecha. Por lo tanto, se hace necesario determinar el contenido de taninos en ensilado de sorgo en diferentes fechas de cosecha.

I. REVISIÓN DE LITERATURA

1. Cambio climático

Se define como cambio climático a toda variación considerable en el esquema climatológico del planeta. Se origina por múltiples causas, si bien pueden ser naturales, son innegables la magnitud de aquellas originadas por las actividades humanas; cuyo principal resultado es el calentamiento del planeta, reflejado en el aumento de las temperaturas promedio en la extensión terrestre y los océanos (INECC, 2018a), y cambio en los patrones de lluvia en cuanto a magnitud de las precipitaciones y la irregularidad en las épocas de lluvias (Zamora-Martínez, 2015).

1.1. Efecto del cambio climático en la producción de forrajes

El clima es un sistema formado por múltiples componentes y factores que interactúan entre sí, es por ello por lo que cuando uno de estos elementos se modifica, causa una reacción en cadena que termina alterando a todo el sistema. Conocer los cambios que ocurren a diferentes niveles tanto local, regional y global, permite tener un conocimiento preliminar de la situación actual y así poder buscar y desarrollar estrategias de adaptación. El trabajo de científicos de entidades como la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), así como el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), ha permitido hacer proyecciones sobre las repercusiones de esta problemática a observar en las próximas décadas, entre las que destacan el incremento de temperaturas promedio en tierra y mar, cambio en los patrones naturales de precipitaciones, aumento en el número de inundaciones anuales, sequías persistentes, incremento de días y noches cálidas a nivel mundial, decremento de los niveles de agua apta para consumo humano, de uso agrícola e industrial, merma en la producción agrícola, reducción de los glaciares a nivel mundial, modificación en los ecosistemas y disminución de la biodiversidad, aumento en la predisposición a incendios forestales, disfunción de ciclos biológicos y modificaciones en los patrones de distribución de la vegetación y vida silvestre en el territorio mundial (INECC, 2018b).

Los gases de efecto invernadero, en especial el CO₂, son clave para las proyecciones sobre el cambio climático y sus efectos, en particular de las futuras condiciones ambientales. Por lo anterior, generar y seguir estrategias de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, como medida de protección del medio ambiente y sus componentes, debe convertirse en una meta a mediano, corto y largo plazo (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012).

A diferencia de otros conceptos, según los acuerdos de la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC), en su artículo primero, consideran por separado al cambio climático causado directamente por actividades antropogénicas, del que, por causas naturales, causa fluctuación en los niveles promedio del clima mundial. En los últimos años, las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado, particularmente de metano (CH₄), óxido nitroso (NO₂) y dióxido de carbono (CO₂) (Soriano-Robles, 2018).

En virtud de que las actividades agrícolas y forestales emiten el 25% de los niveles totales de gases de efecto invernadero, deben seguirse estrategias de aprovechamiento de recursos forestales y vegetales, y aplicar buenas prácticas de producción ganadera que mediante el manejo de las dietas permitan reducir las emisiones de metano entérico (Soriano-Robles, 2018) como principal gas de efecto invernadero generado por la ganadería bovina.

1.2. Efecto del cambio climático en la producción animal

La ganadería, al ser una actividad de producción humana, no está exenta de ser señalada como dañina para el planeta, pues las incorrectas prácticas de producción ganadera de años anteriores la han puesto en la mira como una de las actividades contaminantes por la emisión de gases de efecto invernadero, principalmente como se ha mencionado, de metano entérico y óxido nitroso (Soriano-Robles, 2018)

Los fenómenos naturales, entre los que destacan huracanes, inundaciones y sequías, consecuencia del cambio climático; han perjudicado a los sistemas de producción agropecuaria en distintos niveles, resaltando el encarecimiento de insumos y productos, además de reducir la producción, lo cual se refleja en pérdidas económicas que limitan la calidad de vida de los productores. Los efectos negativos del cambio climático se observan en distintos niveles, no solo para los grupos sociales, mediante el análisis mundial se ha destacado el daño causado a los ecosistemas, la biodiversidad y áreas destinadas a la producción agropecuaria. Con la intención de mantener la producción de alimentos, cada vez más demandada por el crecimiento poblacional, se ha recurrido a la deforestación, para cambios de uso de suelo y sistemas de producción no sostenibles que, si bien reducen los tiempos de producción, contribuyen a la problemática mundial (Ferrer et al., 2015).

La demanda por productos de origen animal obliga a los sistemas de producción a crecer más rápido que otras industrias, generando así la “revolución ganadera”, que satisface las necesidades de consumo, pero también requiere de reubicar los centros de producción, así como de la modificación de los sistemas de producción y ventas, además de ejercer presión en los recursos locales sean estos terrenos, mano de obra o ambientales, teniendo así un impacto nocivo en los recursos naturales. Si bien el crecimiento y desarrollo de la ganadería contribuye a la dinámica económica de las regiones productivas, afecta también su calidad de vida, modificando su entorno social, ambiental y cultural (Ferrer et al., 2015).

Mantener un equilibrio entre la producción constante de alimentos vegetales o animales, así como mantener una relación sustentable con el ambiente conservando y aprovechando de la mejor forma los recursos naturales, se ha convertido en una preocupación mundial, que busca solventarse mediante el trabajo interdisciplinario, a fin de generar estrategias para aminorar y mitigar los efectos adversos de la ganadería actual (Ferrer et al., 2015).

Dada la importancia es por ello por lo que para efficientizar su producción deben tomarse en cuenta aspectos genéticos, de manejo, nutrición y alimentación, salud y bienestar, procurando mantener su ciclo productivo constante y en relación armónica con el ambiente que les rodea (FAO, 2011).

1.3. México y el cambio climático

Desde 1960 ha incrementado 0.85 °C la temperatura promedio en el país, y 1.3 °C en temporadas invernales, haciendo así que el país sea más cálido, reduciendo los días frescos y aumentando las noches cálidas; además, en la región sureste de la república se ha disminuido en número de precipitaciones anuales. Según las proyecciones esperadas para el 2100, en México la temperatura aumenta de 2.5 a 3.5 °C y hasta 4 °C en la frontera norte, mientras que las precipitaciones disminuirán entre un 5 a 10% en promedio (UK Met Office, 2011).

Este escenario hace que se esperen disminuciones significativas en la producción agropecuaria, donde la problemática en cuanto a la disponibilidad de agua para actividades de la producción se verán fuertemente reducidas por la creciente demanda de agua para centros urbanos; lo que aunado a la falta de precipitaciones y el aumento de temperaturas harán a grandes partes del territorio mexicano más secas; mientras que en contraparte en otras regiones del país incrementarán el volumen de precipitaciones aumentando el riesgo de inundaciones (INECC, 2018b).

El aumento en la temperatura promedio del territorio nacional de entre 3 a 4 °C, además de una reducción en las precipitaciones nacionales de más del 15% anual afecta la producción agropecuaria tanto en los sistemas agrícolas como ganaderos que se verán sometidos a factores estresantes por el aumento en las temperaturas y la falta de agua, así como el aumento de la evapotranspiración (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012).

La república mexicana posee un extenso territorio, de cual un 75% se emplea para la realización de labores agropecuarias. En lo que a la ganadería respecta, del anterior porcentaje, un 58% corresponde a superficie destinada a agostaderos; que basan su producción bovina en el pastoreo. Si bien el modelo extensivo produce y emite en gran cantidad gases de efecto invernadero, también representa la mayor esperanza en cuanto a la búsqueda de sistemas productivos amigables con el ambiente; pues sí se realizan buenas prácticas de producción ganadera basadas en estrategias como el adecuado manejo de pastizales, cambios en los parámetros de alimentación animal y mejoramiento genético, la ganadería cuenta con un alto potencial de mitigación de impacto ambiental incluidas las emisiones de gases de efecto invernadero, estimando una reducción del 20 al 40% de emisiones respecto al nivel actual. Lograr sistemas de producción eficientes y sustentables a largo plazo, conservando los recursos y evitando daños a los ecosistemas y poblaciones susceptibles; es un trabajo complejo que debe realizarse incluyendo a todos los involucrados: animales, unidades de producción, cadena productiva, dueños, operarios y especialistas en cuidado ambiental y animal (Corona, 2018).

2. Sistemas de producción ganadera en México

En el medio rural mexicano, una de las actividades más comúnmente realizadas es la ganadería, particularmente de bovinos. La ganadería realizada en el país se subdivide en sistemas, uno de ellos es el sistema de doble propósito, del cual se obtienen dos productos: leche, mediante el ordeño de hembras recién paridas, y la posterior venta de los becerros nacidos para su engorde y comercialización como productos cárnicos (Chalate-Molina et al., 2010).

En el territorio mexicano existe variedad de climas en los cuales se desarrollan actividades primarias, dado el amplio terreno que ocupan las más destacadas son zonas áridas con un 49.1%, seguida del trópico seco-húmedo con un 27.7% y áreas templadas con el 23.2% de extensión territorial. El trópico seco-húmedo, es considerado una cornucopia de productos alimentarios pecuarios, debido a que los factores climatológicos y geográficos le permiten acceder fácilmente a recursos como suelos ricos en nutrientes, agua, pasturas y subproductos a precios bajos; la suma de estos factores permite producciones a menor costo que las de sistemas lecheros o cárnicos de tipo intensivo desarrollados en otras zonas de la república mexicana (Martínez-González et al., 2017).

Destacan los sistemas de producción de leche en pequeña escala que representan una opción de desarrollo al contribuir a reducir la pobreza en el medio rural al generar opciones de ocupación e ingresos superiores a otras actividades (Espinoza-Ortega et al., 2007); con un gran potencial para aumentar su productividad, disminuir su huella ambiental y acrecentar su sostenibilidad (Prospero-Bernal et al., 2017).

Ante los retos que enfrenta la producción de leche, en particular los sistemas de producción de leche en pequeña escala, frente a la necesidad de desarrollar estrategias de alimentación basadas en forrajes de calidad para reducir sus costos de alimentación y aumentar la productividad (Prospero-Bernal et al., 2017) se requiere evaluar forrajes adaptados a las nuevas condiciones creadas por el cambio climático (Thornton et al., 2009).

El forraje de sorgo ensilado, como recurso forrajero para la época seca crítica por la escasez de forraje, puede ser una alternativa para los valles altos del centro de México al ser menos demandante en agua y resistir mejor el déficit hídrico que el maíz (Rosas-Dávila et al., 2024). Además, su contenido de taninos puede tener efectos benéficos en la reducción de las emisiones de CH₄ contribuyendo a reducir la huella ambiental de estos sistemas.

3. Sorgo

El sorgo, del grupo de las poáceas, es un cereal de origen africano, posee un gran número de variedades, que debido a sus características se clasifican en tres grupos: sorgo grano, sorgo forrajero y sorgo dulce (ASERCA, 2018). En años recientes el sorgo ha sido estudiado como un alimento de gran valor por sus características bioquímicas y agrícolas que podrían ayudar a reemplazar otros cereales (Zarei, et al., 2023).

La situación actual de escasez no solo de agua, sino también de extensiones terrestres usadas para la industria agropecuaria, obliga a buscar sacar el mayor provecho en la producción de materias primas. En ese sentido el sorgo ha demostrado ser un producto muy versátil, dado que de un solo cultivo pueden obtenerse insumos de uso directo en la alimentación humana y animal, así como aprovechar partes de la planta para la producción de bioenergías pudiendo ser estas de primera o segunda generación; de manera adicional la planta puede someterse a procedimientos variados a fin de obtener fertilizantes; es decir que el sorgo es un cultivo altamente eficiente por todos los beneficios que pueden obtenerse de él en diversas industrias (Sorghum ID, 2024a).

Es una planta que posee adaptabilidad a distintos tipos de climas, desde áridos, semiáridos y cálidos. Además, tiene la capacidad de adecuarse a zonas con pocas precipitaciones, pues ha desarrollado un mecanismo de adaptación que le permite detener o ralentizar su crecimiento cuando detecta menor humedad en el suelo y retomar dicho desarrollo ante el aumento de la humedad. De forma particular, sus semillas germinan en temperaturas ambientales que van de los 12 a 13 °C (SAGARPA, 2017). El sorgo es considerado un insumo polifacético, pues puede someterse a distintos procedimientos a fin de obtener de esta planta ingredientes como aceite, harina, malta y otros elementos como alcohol, acetona, butanol y papel (SADER, 2016).

Las características del sorgo, como su resistencia a climas cálidos y la falta de agua, lo hacen un cultivo sostenible y rentable. Posee un sistema de raíces frondoso y de profundidad considerable que le permite absorber agua y nutrientes del suelo de forma más eficaz en comparación a otros cultivos. Además, cuenta con un sistema de absorción de CO₂ que mejora su rendimiento del proceso de fotosíntesis, incluso cuando el sustrato no cuenta con humedad suficiente (Sorghum ID, 2024b.).

Por su aporte de proteínas, energía y minerales, el sorgo es una valiosa fuente para la alimentación, tanto humana como animal, y actualmente frente al cambio climático sus características de rusticidad y resistencia respecto a insumos y la falta de agua le han ganado lugar en la búsqueda de la seguridad alimentaria que busca promover el cultivo de materias primas a bajo costo y que demuestran gran adaptabilidad (Zarei et al., 2023).

De forma mundial su cultivo se ha popularizado debido a los diversos usos que puede darse, tanto al producto inicial como a sus subproductos. De forma específica en la producción ganadera se utiliza el grano para alimentación de los animales, así como la harina que suele mezclarse con otros insumos para la elaboración de dietas

balanceadas. A nivel mundial es el quinto cereal más producido, siendo México el número 4 en la lista de productores del mundo. A nivel república los estados donde más se realiza la producción de este grano son Tamaulipas, Guanajuato, Sinaloa, Michoacán, Nayarit, Morelos, Jalisco, San Luis Potosí, Puebla y Campeche (SAGARPA, 2017).

El sorgo es considerado un cultivo agrónomicamente muy eficiente debido a su alta capacidad de producción y reducido consumo de agua, en comparación a otros cereales. Para la alimentación animal, puede aprovecharse en todas sus etapas fenológicas, siendo empleado como fuente de forraje fresco mediante pastoreo en épocas de lluvias, conservarse mediante ensilaje o henolaje para las épocas de secas o cosechar el grano y usarlo directamente o en mezclas concentradas. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ha desarrollado nuevas variedades de sorgo para aumentar el rendimiento y elevar el valor agregado del producto, así como variedades con mayor rendimiento por hectárea, o resistentes a plagas y enfermedades (SADER, 2022).

El uso de ensilado de sorgo como alternativa forrajera apropiada para enfrentar los déficits hídricos en la producción de forrajes para la época de escasez se considera una opción viable para los sistemas de producción de leche en pequeña escala (Rosas-Dávila et al., 2024). Su contenido de metabolitos secundarios en la forma de taninos y compuestos fenólicos puede representar una opción para reducir emisiones de metano. La concentración de metabolitos secundarios en las plantas está en función de su etapa fenológica de crecimiento.

3.1 Etapas fenológicas del sorgo

El sorgo, durante su desarrollo atraviesa distintas etapas, cada una con características particulares que muestran la metamorfosis de la planta y se describen a continuación, en base a lo descrito por Carrasco et al. (2011):

Etapa 0: también llamada etapa de emergencia es el momento en que brota a la superficie el coleóptilo, estructura germinal de las poáceas; ocurre entre 3 a 10 días posteriores a la siembra. La calidad y facilidad del coleóptilo para emerger determinará, más tarde, el rápido crecimiento de la planta; y está influenciado por factores como temperatura de 18-20°C, humedad del suelo, profundidad de siembra a 5 cm, y un buen vigor de la semilla. En esta etapa es posible tratar las semillas con fungicidas, insecticidas u otros similares para el control de malezas.

Etapa 1: estado de tres hojas; como su nombre lo dice, en esta etapa se observan 3 lígulas (apéndices membranosos) adheridas al tallo. Ocurre 10 días después de la etapa de emergencia, aproximadamente; y es el momento ideal para considerar el calendario de control de malezas. Si se diera una helada en esta etapa, que eliminará la parte ya emergida de la planta; aún así, esta puede recuperarse pues el punto de crecimiento no se ve afectado ya que se encuentra debajo de la superficie del suelo.

Etapa 2: etapa de las cinco hojas; en esta etapa crecen dos lígulas más, 3 semanas después de la emergencia. Esta etapa es fundamental ya que en ella se da el desarrollo del sistema de raíces (mismo que confiere al sorgo su gran capacidad de

resistencia a las sequías), por ello debe tenerse especial cuidado de proveer agua y nutrientes necesarios, además de evitar competencia por plagas u otros sembradíos.

Etapa 3: diferenciación del punto de crecimiento; el punto de crecimiento pasa de estado vegetativo a estado reproductivo, ocurre 30 días luego de la emergencia y se considera una tercera parte del ciclo. En esta etapa el crecimiento es muy acelerado por lo cual debe proveerse de las condiciones necesarias para no afectar el desarrollo.

Etapa 4: última hoja visible; en esta etapa las hojas superiores se expanden alcanzando el 80% área foliar y se pierden algunas de las últimas hojas inferiores, descubriendo así una parte del tallo.

Etapa 5: panoja embuchada; se conoce como panoja o panícula a un tipo de inflorescencia piramidal, con pequeñas ramificaciones que crecen de la base al ápice, y donde posteriormente se desarrollará y albergará el grano. En esta etapa la panícula se encuentra recubierta por hojas; si se somete a factores estresantes en este periodo la salida de la panoja se ve afectada y por ende la polinización.

Etapa 6: en ella la planta alcanza el 60% de su floración; en este momento toda la actividad metabólica de la planta está enfocada en el desarrollo de los granos, por lo cual la falta de agua, nutrientes, exceso de calor o presencia de sustancias químicas afectarán la calidad de el mismo.

Etapa 7: grano pastoso; llamado así porque se da el llenado de los granos y estos presentan una consistencia pastosa; las hojas inferiores continúan envejeciendo y desprendiéndose.

Etapa 8: grano duro; en esta etapa ya no hay absorción de nutrientes y el grano alcanza tres cuartas partes de su peso.

Etapa 9: la planta llega a su peso seco máximo y se observa un punto obscuro en los granos, mismos que aún tienen entre un 25 a 35 % de humedad, por lo cual debe esperarse hasta que esta se pierda para la cosecha.

4. Ensilado

Se conoce como ensilaje a un proceso de fermentación al cual pueden ser sometidos diversos tipos de forrajes que son cosechados en etapas verdes y mediante este procedimiento se pueden conservar para épocas de estiaje; teniendo pérdidas mínimas de los valores nutricionales y la palatabilidad del alimento. La fermentación es de tipo anaerobia y a través de ella los azúcares presentes en las plantas se degradan para producir ácido láctico, mismo que es el responsable de la conservación del forraje (Garcés Molina et al., 2004).

El proceso de ensilaje se compone de cuatro pasos principales: la fase aeróbica: al principio del proceso, la fase de fermentación que empieza al existir un ambiente anaerobio, propiciado por la compactación del ensilado, la fase estable donde los microorganismos presentes en el ensilado cumplen con sus reacciones bioquímicas generando diversos productos los cuales pueden ser benéficos o no según se haya

realizado adecuadamente todo el proceso, ya que el ensilaje podría contaminarse durante su elaboración; y la fase de deterioro anaerobio, la cual ocurre una vez realizada la apertura del silo (Garcés Molina et al., 2004).

A los ensilados pueden agregarse diversas sustancias como aditivos, para mejorar el proceso de la fermentación y la calidad del ensilado promoviendo el crecimiento de bacterias beneficiosas para la producción de ácido láctico y mejor conservación de nutrientes (Cubero et al., 2010)

4.1 Uso de aditivos en el ensilaje

Existen diversos tipos de aditivos para favorecer una buena fermentación láctica que asegure la calidad del ensilado, o productos para evitar el desarrollo de microorganismos indeseables que deterioran la calidad del ensilado final.

En el proceso de ensilaje, ante la presencia de microorganismos no deseados, ocurre una fase de degradación aeróbica iniciada por levaduras que digieren el lactato. Para reducir esta situación se ha optado por adicionar sustancias que tengan o produzcan componentes antifúngicos pues dichos componentes aminoran el número de colonias y en consecuencia se mejora la calidad aeróbica del ensilado (Da Silva et al, 2015). Diversos estudios consideran que la adición de componentes antifúngicos ayuda a mitigar la presencia y los efectos de microorganismos que merman la estabilidad aeróbica del ensilado (Taylor y Kung, 2002).

Por otro lado, agregar aditivos biológicos como levaduras o ciertas enzimas durante el ensilaje de forrajes, mejora la hidrólisis ocurrida durante la digestión anaeróbica en donde se rompen los enlaces de las complejas estructuras de los carbohidratos, favoreciendo así a la liberación de los azúcares que serán posteriormente utilizados por las bacterias para la producción de ácidos como el acético y posteriormente el láctico (Vervaeren et al., 2010). El uso de aditivos químicos como el benzoato de sodio, el sorbato de potasio y el nitrito de sodio, permiten mejorar la estabilidad aeróbica de los ensilados, pues si bien de manera separado ayudan a reducir las colonias fúngicas, en conjunto actúan en las rutas metabólicas del proceso de fermentación, reduciendo las concentraciones de etanol y la oxidación de este (Kung et al., 2018).

5. Metabolitos secundarios

Se conoce como metabolito a un grupo diverso de compuestos orgánicos que participan en múltiples reacciones químicas a nivel celular. Los metabolitos primarios, se producen de forma natural en las plantas para facilitar su crecimiento, desarrollo y reproducción, es decir, cuando la planta se encuentra en condiciones óptimas para llevar a cabo su ciclo fenológico (Lustre Sánchez, 2022). Cuando se presentan de estrés en las plantas, ya sea por la falta de agua, iluminación, presencia de plagas u otros similares, producen metabolitos secundarios como mecanismo de defensa que cumplen funciones de protección ante depredadores o enfermedades, representando así los mecanismos de adaptación de las plantas, que han desarrollado para asegurar el desarrollo de su especie (Lustre Sánchez, 2022).

Si bien, la producción de estos metabolitos se trata de un proceso natural de adecuación de la planta frente a los cambios en su entorno, los estudios científicos, especialmente de áreas como la bioquímica o la biología molecular, han permitido conocer y emplear las bondades de estos compuestos en beneficio de industrias farmacéuticas, cosmetológicas, nutraceútica y agrícola (Lustre Sánchez, 2022).

5.1 Taninos

Los taninos son compuestos polifenólicos, presentes en diversas plantas forrajeras, como las leguminosas de regiones templadas y tropicales. Sus características químicas y sensoriales les confieren propiedades de conservación de nitrógeno, así como protección contra herbívoros y plagas. Los taninos se caracterizan principalmente por formar, en conjunto con las proteínas, complejos reversibles. Los taninos se agrupan en hidrolizables y condensados. La concentración de taninos en las plantas forrajeras determina los efectos de estas en los animales que las consumen, pudiendo ser estos antiinflamatorios, anti nutricionales e incluso tóxicos; y como los taninos poseen propiedades astringentes, reaccionan con la saliva pudiendo disminuir la palatabilidad, el consumo, la digestión y por ende el crecimiento (Lara y Londoño, 2008). Igualmente, se presentan efectos positivos del consumo de taninos por rumiantes, entre los que se encuentra la reducción en la presentación de timpanismo, así como reducción del efecto de las parasitosis gastrointestinales (Lara y Londoño, 2008). Al respecto, el contacto directo de los taninos condensados con nemátodos gastrointestinales tiene en estos últimos un efecto tóxico lo que les confiere una característica desparasitante (González-Gómez, 2006).

Además, los taninos influyen sobre el microbiota ruminal alterando los patrones de fermentación ruminal reduciendo la emisión de metano (Goel y Makkar, 2012) por lo que el consumo por el ganado de plantas ricas en taninos puede reducir la huella ambiental de la ganadería.

5.2 Uso de aditivos en ensilados en relación con el contenido de taninos y sus efectos.

El ensilaje es un método de conservación de forrajes frescos a través de la fermentación anaerobia de los carbohidratos que a través de la acidificación permite mantener las características organolépticas y nutritivas de los forrajes en condiciones óptimas luego de periodos largos de almacenamiento (Martínez-Fernández et al., 2014).

Con el objetivo de asegurar una buena fermentación, se ha promovido el uso de aditivos que o bien favorezcan la fermentación adecuada, o bien coadyuven a mantener la estabilidad aeróbica de los ensilados una vez abiertos los silos.

En ese sentido, si bien el uso de taninos como aditivos en ensilados no es común, hay estudios que reportan que la presencia de taninos en ensilados de plantas enteras ayuda a prevenir el deterioro de la materia ensilada dado que se disminuye la producción y contenido de productos como etanol, amoniaco, ácido butírico e incluso micotoxinas. Lo anterior se atribuye a las características antibacterianas de los taninos. Sin embargo, las concentraciones elevadas de taninos en los forrajes

también pueden afectar negativamente a las bacterias ácido lácticas lo que disminuye el pH y permite el crecimiento de levaduras (Bueno, 2020).

En un estudio de Oliveira et al. (2009) se evaluó el uso de polietilenglicol (PEG) adicionado en ensilados de sorgo como secuestrante de los taninos, para determinar si su presencia afectaba a los taninos y si esto afectaba a la composición química del ensilado y sus características fermentativas; encontrando que los ensilados de sorgo a los que no se adicionó PEG tuvieron niveles más altos de proteína cruda (puesto que los taninos protegen a las proteínas de su degradación durante el proceso).

Por otro lado, al estudiar las diferentes concentraciones de taninos en el ensilado de sorgo de distintos tipos en relación con la estabilidad aeróbica de los ensilajes luego de ser abiertos, no se encontró relación positiva, es decir no tuvieron diferencias en la estabilidad aeróbica del ensilado. Lo anterior fue asociado a las bajas concentraciones de los taninos en el ensilado de sorgo evaluados (Oliveira et al., 2009).

He et al. (2020) reportaron un estudio sobre el contenido de taninos en *Neolamarckia cadamba*, un árbol propio de regiones tropicales y subtropicales con gran capacidad de crecimiento y rendimiento, en relación con la calidad fermentativa y niveles de conservación de proteína. Se ensiló la planta sola y con la adición de PEG. Se encontró que los ensilados adicionados con PEG, mismo que inactivó a los taninos, presentaron mayores contenidos de ácido láctico y nitrógeno no proteico, pero en contraparte disminuyó el contenido de nitrógeno amoniacal. En el aspecto microbiológico, la presencia de taninos en la planta ensilada, *Neolamarckia cadamba*, mejoró la calidad del ensilado al proteger a las proteínas de su degradación y modificar las poblaciones bacterianas donde las cianobacterias dominantes fueron desplazadas por firmicutes y lactobacillus.

De esta manera se observa como la presencia de taninos en forrajes ensilados tiene efectos benéficos al proteger la proteína de la degradación microbiana, pudiendo llegar a modificar las poblaciones microbianas, inhibiendo microorganismos no deseados permitiendo la proliferación de bacterias que favorecen una buena fermentación.

II. JUSTIFICACIÓN

La evaluación de la sostenibilidad ha establecido la necesidad de evaluar forrajes resistentes a la sequía y déficits hídricos para estrategias de alimentación de sistemas de producción de leche en pequeña escala, que sean conservados como ensilados para la época seca de escasez (Prospero-Bernal et al., 2017).

El sorgo es un cultivo resistente al déficit hídrico que puede ser una opción viable como alternativa forrajera para los sistemas de producción de leche en pequeña escala (Rosas-Dávila et al., 2024).

El forraje ensilado de sorgo contiene taninos cuya presencia puede reducir la emisión de metano y por lo tanto, disminuir la huella ambiental de estos sistemas. Por lo tanto, se hace necesario investigar el efecto de la etapa fenológica, dada por la fecha de cosecha, en la concentración de taninos.

El objetivo de este trabajo fue determinar el contenido de fenoles totales, fenoles no tánicos, taninos totales y taninos condensados en función de la etapa fenológica del ensilado de sorgo, en función de que este cultivo puede ser una alternativa para enfrentar los efectos del cambio climático; debido a su capacidad de adaptarse a distintos climas y su resistencia al estrés hídrico. El aspecto de interés se centró en el contenido de taninos en el ensilado de sorgo, por la evidencia previa de que este tipo de metabolitos tiene efectos en los patrones de fermentación ruminal.

Así mismo se esperó obtener información relevante sobre estrategias de alimentación del ganado para sistemas de producción de leche en pequeña escala en los valles altos del centro de México a partir de un forraje alternativo como el ensilado de sorgo, que además de poder ser opción por su amplia adaptabilidad y resistencia al estrés hídrico, contiene taninos que pueden mitigar la emisión de metano contribuyendo a reducir la huella ambiental de estos sistemas.

III. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿El contenido de fenoles totales, fenoles no tánicos, taninos totales y taninos condensados es afectado por la etapa fenológica en cuanto a la fecha de cosecha y el uso de aditivos en el ensilado de sorgo?

IV. HIPÓTESIS

Se plantea la siguiente hipótesis nula para la investigación:

No existe efecto por el uso de aditivos y la etapa fenológica en función de la fecha de cosecha en el contenido de fenoles totales, fenoles no tánicos, taninos totales y taninos condensados en el ensilado de sorgo.

V. OBJETIVOS

Objetivo General

- Determinar el contenido de metabolitos secundarios, taninos, en ensilados de sorgo a distintas fechas de cosecha con el uso de aditivos.

Objetivo Específico

- Determinar el contenido de fenoles totales, fenoles no tánicos, taninos totales y taninos condensados en ensilado de sorgo en tres fechas de cosecha con la adición de inóculo bacteriano o urea.

VI. MATERIAL

Material Biológico

Muestras de ensilados de sorgo forrajero variedad “Caña Dulce” ensiladas con la técnica de micro silos descrita por Sainz-Ramírez (2020), de tres fechas de cosecha (120, 135 y 150 días post siembra del sorgo) que correspondieron a la etapa fenológica 9 que es el momento en que la planta de sorgo llega a su peso máximo con un 25 a 35% de humedad.

Este estudio se insertó en el proyecto de investigación “Innovación en productos agroalimentarios: Evaluación química, microbiológica y sensorial del queso molido de Aculco elaborado con vacas alimentadas con ensilado de sorgo” (Clave UAEM 6788/2023 CID), y corresponde a la segunda parte de un experimento evaluando el ensilado de sorgo forrajero, variedad “Caña Dulce”.

La primera parte correspondió al trabajo “Evaluación del efecto de la fecha de cosecha y el uso de aditivos en la composición química del ensilado de sorgo”, reportado por Morales-Cruz (2024). Las muestras de ensilado de sorgo de ese trabajo fueron analizadas para determinar el contenido de metabolitos secundarios, objeto de estudio de la presente tesis.

Reactivos y soluciones

- Acetona 70%.
- Folin-Ciocalteu .
- Carbonato de sodio 20%.
- Ácido tánico (0.1mg/ml).
- Polivinilpolipirrolidona (PVPP).
- Butanol-HCl.
- Reactivo férrico.

Equipo y materiales de laboratorio

- Molino Vórtex.
- Centrifuga médica.
- Baño María.
- Máquina de hielo.
- Baño ultrasónico.
- Espectrofotómetro.
- Micropipetas 100-1000 μ l (2), 10-100 μ l (1), 1-5 mL.
- Cubetas de cuarzo o plástico.
- Plumón indeleble.
- Espátula y pinzas.

VII. MÉTODO

Como se estableció anteriormente, este trabajo fue parte del proyecto de investigación Clave UAEM 6788/2023-CID intitulado “Evaluación química, microbiológica y sensorial del Queso Molido de Aculco elaborado con leche de vacas alimentadas con ensilado de sorgo” llevado a cabo en el Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR) de la Universidad Autónoma del Estado de México; cuya primera parte en cuanto al valor nutricional *in vitro* fue reportado por Morales-Cruz (2024).

Este trabajo tuvo como objetivo determinar el contenido de metabolitos secundarios, particularmente de fenoles totales, fenoles no tánicos, taninos totales y taninos condensados, en los ensilados de sorgo a distintas fechas de cosecha con el uso de aditivos de la primera parte del proyecto.

Se utilizaron muestras provenientes de los micro-silos de la evaluación nutricional *in vitro* de ensilados de sorgo variedad “Caña Dulce” de 1.0 ha de cultivo en Aculco, Estado de México y cosechados de forma manual a los 120 días, a los 135 días y a los 150 días después de la siembra; cortados a 15 cm del suelo (Morales-Cruz, 2024).

Las muestras de ensilado que se utilizaron fueron las del forraje cosechado en la primera parte del proyecto a partir de micro-silos de laboratorio en tubos de PVC con funda de plástico negro calibre 600 de 2.5 lt de capacidad; de acuerdo con la metodología descrita por Sainz-Ramírez et al. (2020). Las muestras se tomaron de cinco micro-silos por fecha de cosecha.

Las muestras evaluadas para determinar el contenido de metabolitos secundarios derivaron del experimento en el que se adicionaron dos aditivos además del tratamiento control sin aditivo.

Como se especificó en el trabajo de Morales Cruz (2024); se cosechó con una ensiladora para maíz 1.0 ha de un cultivo de sorgo variedad Caña Dulce, picado a un tamaño de partícula de 2.0 a 3.0 cm. Del material cosechado para ese experimento, se realizaron tres alícuotas de aproximadamente 15 kg (peso fresco) cada una. De manera manual se aplicaron los aditivos para conformar los siguientes tratamientos (Morales Cruz, 2024):

1. Tratamiento control (CON): sin aditivo o testigo.
2. Tratamiento inóculo (INOC): Con dosis recomendada por el fabricante del inóculo bacteriano, correspondiente a 1×10^5 ufc/g de forraje en fresco. El inculante utilizado fue marca Biosile de CHR Hansen, elaborado a base de bacterias lácticas homofermentativas (*Pediococcus pentosaceus* y *Lactobacillus plantarum*).
3. Tratamiento urea (URE): adicionado con una solución de urea a una dosis correspondiente al 0.5% del peso total del forraje.

Análisis Químico

Las muestras se tomaron de tres sitios diferentes de la columna de ensilado de cada micro-silo, secados en una estufa de aire forzado a 55°C y molidas en un molino Pulvex para la determinación de su composición química (Morales-Cruz, 2024).

Las muestras utilizadas fueron sometidas a un segundo proceso de molienda con un molino de bolas para la determinación de taninos.

La obtención de la concentración de metabolitos secundarios se realizó siguiendo los procedimientos establecidos por Makkar et al. (2007); donde los compuestos fenólicos totales (FT), fenoles no tánicos y taninos totales (TT) fueron cuantificados mediante el método de Folin-Ciocalteu, y los taninos condensados (TC) se determinaron por la técnica de butanol HCL.

Determinación de Fenoles Totales

A continuación, se enlistan los pasos del procedimiento (Makkar et al., 2007):

- Pesar en tubos 200 mg de muestra.
- Adicionar 10 ml de acetona al 70 %.
- Colocar las muestras a baño ultrasónico durante 20 minutos, a intervalos de 10 min con descanso de 5 min.
- Centrifugar los tubos a 3000 rpm durante 10 min a 4° C.
- Colectar el sobrenadante en tubos de ensayo y mantenerlo en hielo.
- Preparar la curva de calibración.
- En tubos de ensayo vacíos adicionar en el orden siguiente:
 1. 50 µl de la muestra (diluida o sin diluir).
 2. 450 µl de agua destilada.
 3. 3250 µl de Folin-Ciocalteu.
 4. 1.25 ml de Carbonato de sodio.
- Agitar los tubos en vórtex.
- Colocar los tubos en baño maría a 37°C durante 40 min en condiciones oscuras
- Leer absorbancia a 725 nm contra el blanco.

Determinación de Taninos Totales

A continuación, se enlistan los pasos del procedimiento (Makkar et al., 2007):

- Pesar en tubos naranjas 200 mg de muestra (esta debe de estar molida a una porosidad de 0.5 mm).
- Adicionar 10 ml de acetona al 70%.
- Colocar las muestras a baño ultrasónico durante 20 minutos, a intervalos de 10 y con descanso de 5 minutos.
- Centrifugar los tubos a 3000 rpm durante 10 min.
- Colectar el sobrenadante en tubos de ensayo.
- Colectar 1 ml del sobrenadante y colocarlo en un tubo de ensayo el cual contendrá 100 mg de PVPP y 1 ml de agua.
- Agitar en vórtex y colocar en hielo (4°C) durante 15 min.

- Agitar nuevamente en vórtex.
- Centrifugar a 3000 rpm durante 10 min y coleccionar el sobrenadante.
- En un tubo de ensayo vacío adicionar en el orden siguiente:
 1. 50 µl del sobrenadante.
 2. 450 µl de agua destilada.
 3. 250 µl de Folin-Ciocalteu.
 4. 1.25 ml de carbonato de sodio.
- Agitar los tubos en vórtex.
- Preparar la curva de calibración como se describió en la técnica de fenoles totales.
- Colocar los tubos en baño maría a 37°C durante 40 min.
- Leer absorbancia a 725 nm, contra el blanco que contendrá solamente reactivos sin muestra de sobrenadante.

Determinación de Taninos Condensados

A continuación, se enlistan los pasos del procedimiento (Makkar et al., 2007):

- Pesar 200 mg de muestra en un tubo naranja.
- Agregar 10 mL de acetona al 70%.
- Colocar en baño ultrasónico por 20 minutos a intervalos de 10 min con 5 min de descanso.
- Centrifugar la muestra a 3000 rpm por 10 min a 4°C.
- Colocar los bloques de calentamiento digiblock en la parrilla y ajustar la temperatura de 135-140°C.
- En tubos de ensayo de vidrio Hach o Pyrex colocar 500 µl del sobrenadante de la muestra. Se colocará un tubo en blanco, que solo llevará 500 µl de acetona.
- Añadir 3 ml del butanol-HCl y 100 µl del reactivo férrico.
- Agitar los tubos.
- Tapar la boca de cada tubo con una canica de vidrio y colocar los tubos en los bloques de calentamiento digiblock monitoreando la temperatura a 97-100°C durante 45 min. El tubo que contiene el blanco no se calienta.
- Enfriar los tubos
- Ajustar la absorbancia del espectrofotómetro a 550 nm.
- Medir la absorbancia del blanco, registrar el valor y después presionar el botón "medir blanco" en el espectrofotómetro. Continuar con la lectura de las muestras.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con un diseño factorial 3 x 3, con tres niveles del factor tratamientos (aditivos), correspondientes al tratamiento control (CO), tratamiento con inóculo bacteriano (INOC) y tratamiento con urea (URE) y tres niveles del factor fecha de corte a los 120, 135 y 150 días después de la siembra; resultando en 9 tratamientos y 5 repeticiones por tratamiento,). Los datos se procesaron con el programa estadístico Minitab versión 14 de acuerdo con el modelo (Kaps y Lamberson, 2004):

$$Y_{ij} = \mu + A_i + FC_j + (A*FC)_{ij} + e_{ijk}$$

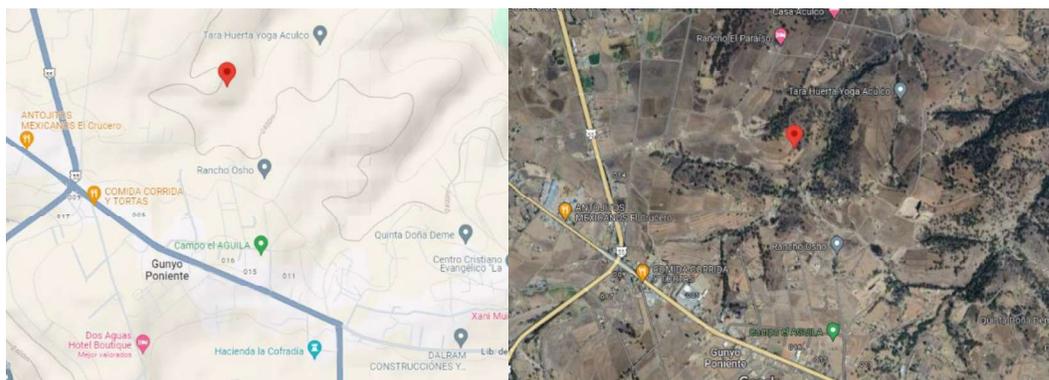
Donde μ es la media general, A_i es el efecto debido a Aditivos ($i= 1, 2, 3$), FC es el efecto debido a Fecha de Corte ($j= 1, 2, 3$), $A*FC$ es el efecto debido a la interacción, y $e_{k(ij)}$ es el error experimental. Se aplicó la prueba de Tukey cuando se detectaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$).

VIII. LÍMITE DE ESPACIO

Se obtuvo material vegetal de sorgo de una la unidad de producción de leche en pequeña escala de un productor cooperante con los experimentos a los que este trabajo pertenece, ubicada en la comunidad de Gunyó, en el municipio de Aculco, Estado de México.

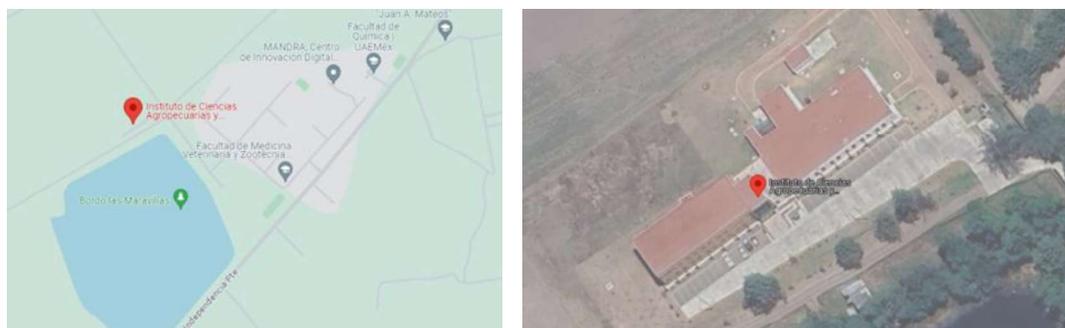
La comunidad cuenta con clima templado subhúmedo, precipitaciones en verano, y una altitud de 2366 msnm (20°07'44.4"N 99°51'07.2"W). El cultivo se colectó durante la época de lluvias.

Imagen 1. Representaciones donde se señala la ubicación donde se cultivó el sorgo (plano urbano y su vista satelital).



Por su parte, la elaboración de los micro-silos (pesaje, adición de tratamientos, compactación y almacenamiento), así como la realización de la determinación del contenido de metabolitos secundarios, se realizó en los laboratorios del Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR), de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), ubicado en Campus UAEM El Cerrillo, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, C.P. 50090.

Imagen 2. Representaciones donde se señala la ubicación del ICAR (plano urbano y su vista satelital).



IX. LÍMITE DE TIEMPO

El trabajo se llevó a cabo del 01 de marzo al 31 de agosto del 2024.

El cronograma de actividades se presenta en el Cuadro1

Cuadro 1. Cronograma de actividades llevadas a cabo durante el trabajo de laboratorio y de gabinete para la integración de la tesis.

CRONOGRAMA	
Actividad	Fecha
Análisis de laboratorio de muestras de micro-silos de sorgo variedad "Caña Dulce" para determinación de metabolitos secundarios.	Del 01 de marzo al 17 de mayo de 2024
Análisis e interpretación de resultados de laboratorio.	Del 20 al 31 de mayo de 2024
Redacción de tesis.	Del 01 al 30 de junio de 2024
Presentación de tesis ante la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UAEMéx para su revisión y sustentación en la Evaluación Profesional correspondiente.	A partir del 1 de septiembre de 2024

X. RESULTADOS

Todos los factores, tanto los tratamientos como las fechas de cosecha influyeron de manera significativa en el contenido de los metabolitos secundarios, y sobre todo, las interacciones entre la inclusión de aditivos y las fechas de corte fueron altamente significativas ($P < 0.001$) para las variables de contenido de fenoles totales, fenoles no tánicos, taninos totales y taninos condensados.

La interacción significativa indica que el contenido de cada variable en cada tratamiento fue influido por la fecha de corte, por lo que no es válido interpretar los resultados a partir de los factores principales tratamientos y fechas de corte.

A fin de ilustrar adecuadamente los efectos debido a la interacción entre la inclusión de aditivos y la fecha de corte, solo se presenta el nivel de probabilidad de la interacción ($P < 0.001$). Además de los cuadros correspondientes, se presentan figuras a fin de identificar las interacciones detectadas.

En el Cuadro 2 se presentan los resultados con respecto al contenido de fenoles totales; donde se observa que la interacción entre los tratamientos y la fecha de corte fue significativa; como puede observarse con claridad en la Figura 1.

Cuadro 2. Contenido de fenoles totales (g/kg MS) en los micro-silos de sorgo.

Fecha de cosecha	CON	INOC	URE	EEM _{Tx}	EEM _{FC}	EEM _{Tx*FC}	P
1(120 días)	12.848	12.167	12.189	1.850	1.310	1.220	0.001
2(135 días)	14.156	15.323	8.100				
3 (150 días)	15.656	12.023	14.545				
Media	14.220	13.171	11.611				

CON: micro-silo sin aditivo; INOC: micro-silo con inoculante de bacterias homofermentativas; URE: micro-silo con solución de urea; EEM: error estándar de la media. EEM_{Tx}= Error Estándar de Tratamientos, EEM_{FC}= Error Estándar de Fecha de Corte, EEM_{Tx*FC}= Error Estándar de la Interacción Tx*FC.

Se observa que en la primera fecha de cosecha, al día 120, los tres tratamientos presentan valores muy similares; el grupo control tuvo 12.848 g/kg de MS, siendo este el más alto, seguido del grupo urea con 12.189 g/kg de MS y finalmente el grupo inóculo con 12.167 g/kg de MS. Por otra parte, en la segunda fecha de cosecha, al día 135 el valor más alto lo presentó el grupo inóculo con 15.323 g/kg de MS, seguido del grupo control con 14.156 g/kg de MS; finalizando con el grupo urea, con gran diferencia pues este tuvo un valor de 8.1 g/kg de MS. En la tercera fecha de cosecha, al día 150, nuevamente el grupo control obtuvo el valor más alto con 15.656 g/kg de MS, seguido del grupo urea con 14.545 g/kg de MS y finalizando con el grupo inóculo con un valor de 12.023 g/kg de MS.

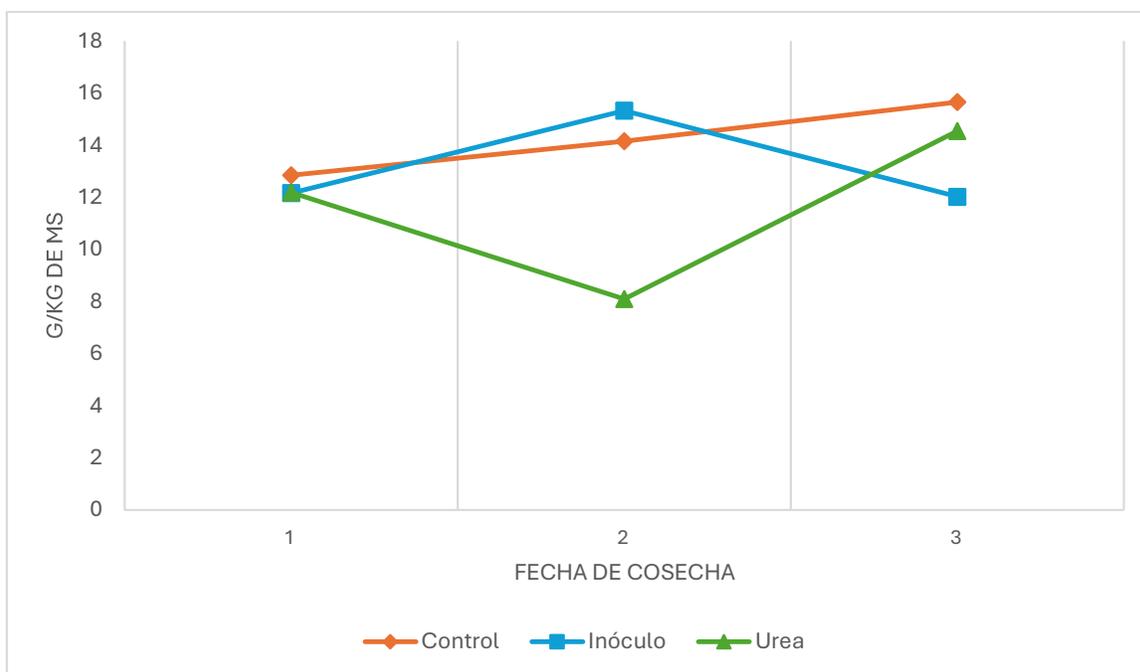


Figura1. Resultados de la interacción entre tratamientos control (CON) y el uso de aditivos inóculo bacteriano (INOC) y urea (URE) y de la fecha de cosecha a 120 (1), 135 (2) y 150 (3) días post siembra en relación con el contenido de fenoles totales (g/kg MS).

En cuanto a los fenoles no tánicos, los resultados se presentan en el Cuadro 3, donde nuevamente, el tratamiento CON mostró el contenido más alto de fenoles no tánicos (media de 5.181 g/kg de MS), seguido del tratamiento INOC (4.882 g/kg de MS) y por último URE (4.043 g/kg de MS).

Cuadro 3. Contenido de fenoles no tánicos (g/kg MS) en los micro-silos de sorgo.

Fecha de cosecha	CON	INOC	URE	EEM _{Tx}	EEM _{FC}	EEM _{Tx * FC}	P
1(120 días)	5.544	5.884	4.924	0.810	1.050	0.0.250	0.001
2(135 días)	4.913	5.240	3.837				
3 (150 días)	5.086	3.521	3.369				
Media	5.181	4.882	4.043				

CON: micro-silo sin aditivo; INOC: micro-silo con inoculante de bacterias homofermentativas; URE: micro-silo con solución de urea; EEM_{Tx}= Error Estándar de Tratamientos, EEM_{FC}= Error Estándar de Fecha de Cosecha, EEM_{Tx*FC}= Error Estándar de la Interacción Tx*FC

Nuevamente, el tratamiento control mostró el contenido más alto de fenoles no tánicos en promedio (5.181 g/kg de MS), seguido del tratamiento adicionado con inóculo (4.882 g/kg de MS) y por último el de urea (4.043 g/kg de MS).

En la en la Figura 2, se observa que en la primera fecha de cosecha (día 120), el valor más alto fue del tratamiento INOC con una media de 5.844 g/kg MS, seguido con una diferencia mínima por el tratamiento CON (5.544 g/kg MS) y finalizando con URE con un valor de 4.924 g/kg MS. En la segunda fecha de cosecha, al día 135, INOC nuevamente presentó el valor más alto con 5.24 g/kg MS, seguido de igual forma por CON (4.913 g/kg MS) y finalizando con URE (3.837 g/kg de MS). Mientras que en la fecha de cosecha tres, al día 150, CON tuvo el valor más alto con 5.086 g/kg MS, seguido de INOC con 3.521 g/kg de MS y finalizando con URE, con un valor de 3.369 g/kg MS.

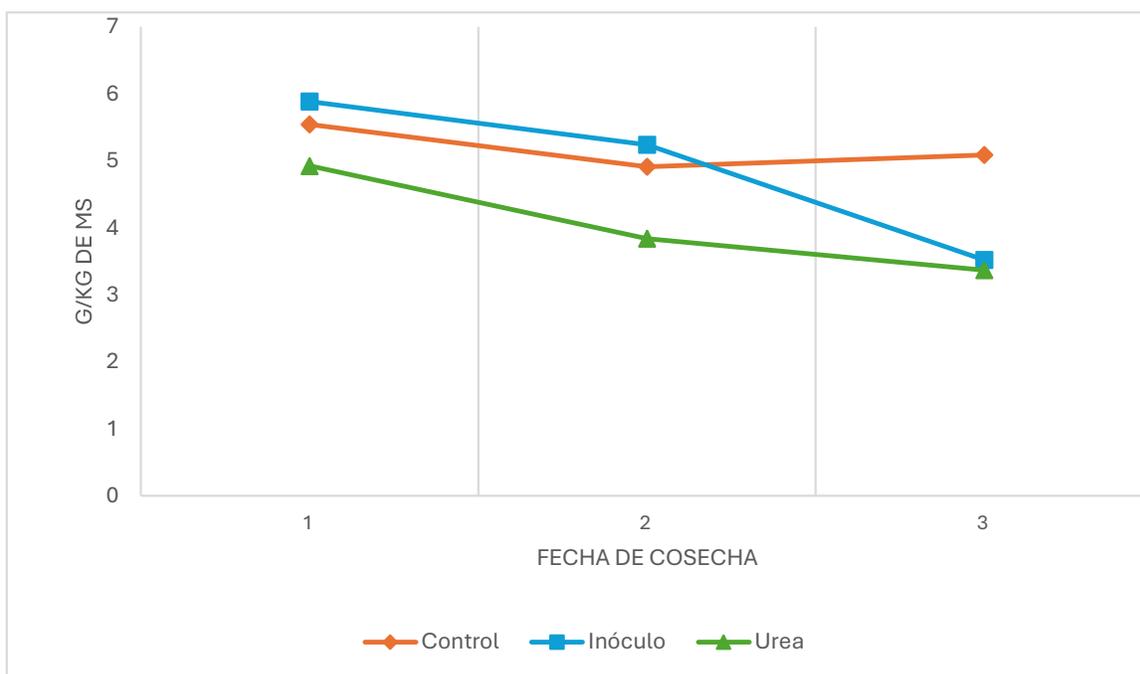


Figura 2. Interacción entre tratamientos control (CON) y el uso de aditivos inóculo bacteriano (INOC) y urea (URE) y de la fecha de cosecha a 120 (1), 135 (2) y 150 (3) días post siembra en relación con el contenido de fenoles no tánicos (g/kg MS).

Cuadro 4. Contenido de taninos totales (g/kg MS) en los micro-silos de sorgo.

Fecha de cosecha	CON	INOC	URE	EEM _{Tx}	EEM _{FC}	EEM _{Tx*FC}	P
1(120 días)	7.304	6.283	7.265	1.270	0.415	1.320	0.0.001
2(135 días)	9.243	10.083	4.263				
3 (150 días)	10.570	8.502	11.176				
Media	9.039	8.289	7.568				
CON: micro-silo sin aditivo; INOC: micro-silo con inoculante de bacterias homofermentativas; URE: micro-silo con solución de urea; EEM _{Tx} = Error Estándar de Tratamientos, EEM _{FC} = Error Estándar de Fecha de Cosecha, EEM _{Tx*FC} = Error Estándar de la Interacción Tx*FC							

El tratamiento CON presentó nuevamente la media más alta de taninos totales (9.039 g/kg de MS), seguido por el tratamiento INOC (8.289 g/kg de MS) y URE (7.568 g/kg de MS). Esto sugiere que los tratamientos sin aditivos o con inóculo mantienen una mayor cantidad de taninos totales, mientras que la adición de urea parece reducir su concentración. Se puede notar que, aunque el tratamiento con urea mostró la menor media general, en la tercera fecha de cosecha registró un aumento considerable.

En la Figura 3 se puede apreciar que, en la primera fecha de cosecha, al día 120, el grupo control presentó el valor mayor con 7.304 g/kg de MS, seguido con una mínima diferencia por el grupo urea con 7.265 g/kg de MS, finalizando con el grupo inóculo con un valor de 6.283 g/kg de MS. Por otra parte, en la segunda fecha de cosecha, al día 135, el valor más alto lo tuvo el grupo inóculo con 10.083 g/kg de MS, seguido por el grupo control con 9.243 g/kg de MS y finalmente el grupo urea con 4.263 g/kg de MS. Finalmente en la tercera fecha de cosecha al día 146, el valor más alto fue el del grupo urea con 11.176 g/kg de MS, seguido por el grupo control con 10.57 g/kg de MS y finalizando con el grupo inóculo, con un valor de 8.502 g/kg de MS.

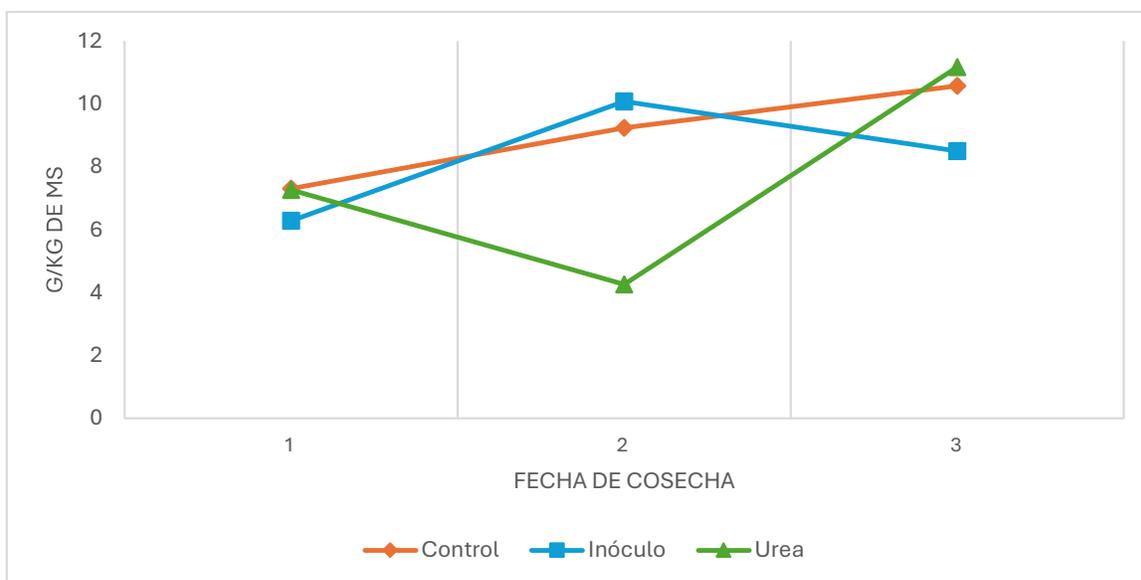


Figura 3. Resultados de la interacción entre tratamientos control (CON) y el uso de aditivos inóculo bacteriano (INOC) y urea (URE) y de la fecha de cosecha a 120 (1), 135 (2) y 150 (3) días post siembra en relación con el contenido de taninos totales (g/kg MS)

Para taninos condensados, el tratamiento INOC presentó la mayor media en general (0.177 g/kg de MS), ligeramente por encima del tratamiento CON (0.171 g/kg de MS) y con una diferencia más significativa respecto a las muestras del tratamiento URE (0.113 g/kg de MS). Este resultado sugiere que la aplicación de inóculo podría favorecer la formación o retención de taninos condensados, mientras que la adición de urea podría inhibirla.

Cuadro 5. Contenido de taninos condensados (g/kg MS) en los micro-silos de sorgo.

Fecha de cosecha	CON	INOC	URE	EEM _{Tx}	EEM _{FC}	EEM _{Tx * FC}	P
1(120 días)	0.145	0.177	0.109	0.050	0.038	0.014	0.0000
2(135 días)	0.169	0.147	0.081				
3 (150 días)	0.199	0.207	0.148				
Media	0.171	0.177	0.113				

CON: micro-silo sin aditivo; INOC: micro-silo con inoculante de bacterias homofermentativas; URE: micro-silo con solución de urea; EEM_{Tx}= Error Estándar de Tratamientos, EEM_{FC}= Error Estándar de Fecha de Cosecha, EEM_{Tx*FC}= Error Estándar de la Interacción Tx*FC

Lo anterior puede observarse de forma gráfica en la Figura 4.

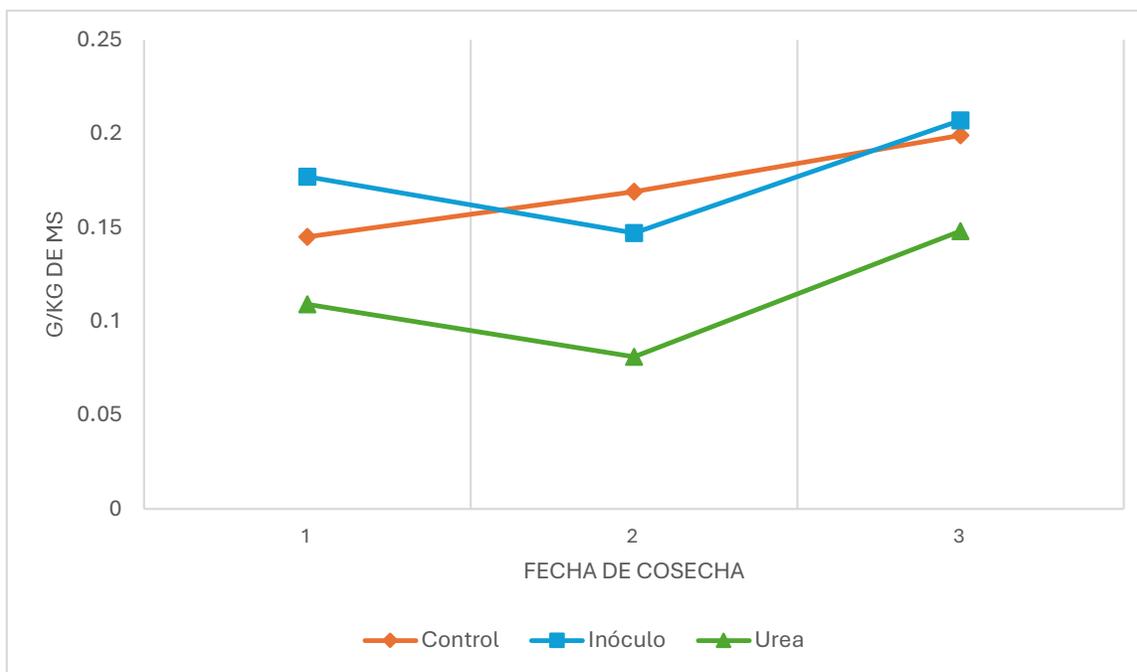


Figura 4. Resultados de la interacción entre tratamientos control (CON) y el uso de aditivos inóculo bacteriano (INOC) y urea (URE) y de la fecha de cosecha a 120 (1), 135 (2) y 150 (3) días post siembra en relación con el contenido de taninos condensados (g/kg MS).

La Figura 4 muestra que a la primera fecha de cosecha correspondiente al día 120, el valor más alto fue del grupo inóculo con 0.177 g/kg de MS, seguido por el grupo control con 0.145 g/kg de MS y finalizando con el grupo urea con 0.109 g/kg de MS. Por su parte a la segunda fecha de cosecha en el día 135, el grupo con el valor más alto fue el control con 0.169 g/kg de MS, seguido del grupo inóculo con 0.147 y finalizando con el grupo urea con 0.081 g/kg de MS. Finalmente en la tercera fecha de cosecha. Al día 150, los valores fueron encabezados por el grupo inóculo con 0.207 g/kg de MS, seguido del grupo control con 0.199 g/kg de MS y finalizando con el grupo urea con 0.148 g/kg de MS.

Fecha de cosecha del sorgo

Si bien las interacciones significativas ($P < 0.001$) entre los tratamientos control (CON), inóculo bacteriano (INOC) y adición de urea (URE) no justifican la interpretación de los resultados a partir de los factores principales, se presentan a continuación figuras con los valores obtenidos por efecto de las fechas de cosecha para ilustrar de mejor manera los efectos de la etapa fenológica del sorgo en relación con el contenido de metabolitos secundarios establecido como uno de los objetivos del presente trabajo.

En la Figura 5, Figura 6 y Figura 7 se presentan gráficamente los efectos de la fecha de cosecha en el contenido de taninos en el ensilado de sorgo correspondientes a

las cosechas a los 120 (Fecha 1), 135 (Fecha 2) y 150 (Fecha 3) días post siembra respectivamente.

De acuerdo con la figura 5, los valores más altos corresponden a los fenoles totales del grupo control con 12.848 g/kg MS, posteriormente los taninos totales del grupo urea presentaron un valor de 11.176 g/kg MS y los fenoles no tánicos del grupo inóculo sobresalieron con un valor de 5.884 g/kg MS, finalmente los taninos condensados del grupo inóculo con un valor de 0.177 g/kg de MS.

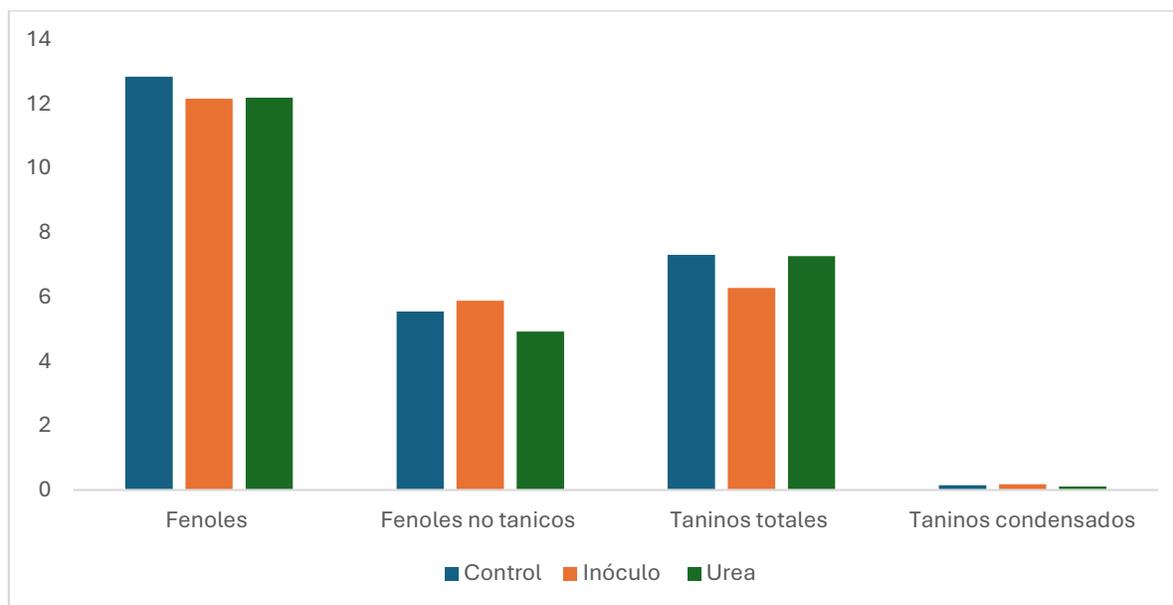


Figura 5. Contenido de metabolitos secundarios en ensilado de sorgo (g/kg MS) con diferentes tratamientos en fecha de cosecha 1.

En la figura 6 se puede apreciar que, los valores más sobresalientes corresponden al grupo de inóculo donde los fenoles totales presentaron un valor 15.323 g/kg MS, posteriormente los taninos totales con un valor de 10.083 g/kg MS y los fenoles no tánicos con un valor de 5.24, finalmente en los taninos condensados el grupo sobresaliente fue el control con un valor de 0.169 g/kg MS.

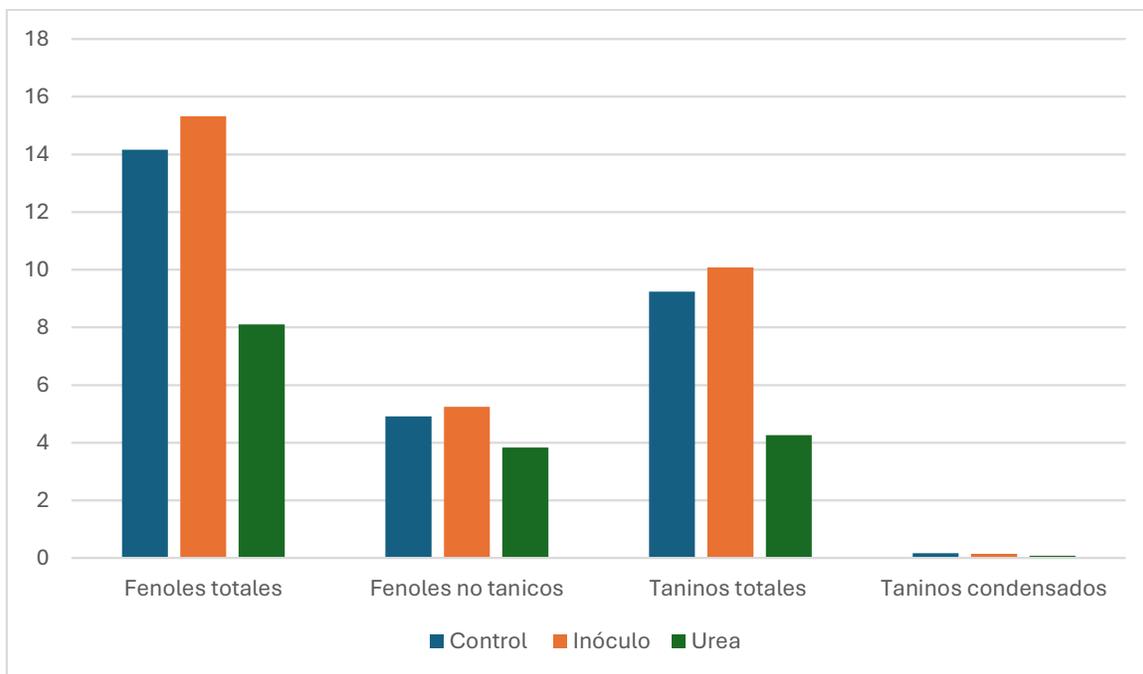


Figura 6. Contenido de metabolitos secundarios en ensilado de sorgo (g/kg MS) con diferentes tratamientos en fecha de cosecha 2.

De acuerdo con la Figura 7, en cuanto a los fenoles totales el valor más elevado fue del grupo control con 15.656 g/kg MS, seguido de los taninos totales del grupo urea con un valor de 11.176 g/kg MS, posteriormente los fenoles no tánicos del grupo control con un valor de 5.086 g/kg MS y finalizando con los taninos condensados del grupo inóculo con un valor de 0.207 g/kg MS.

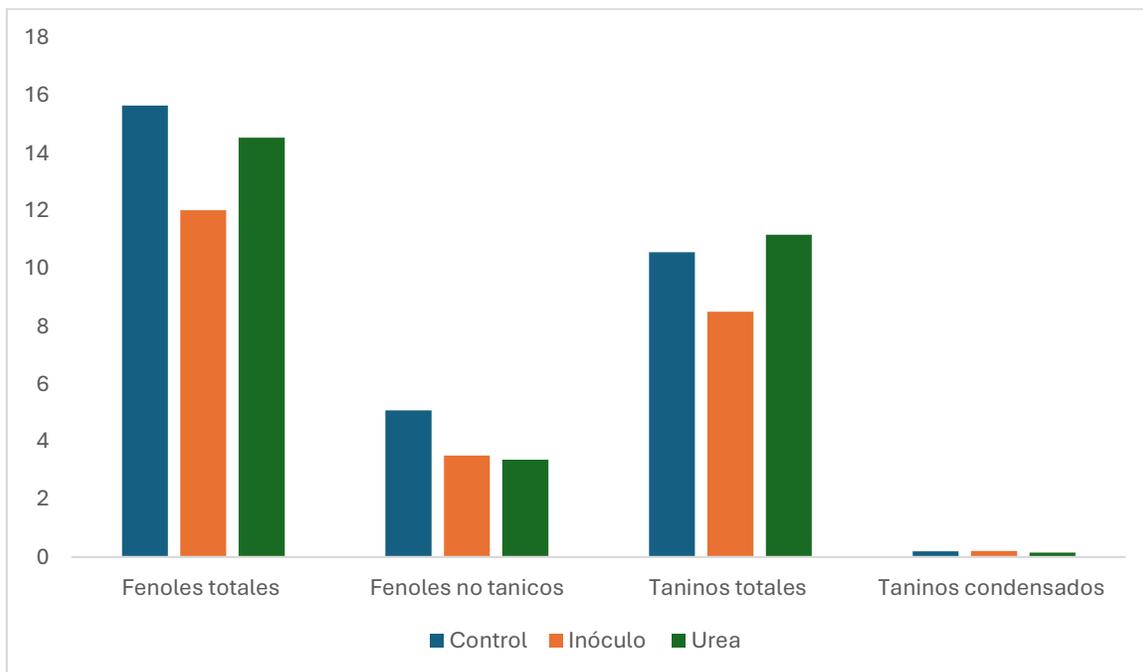


Figura 7. Contenido de metabolitos secundarios en ensilado de sorgo (g/kg MS) con diferentes tratamientos en fecha de cosecha 3.

De forma general podemos observar que en el caso de los fenoles totales, taninos totales y taninos condensados los valores más elevados se presentaron en la tercera fecha de cosecha en cada uno de los tratamientos; por su parte en cuanto a los fenoles no tánicos, únicamente el grupo control presentó un valor elevado en comparación con los otros tratamientos y las otras fechas de cosecha.

XI. DISCUSIÓN

En términos de contenido de fenoles, Eggleston et al. (2020) encontraron un alto contenido de fenoles en jarabes de sorgo comparado con otros jarabes comerciales. El presente estudio refuerza esta evidencia, al mostrar que los ensilados de sorgo en el grupo control presentaron las concentraciones más altas de fenoles y fenoles no tánicos, apoyando así la idea de que el sorgo es una fuente rica en estos compuestos bioactivos, como también se identificó y caracterizó en granos enteros de sorgo de variedades rojo, marrón y blanco (Kang et al, 2016).

Los resultados del presente estudio apuntan a que la adición de urea redujo la concentración de fenoles totales; como en el trabajo de Russell y Lolley (1989) quienes demostraron la desactivación de taninos en grano de sorgo alto en taninos a través de la adición de soluciones de urea al 2%, 3% y 4%.

además, se observa un incremento en el contenido de estos compuestos a medida que avanza el tiempo de cosecha, particularmente en el tratamiento control, lo que podría indicar un proceso de acumulación de fenoles en las etapas fenológicas más avanzadas (Lustre Sánchez, 2022).

En cuanto a los taninos totales analizados en este estudio, tienden a aumentar en las cosechas tardías. Esto podría estar relacionado con la maduración de la planta o con procesos enzimáticos que favorecen la formación de taninos en etapas posteriores del ensilado (Lustre Sánchez, 2022)

Un estudio realizado por Cernerio et al. (2007), el cual evaluó distintos aspectos del ensilado de sorgo de distintos fenotipos, entre ellos su contenido de taninos condensados, se define como bajo a un contenido de taninos condensado ≤ 10 g/kg MS, mientras que un contenido alto es aquel ≥ 40 g/kg MS. Esto en muestras de 10 cultivos de sorgo de dos líneas diferentes, donde se realizaron 8 repeticiones de silos en tubos de PVC de 3kg cada uno, ensilados durante 60 días. Se obtuvieron valores diversos en un rango de 10.62 g/kg MS hasta 37.39 g/kg MS. Los resultados del presente proyecto mostraron valores mucho menores, lo que sugiere que la variedad Caña Dulce evaluada, los tratamientos y las fechas de cosecha influenciaron significativamente los niveles de taninos.

En cuanto al uso de aditivos en el ensilaje de sorgo, en un estudio realizado por Olivera et al. (2009), donde se evaluaron las características fermentativas y estabilidad aeróbica de los ensilados de sorgo, se empleó como aditivo el polietilenglicol y se observó una mayor concentración de amoníaco a diferencia del grupo control; el estudio de Olvera mostró que aún cuando el contenido de taninos en el grano de sorgo es alto, si al momento de ensilaje su concentración es baja, entonces no es suficiente para evitar la oxidación del ensilado.

En el presente estudio, el contenido de taninos condensados muestra variaciones más sutiles, pero la fecha de cosecha también parece influir en los resultados, especialmente en el tratamiento urea, que tiene un contenido más bajo en todas las fechas. Los taninos condensados también muestran un ligero incremento en las fechas de cosecha más tardías, particularmente en los tratamientos control e inóculo. Esto podría deberse a la concentración de taninos a medida que avanza el

proceso maduración de la planta, o a cambios en la estructura química ocurridos durante el ensilaje que favorecen la formación de taninos condensados (Lustre Sánchez, 2022).

El estudio realizado por Radhakrishnan y Sivaprasad (1980) que evaluaba el contenido de taninos en cultivos de sorgo obtenidos de dos comunidades diferentes, se obtuvieron valores entre 10 y 2056 mg por cada 100 g de grano es decir entre 0.01 y 2.056 g/kg de materia seca siendo considerablemente inferiores a los encontrados en el presente estudio, donde el contenido de taninos totales tendió a aumentar en las cosechas tardías. Esto podría estar relacionado con la maduración de la planta o con procesos enzimáticos que favorecen la formación de taninos en etapas posteriores del ensilado (Lustre Sánchez, 2022).

Para evaluar el efecto de la fermentación sobre el contenido de taninos y la digestibilidad *in vitro* de las proteínas y el almidón en el sorgo, Hassan y Tinay (1995) realizaron un estudio empleando dos variedades, una con 0.65% de taninos, siendo este considerado como un valor intermedio; y la otra variedad con un valor alto de taninos, del 1.36%; además de mostrar que luego de fermentar los granos, los valores en el contenido de taninos disminuían, los resultados mostraron variaciones en los taninos totales y condensados, sugiriendo que la fermentación y otros factores como los tratamientos y la fecha de cosecha, para el caso de este proyecto, pueden modificar estos niveles.

En comparación con otros estudios, los hallazgos del presente estudio son consistentes en varios aspectos. Por ejemplo, Hong et al. (2020) reportaron a los taninos como compuestos predominantes en las semillas de sorgo, con un contenido de 11 mg/g. En nuestro estudio, se observó que el tratamiento con Inóculo aumentó significativamente los taninos condensados, lo que sugiere que la fermentación microbiana puede incrementar la presencia de estos compuestos, similar a lo observado por Svensson et al. (2010), quienes demostraron que la adición de *Lactobacillus* spp. en masa madre de sorgo incrementa los polifenoles.

En términos de contenido de fenoles, Eggleston et al. (2020) encontraron un alto contenido de fenoles en jarabes de sorgo comparado con otros jarabes comerciales. El presente estudio refuerza esta evidencia al mostrar que los ensilados de sorgo en el grupo control presentaron las concentraciones más altas de fenoles y fenoles no tánicos, apoyando así la idea de que el sorgo es una fuente rica en estos compuestos bioactivos, como también se identificó y caracterizó en granos enteros de sorgo de variedades rojo, marrón y blanco en los granos de sorgo (Kang et al, 2016).

Asimismo, Cardoso y colaboradores observaron que diferentes métodos de procesamiento del sorgo afectan el contenido de flavonoides, por su parte ese estudio complementa este hallazgo al mostrar que el tipo de tratamiento influye no solo en los flavonoides, sino también en los taninos condensados (Cardoso et al, 2015). Esto resalta la importancia del método de tratamiento para preservar y potenciar los compuestos fenólicos, alineándose con lo que sugieren Aboagye y Beauchemin (2019) respecto a la influencia de las características fisicoquímicas de los taninos en su efectividad anti metanogénica.

Por otro lado, estudios como el de Herremans y Stewart (2020), han evaluado el impacto de los taninos en el metabolismo del nitrógeno en rumiantes, encontrando que pueden reducir las emisiones de metano entérico y la excreción de nitrógeno; aunque el presente estudio no abordó directamente estos aspectos, los hallazgos obtenidos sobre el contenido de taninos en los ensilados de sorgo podrían apoyar para futuras investigaciones sobre los efectos del contenido de taninos en ensilados de sorgo en la nutrición animal y su impacto ambiental.

Es importante destacar que, aunque se ha demostrado que los taninos pueden tener un efecto positivo en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Hristov et al., 2022; Roca et al., 2020), también existen estudios que sugieren que este efecto puede no ser universal, como lo observado por Schilling et al (2023), quienes no encontraron diferencias significativas en las emisiones de metano al usar taninos en la dieta de novillas, las cuales fueron criadas bajo un sistema orgánico, ofreciéndoles una alimentación suplementada al 0.075%, 0.15% y 0.30% de un producto tanínico comercial.

Esta disparidad subraya la necesidad de continuar investigando las condiciones específicas bajo las cuales los taninos son más efectivos, un punto que también resalta Jayanegara et al. (2012) en su meta-análisis donde se evaluaron 30 experimentos distintos (*in vivo* e *in vitro*), donde, si bien la mayoría de los resultados mostraron una disminución en la digestibilidad de la materia orgánica particularmente de fibra, fue observable en igual medida la disminución en la producción de metano, asociando así de manera directa a los taninos como compuestos con efecto anti metanogénico. Lo anterior demostró que, en diferentes fuentes y condiciones generales, los taninos en la dieta reducen las emisiones de metano de los rumiantes, por lo cual las futuras investigaciones al respecto de esta problemática deberán enfocarse en la búsqueda de insumos usados para este fin considerando su contenido de taninos, palatabilidad y efecto en el rendimiento animal; siendo el último punto de vital importancia para lograr incluir a los productores en sistemas comprometidos con la sostenibilidad ganadera (Jayanegara, et al. 2012).

Los resultados de este estudio indican el efecto tanto de la fecha de Cosecha como de los aditivos utilizados en el contenido de taninos en ensilado de sorgo, que resultaron ser bajos en la variedad Caña Dulce evaluados.

Con estos resultados, se busca contribuir al conocimiento existente sobre el ensilado de sorgo y sus beneficios, en este caso analizando los efectos de los tratamientos y la fecha de cosecha en el contenido de compuestos fenólicos en ensilados de sorgo, apoyando investigaciones previas y abriendo nuevas líneas de investigación sobre el uso de estos compuestos en la alimentación animal, debido a su potencial impacto en la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.

XII. CONCLUSIONES

La etapa fenológica y el uso de aditivos durante el ensilaje de el sorgo tuvieron un efecto significativo en el contenido de metabolitos secundarios, fenoles totales, fenoles no tánicos, taninos totales y taninos condensados.

Este estudio demostró que tanto los tratamientos como las fechas de cosecha influyen significativamente en el contenido de metabolitos secundarios en el ensilado de sorgo. Los tratamientos de control, inóculo y urea presentaron diferentes perfiles de metabolitos, el grupo control generalmente mostrando los niveles más altos de fenoles totales, fenoles no tánicos y taninos totales, mientras que el inóculo destacó en taninos condensados.

Las fechas de cosecha también afectaron notablemente los niveles de estos metabolitos, mostrando mayor contenido de estos en la tercera fecha de cosecha. Además, los resultados sugieren que la aplicación de urea y otros aditivos puede modificar significativamente el contenido de taninos y otros metabolitos, lo que podría influir en la digestibilidad y la estabilidad del ensilado.

En comparación con estudios previos, los resultados de este estudio aportan datos más específicos y detallados, que pueden ser útiles para mejorar las prácticas de ensilaje y manejo del sorgo; especialmente considerándolo como una estrategia de alimentación en la búsqueda de reducir las emisiones de metano entérico y sin afectar la economía de los productores. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para futuras investigaciones sobre el contenido de metabolitos secundarios en el ensilado de sorgo.

XIII. SUGUERENCIAS

El uso de taninos en la alimentación animal, particularmente de rumiantes, representa una ventana de oportunidad para la disminución de las emisiones de metano entérico por parte de la industria ganadera; donde alimentos y forrajes naturalmente ricos en estos metabolitos representan un potencial tanto para lograr aumentos en la productividad de los sistemas, como a la vez disminuir su huella ambiental.

En ese sentido, se recomienda la realización de más estudios al respecto del contenido de metabolitos secundarios como son los taninos en los forrajes, especialmente aquellos que como el sorgo que pueden representar alternativas de alimentación que aporten a los pequeños productores a reducir los gastos de producción empleando forrajes de buena calidad y resistencia a las condiciones climáticas actuales.

XIV. LITERATURA CITADA

- Aboagye, I., & Beauchemin, K. (2019). Potential of Molecular Weight and Structure of Tannins to Reduce Methane Emissions from Ruminants: A Review. *Animals*, 9, 856. <https://doi.org/10.3390/ani9110856>
- ASERCA - Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios (2018). El sorgo, producto polifacético. gob.mx. Recuperado 9 de abril de 2024, de <https://www.gob.mx/aserca/articulos/el-sorgo-producto-polifacetico?idiom=es>
- Ávila-Foucat, V. S. (2017). Desafíos del sector primario y políticas públicas sustentables. *Economía informa*, 402, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.ecin.2017.01.003>
- Ballester, F., Díaz, J., y Manuel Moreno, J. (2006). Cambio climático y salud pública: escenarios después de la entrada en vigor del Protocolo de Kioto. *Gaceta sanitaria*, 20, 160-174. <https://doi.org/10.1157/13086040>
- Borrego, A., y Hernández, R. (2014). Desarrollo de comunidades rurales y degradación de recursos forestales en la región Occidente de México. *Economía informa*, 386, 16-30. [https://doi.org/10.1016/s0185-0849\(14\)70427-x](https://doi.org/10.1016/s0185-0849(14)70427-x)
- Bueno, A., Jobim, C., Daniel, J., & Gierus, M. (2020). Fermentation profile and hygienic quality of rehydrated corn grains treated with condensed tannins from quebracho plant extract. *Animal Feed Science and Technology*, 267, 114559. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114559....>
- Cabrera López, C., Urrutia Landa, I., y Jiménez-Ruiz, C. A. (2021). Año SEPAR por la calidad del aire. Papel de la SEPAR en favor del control del cambio climático. *Archivos de bronconeumología*, 57(5), 313-314. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2021.03.003>
- Cardoso, L., Pinheiro, S., Carvalho, C., Queiroz, V., Menezes, C., Moreira, A., Barros, F., Awika, J., Martino, H., & Pinheiro-Sant'Ana, H. (2015). Phenolic compounds profile in sorghum processed by extrusion cooking and dry heat in a conventional oven. *Journal of Cereal Science*, 65, 220-226. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.06.015>
- Carneiro, H., Sobrinho, F., Rodrigues, J., Miranda, J., & Brum, S. (2007). Evaluation Of Sorghum Silages Of Different Genotypes With And Without Condensed Tannins. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 5. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v5n2p257-265>.
- Carrasco, N., Zamora, M., y Melín, A. (2011). Manual de sorgo. 1ª ed.- Chacra Experimental Integrada. Barrow: Ediciones INTA. 105

- Castelán-Ortega, O. A., Carlos Ku-Vera, J., y Estrada-Flores, J. G. (2014). Modeling methane emissions and methane inventories for cattle production systems in Mexico. *Atmosfera*, 27 (2), 185-191. [https://doi.org/10.1016/s0187-6236\(14\)71109-9](https://doi.org/10.1016/s0187-6236(14)71109-9)
- Chalate-Molina, H., Gallardo-López, F., Pérez-Hernández, P., Paul Lang-Ovalle, F., Ortega- Jiménez, E., y Vilaboa Arroniz, J. (2010). Características del sistema de producción bovinos de doble propósito en el estado de Morelos, México. *Zootecnia tropical*, 28(3), 329-339. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692010000300004
- Corona, L. (2018). El metano y la ganadería bovina en México: ¿Parte de la solución y no del problema? *Agro Productividad*, 11(2). <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/117>
- Cubero, J. F., Rojas, A., & WingChing-Jones, R. (2010). Uso del inóculo microbiano elaborado en finca en ensilaje de maíz (*Zea mays*). Valor nutricional y fermentativo. *Agronomía Costarricense*, 34 (2) <https://doi.org/10.15517/rac.v34i2.3634>
- Da Silva, T. C., Smith, M. L., Barnard, A. M., & Kung, L., Jr. (2015). The effect of a chemical additive on the fermentation and aerobic stability of high-moisture corn. *Journal of Dairy Science*, 98(12), 8904-8912. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9640>
- Eggleston, G., Boue, S., Bett-Garber, K., Verret, C., Triplett, A., & Bechtel, P. (2020). Phenolic contents, antioxidant potential and associated colour in sweet sorghum syrups compared to other commercial syrup sweeteners. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 11 (2), 613-623. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10673>.
- Espinoza-Ortega, A., Espinosa-Ayala, E., Bastida-López, J., Castañeda-Martínez, T. and Arriaga-Jordán C. M. (2007). Small-scale dairy farming in the highlands of central Mexico: Technical, economic and social aspects and their impact on poverty. *Experimental Agriculture*, 43, 241 – 256.
- FAO – Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Producción animal. 2011. Producción Animal (Animal Production). Recuperado 15 de abril de 2024, de <https://www.fao.org/animal-production/es/>
- Ferrer, G. J., Pinto, L. S., Luna, E. P., Vera, J. C. K., Burgos, A. A., López, G. V., y Gamboa, A. A. (2015). Ganadería y cambio climático: Avances y retos de la mitigación y la adaptación en la frontera sur de México. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 30, 51-70. <https://sociedadesruralesojs.xoc.uam.mx/index.php/srpma/article/view/289>

- Garcés Molina, A. M., Berrio Roa, L., Ruíz Alzate, S., Serna DLeón, J. G., & Builes Arango, A. F. (2004). Ensilaje como fuente de alimentación para el ganado. *Revista lasallista de investigación*, 1(1), 66-71. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69511010>
- Goel, G. and Makkar, H. P. S. (2012). Methane mitigation from ruminants using tannins and saponins. *Tropical Animal Health and Production*, 44, 729-739. <https://doi.org/10.1007/s11250-011-9966-2>
- González-Gómez, J C, Ayala-Burgos, A.. y Gutiérrez-Vázquez, E. (2006). Determinación de fenoles totales y taninos condensados en especies arbóreas con potencial forrajero de la Región de Tierra Caliente Michoacán, México. *Livestock Research for Rural Development*, 18 (11): Article No. 152. <https://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd18/11/guti18152.htm>
- Herremans, S., Vanwindekens, F., Decruyenaere, V., Beckers, Y., & Froidmont, E. (2020). Effect of dietary tannins on milk yield and composition, nitrogen partitioning and nitrogen use efficiency of lactating dairy cows: A meta-analysis.. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 104 (5), 1209-1218. <https://doi.org/10.1111/jpn.13341>.
- Hassan, I., & Tinay, A. (1995). Effect of fermentation on tannin content and in-vitro protein and starch digestibilities of two sorghum cultivars. *Food Chemistry*, 53, 149-151. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)90780-B](https://doi.org/10.1016/0308-8146(95)90780-B).
- He, L., Lv, H., Xing, Y., Chen, X. y Zhang, Q. (2020). Intrinsic tannins affect ensiling characteristics and proteolysis of *Neolamarckia cadamba* leaf silage by largely altering bacterial community.. *Bioresource Technology*, 311,123496. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123496>
- Hristov, A., Melgar, A., Wasson, D., & Arndt, C. (2022). Symposium review: Effective nutritional strategies to mitigate enteric methane in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*.105 (10), 8543-8557 <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21398>.
- Hong, S., Pangloli, P., Perumal, R., Cox, S., Noronha, L., Dia, V., & Smolensky, D. (2020). A Comparative Study on Phenolic Content, Antioxidant Activity and Anti-Inflammatory Capacity of Aqueous and Ethanolic Extracts of Sorghum in Lipopolysaccharide-Induced RAW 264.7 Macrophages. *Antioxidants*, 9 (12), 1297. <https://doi.org/10.3390/antiox9121297>.
- INECC 2018 - del cambio climático. gob.mx. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/efectos-del-cambio-climatico>
- INECC - Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2018a). Qué es el cambio climático? gob.mx. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/que-es-el-cambio-climatico>

- IPCC. 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jayanegara, A., Leiber, F., & Kreuzer, M. (2012). Meta-analysis of the relationship between dietary tannin level and methane formation in ruminants from in vivo and in vitro experiments.. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, 96 (3), 365-375 . <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2011.01172.x>.
- Kaps, M. and Lamberson, W. (2004). *Biostatistics for Animal Science*. Cromwell Press, Trowbridge, UK.
- Kang, J., Price, W., Ashton, J., Tapsell, L., & Johnson, S. (2016). Identification and characterization of phenolic compounds in hydromethanolic extracts of sorghum wholegrains by LC-ESI-MS(n).. *Food chemistry*, 211, 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.052>.
- Kung, L., Jr, Smith, M. L., Benjamim da Silva, E., Windle, M. C., da Silva, T. C., & Polukis, S. A. (2018). An evaluation of the effectiveness of a chemical additive based on sodium benzoate, potassium sorbate, and sodium nitrite on the fermentation and aerobic stability of corn silage. *Journal of Dairy Science*, 101(7), 5949-5960. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14006>
- Lara, D. M., y Londoño, Á. S. (2008). El uso de taninos condensados como alternativa nutricional y sanitaria en rumiantes. *Revista de medicina veterinaria*, 1(16), 87-109. <https://ciencia.lasalle.edu.co/mv/vol1/iss16/7/>
- Lustre Sánchez, H. (2022). Los superpoderes de las plantas: los metabolitos secundarios en su adaptación y defensa. *Revista Digital Universitaria*, 23 (2). <https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2022.23.2.10>
- Makkar, H.P.S., Siddhuraju, P., and Becker, K. (2007). Tannins. Chapter 13. *Plant Secondary Metabolites. Methods in Molecular Biology* 393. Humana Press, Totowa, New Jersey, 67- 81.
- Makkar, H.P. (2016). Smart livestock feeding strategies for harvesting triple gain – the desired outcomes in planet, people and profit dimensions: a developing country perspective. *Animal Production Science*, 56, 519 - 534. <http://dx.doi.org/10.1071/AN15557>
- Martinez Damian, M. Á., Mora Flores, J.S. y Tellez Delgado, R. (2015). Precio de ganado en pie y precio de insumos en la producción de carne bovino. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6 (7), 1689-1694. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v6n7/v6n7a21.pdf>
- Martínez-Austria, P. F., y Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(1), 5-

20.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S200724222012000100001yscript=sci_arttext

Martínez-Fernández, A., Argamentería-Gutiérrez, A. y De la Roza-Delgado, B. (2014). Manejo de forrajes para ensilar. Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA), Asturias, España.

Martínez-González, J. C., Castillo-Rodríguez, S. P., Villalobos-Cortés, A., y Hernández-Meléndez, J. (2017). Sistemas De Producción Con Rumiantes En México. *Ciencia Agropecuaria*, 26, 132-152. <http://www.revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/78>

Morales-Cruz, A.A. (2024). Evaluación del efecto de la fecha de cosecha y el uso de aditivos en la composición química del ensilado de sorgo. Tesis de Licenciatura. Facultad de Medicina Veterinaria y Zotecnia, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.

Oliveira, S., Berchielli, T., Reis, R., Vechetini, M., y Pedreira, M. (2009). Fermentative characteristics and aerobic stability of sorghum silages containing different tannin levels. *Animal Feed Science and Technology*, 154, 1-8. <https://doi.org/10.1016/J.ANIFEEDSCI.2009.07.003>.

Prospero-Bernal Fernando, Carlos Galdino Martínez-García, Rafael Olea-Pérez, Felipe López-González and Carlos Manuel Arriaga-Jordán (2017). Intensive grazing and maize silage to enhance the sustainability of small-scale dairy systems in the highlands of Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, 49, (7), 1537-1544. <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1360-2>.

Radhakrishnan, M., & Sivaprasad, J. (1980). Tannin content of sorghum varieties and their role in iron bioavailability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 28 (1), 55-7 . <https://doi.org/10.1021/JF60227A038>.

Rello, F., y Saavedra, F. (2013). Diversificación productiva y transformación estructural en México: estudios de caso de tres regiones. *Investigacion economica*, 72(284), 111-129. [https://doi.org/10.1016/s0185-1667\(13\)72594-3](https://doi.org/10.1016/s0185-1667(13)72594-3)

Roca-Fernández, A., Dillard, S., & Soder, K. (2020). Ruminant fermentation and enteric methane production of legumes containing condensed tannins fed in continuous culture. *Journal of dairy science*. 103 (8), 7028-7038 <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17627>.

Rosas-Dávila, M., Morales-Almaráz, E., Lopez-Gonzalez, F. y Arriaga-Jordan, C.M. (2024). Uso del ensilado de sorgo variedad Top Green y variedad Caña Dulce para la producción de leche en sistemas de pequeña escala [Use of Top Green and Sweet Cane sorghum silage for milk production in small-scale

systems], Tropical and Subtropical Agroecosystems, 27, Art. No. 064. <http://doi.org/10.56369/tsaes.4917>

- Russel, RW. And Lolley, J.R. , 1989. Deactivation of Tannin in High Tannin Milo by Treatment with Urea. Journal of Dairy Science, 72 (9), 2527 – 24-30.
- SADER - Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022. Sorgo, más que un cereal. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/sorgo-mas-que-un-cereal?idiom=es> (19 de octubre de 2022).
- SADER - Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2016). Cinco derivados del sorgo que no conocías. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/cinco-derivados-del-sorgo-que-no-conocias>)
- SAGARPA – Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2017). Sorgo, grano mexicano. Planeación Agrícola Nacional 2017 – 20130. Recuperado 9 de abril de 2024, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256433/B_sico-Sorgo_Grano.pdf
- Sainz A, Botana A, Pereira S, González L, Veiga M, Resch C, Valladares J, Arriaga C, Flores G. 2020. Efecto de la fecha de cosecha y el uso de aditivos en la composición química y calidad fermentativa del ensilado de girasol. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 11(3), 620-637
- Sainz-Ramírez A., Botana A., Pereira-Crespo S., González-González L., Veiga M., Resch C., Valladares J., Arriaga-Jordán C.M. y Flores-Calvete G. (2020). Efecto de la fecha de cosecha y del uso de aditivos en la composición química y calidad fermentativa de ensilado de girasol. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 11 (3), 620-637. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i3.5092>
- Schilling-Hazlett, A., Raynor, E., Thompson, L., Velez, J., Place, S., & Stackhouse-Lawson, K. (2023). On-Farm Methane Mitigation and Animal Health Assessment of a Commercially Available Tannin Supplement in Organic Dairy Heifers. Animals, 14, 9. <https://doi.org/10.3390/ani14010009>.
- Sorghum ID. (2024a). En el sorgo todo se transforma. <https://www.sorghum-id.com/es/el-sorgo-todo-se-transforma/>
- Sorghum ID. (2024b). El sorgo, un cultivo que está de moda. Recuperado 9 de abril de 2024. https://www.sorghum-id.com/content/uploads/2021/09/ES_3.210x297-AlimAnimale.pdf
- Soriano-Robles, R. (2018). Cambio climático y ganadería: el papel de la agroforestería. Agro Productividad, 11 (2). <https://mail.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/122>

- Stewart, E., Beauchemin, K., Dai, X., MacAdam, J., Christensen, R., & Villalba, J. (2019). Effect of tannin-containing hays on enteric methane emissions and nitrogen partitioning in beef cattle. *Journal of animal science*. 97 (8), 3286-3299. <https://doi.org/10.1093/JAS/SKZ206>.
- Svatetz, C. A. G. (2023). Emergencia climática y alimentación. *FMC - Formación Médica Continuada en Atención Primaria*, 30(6), 306-311. <https://doi.org/10.1016/j.fmc.2023.02.006>
- Svensson, L., Sekwati-Monang, B., Lutz, D., Schieber, A., & Gänzle, M. (2010). Phenolic acids and flavonoids in nonfermented and fermented red sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58 (16), 9214-9220. <https://doi.org/10.1021/jf101504v>.
- Taylor, C. C., & Kung, L., Jr (2002). The effect of *Lactobacillus buchneri* 40788 on the fermentation and aerobic stability of high moisture corn in laboratory silos. *Journal of dairy science*, 85(6), 1526–1532. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74222-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74222-7)
- Thornton, P.K., van de Steeg, J., Notenbaert, A., Herrero, M. (2009). The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know, *Agricultural Systems*, 101, 113 – 127.
- Tirado Blázquez, M. C. (2010). Cambio climático y salud. Informe SESPAS 2010. *Gaceta sanitaria*, 24, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2010.10.004>
- UK Met Office (2011). *Climate: Observations, projections and impacts. Summary factsheet Mexico*. Devon, UK, Met Office. Pp. 149. Disponible en: <http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/c/6/Mexico.pdf>
- Vervaeren, H., Hostyn, K., Ghekiere, G., & Willems, B. (2010). Biological ensilage additives as pretreatment for maize to increase the biogas production. *Renewable Energy*, 35(9), 2089-2093. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.010>
- Zamora-Martínez, M. C. (2015). Vista de Cambio Climático. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/190/232>
- Zarei, M. Amirkolaei, A.K., Trushenski, J.T., Sealey, W.M., Schwarz, M.H. and Ovissipour, R. (2023). El sorgo es un ingrediente potencialmente valioso para los alimentos acuícolas. *Global Seafood Alliance*. <https://www.globalseafood.org/advocate/el-sorgo-es-un-ingrediente-potencialmente-valioso-para-los-alimentos-acuicolas/>.