

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL**  
**DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**



El maguey *Agave spp* como alimento forrajero

POR:

**ANALUZ DEL CARMEN NAVARRETE ESPINOZA**

MONOGRAFIA

**Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:**

**INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2023

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL**  
**DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

El maguey *Agave spp* como alimento forrajero

POR:

**ANALUZ DEL CARMEN NAVARRETE ESPINOZA**

**MONOGRAFIA**

Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA**

La cual fue revisada y aprobada por:



---

Dr. José Antonio Hernández Herrera  
**Director**



---

Ing. Ricardo Deyta Monjaras  
**Co-director**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Junio de 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL  
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

**El maguey *Agave spp* como alimento forrajero**

**MONOGRAFIA**

Presentada por

**ANALUZ DEL CARMEN NAVARRETE ESPINOZA**

Como requisito parcial para obtener el título profesional de

**INGENIERO AGRONOMO ZOOTECNISTA**

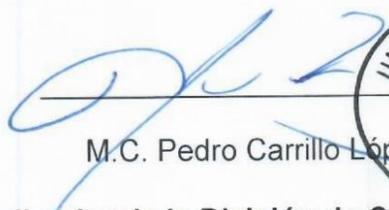
**Aprobada por:**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Antonio Hernández Herrera  
**Director**

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Ricardo Deyta Monjaras  
**Co-director**

  
\_\_\_\_\_  
M.C. Enrique Esquivel Gutiérrez  
**Asesor**

  
\_\_\_\_\_  
M.C. Sait Juanes Márquez  
**Asesor**

  
\_\_\_\_\_  
M.C. Pedro Carrillo López  
**Coordinador de la División de Ciencia Animal**



Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2023

## DEDICATORIAS

*A Dios, mis padres y a mis hermanos, quienes han sido la guía y el camino para poder llegar a este punto de mi carrera, que con su dedicación y palabras de aliento nunca bajaron los brazos para que yo tampoco lo hiciera aun cuando todo se complicaba.*

*Cuando comienzas tu entrenamiento trascendental, enfocando tus mejores esfuerzos, sin apego a los resultados, comprenderás el camino.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría empezar por mis progenitores **Sergio Navarrete y Leonor Espinoza** por todo su amor y el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida, admiro su fortaleza, y la gallardía para anteponerse a las adversidades. A mi hermano **Ángel** por contar siempre con el consejo adecuado en el momento propicio y a mi hermano **Ismael** que a pesar de la distancia estuvo presente. A mi madrina **Margarita** por su cariño, sus consejos y su fé en mi persona.

Mil gracias a **Sofía** y **Joel** por su cortesía desde mi llegada a Saltillo y el inicio de mi carrera universitaria.

Esto tampoco habría sido posible sin las amigas que la universidad me dio, **Tania, Fernanda, Berenice** y **Concepción**, gracias por compartir parte de su tiempo e invertirlo en esta historia.

No encuentro las palabras adecuadas para expresar mi agradecimiento al **Dr. José Antonio Hernández Herrera** es un honor cuya asesoría ilustre estas páginas, por su amistad y apoyo desde que lo conocí, y por poner su valioso tiempo a disposición.

Al **M.C. Sait Juanes** por su disposición para ser parte del comité de asesoría y evaluación de esta monografía, también gracias por tu amistad durante los últimos semestres de la carrera y por todo tu apoyo.

Al **Ing. Ricardo Deyta Monjaras**, por sus enseñanzas durante mi formación profesional, pero sobre todo por su amistad.

Al **M.C. Enrique Esquivel Gutiérrez** por su disposición y contribución para la culminación de este trabajo.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por darme la oportunidad de formarme como agrónomo, por las experiencias y conocimiento, y más importante aún por permitirme forjar valiosas amistades.

Por último, mi gratitud incondicional a todos los que contribuyeron de alguna u otra manera para alcanzar el objetivo de ser Ingeniero, los llevaré siempre en mi corazón.

## **Declaración de no plagio**

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



---

**Analuz del Carmen Navarrete Espinoza**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIAS .....	4
AGRADECIMIENTOS .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
ÍNDICE DE CUADROS .....	9
RESUMEN .....	10
I. INTRODUCCIÓN .....	11
1.1 Objetivo General .....	12
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	13
2.1. Generalidades del género <i>Agave</i> .....	13
2.2. Distribución del genero <i>Agave</i> .....	13
2.3. Descripción botánica del género <i>Agave</i> .....	16
2.3.1 <i>Agave</i> .....	16
2.3.1.1. Descripción botánica .....	16
2.3.1.2. Taxonomía .....	19
2.4. Fisiología .....	19
2.4.1 Reproducción .....	21
2.4.1.1 Reproducción sexual .....	22
2.4.1.2 Reproducción asexual .....	22
2.4.1.3 Micropropagación .....	24
2.5. Importancia .....	24
2.5.1 Usos .....	26
2.6. Situación de la ganadería en México .....	29
2.7. Calidad del forraje .....	31
2.8. Aspectos nutricionales del <i>Agave</i> .....	31
2.8.1 Contenido de fibra .....	32
2.8.2 Azúcares .....	33
2.8.3 Minerales .....	34
2.9. Fuente de alimento para el ganado y la fauna .....	35
2.9.1 Factores que determinan el valor nutrimental del Maguey .....	37
2.9.1.1 Edad y etapa fenológica .....	38

2.9.1.2 Metabolitos secundarios.....	39
2.9.1.3 Tratamiento previo .....	40
2.10. Ensilado de maguey .....	41
2.11. Especies de Agave usadas como alimento para el ganado .....	45
III. CONCLUSIONES.....	47
IV. LITERATURA CITADA .....	47
V. ANEXO .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Áreas de distribución del género Agave en Norteamérica.....	14
<b>Figura 2.</b> Distribución de especies de Agave (CONABIO, 2022).....	15
<b>Figura 3.</b> Morfología general del maguey .....	17
<b>Figura 4.</b> Esquema de la reproducción vegetativa y sexual del Agave.....	23
<b>Figura 5.</b> Monitor de Sequia de México para el 15 de junio de 2022.....	30
<b>Figura 6.</b> Aspecto del corte de pencas de maguey.....	36
<b>Figura 7.</b> Contenido de PC y Saponinas en Agave a diferentes edades fresco y ensilado.....	38
<b>Figura 8.</b> Estructura de una saponina.....	39
<b>Figura 9.</b> Proceso de pirolisis del bagazo de Agave salmiana.....	42
<b>Figura 10.</b> Proceso de ensilaje de pencas de maguey .....	43
<b>Figura 11.</b> Corte de las pencas de maguey .....	60
<b>Figura 12.</b> Proceso de ensilaje de pencas de maguey en depósitos de 20 litros .....	60
<b>Figura 13.</b> Producto final obtenido del proceso de ensilaje y alimentando cabras .....	61

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Usos de las plantas del género Agave.....	27
<b>Cuadro 2.</b> Composición mineral de los bagazos de diferentes especies de Agave.....	34
<b>Cuadro 3.</b> Composición química (% en base a MS) del ensilado de hojas de Agaves..	44

## RESUMEN

El maguey en México es una planta diversa con usos comerciales en la producción de bebidas alcohólicas, fibras naturales y ornamentación. Además, desempeña un papel crucial en la conservación de la biodiversidad de animales. La familia Agavaceae destaca en regiones áridas debido a su adaptabilidad e importancia ecológica, siendo eficientes en el uso del agua y energía. Ante el cambio climático, los Agaves podrían ser una alternativa en la agricultura y la ganadería, donde los residuos del maguey se utilizan como alimento para el ganado mediante el ensilado. El objetivo fue describir los usos actuales del maguey como alimento forrajero y sus propiedades alimenticias. Las plantas del género agave son endémicas de América. Las especies de Agave usadas como alimento para el ganado son *A. americana*, *A. salmiana*, *A. tequilana* y *A. fourcroydes*. El proceso de ensilaje de las pencas de maguey implica la cosecha y corte de las mismas, seguido del triturado en un molino. Posteriormente, se colocan en capas en un silo junto con un aditivo de bacterias ácido lácticas para iniciar la fermentación. El silo se sella herméticamente para evitar la entrada de oxígeno. Durante la fermentación, las bacterias ácido lácticas convierten los azúcares en ácido láctico y otros ácidos orgánicos, creando un ambiente ácido que evita el crecimiento de bacterias dañinas. Después de algunas semanas, el ensilado está listo para ser utilizado. La investigación confirma que el Agave tiene potencial como alimento para el ganado debido a su contenido nutricional. Es rico en fibra dietética, proteínas, minerales y vitaminas, satisfaciendo los requerimientos de los animales rumiantes.

**Palabras clave:** agave, ensilado, forraje, ganado, rumiante

## I. INTRODUCCIÓN

En México se encuentra una amplia diversidad de especies de maguey tanto silvestres como cultivadas, debido a su popularidad destacan las que se utilizan como materia prima para la elaboración de bebidas espirituosas, así como otras especies utilizadas por sus fibras naturales, con fines ornamentales. Sin embargo, también desempeñan un papel ecológico crucial en la conservación de murciélagos y otros polinizadores (Alducin-Martínez *et al.*, 2023).

La familia *Agavaceae* destaca como uno de los grupos de plantas más relevantes en las regiones áridas del mundo, gracias a su amplia gama de adaptaciones fisiológicas y morfológicas, estas plantas cuentan con ventajas significativas, como su capacidad para utilizar el agua de manera eficiente con el mecanismo CAM, así como su alta producción de biomasa. Debido a estas características, son esenciales para la supervivencia de numerosas especies animales y humanas en estos ecosistemas áridos (Eguiarte *et al.*, 2021).

Por su parte Davis (2022) menciona que las plantas de *Agave* son reconocidas por su notable capacidad de adaptación a condiciones ambientales extremas, tales como sequías, altas temperaturas y bajas temperaturas. Este rasgo se debe, en gran medida, a su tipo de metabolismo conocido como metabolismo del ácido de las crasuláceas. Estas plantas presentan características anatómicas distintivas, como hojas suculentas, raíces poco profundas y cutículas gruesas. Además, realizan la absorción de CO<sup>2</sup> durante la noche y cuentan con una diversidad de sistemas de almacenamiento de enzimas, ácidos orgánicos y carbohidratos, lo que les permite ser organismos muy eficientes en el uso del agua y la energía (Eguiarte *et al.*, 2021).

El género *Agave* posee una variedad de usos que incluyen su empleo en la alimentación humana y animal, así como en la producción de bebidas alcohólicas. Además, su biomasa resulta valiosa para la generación de biocombustibles y bioproductos, como etanol, biogás, metano, fructanos y pectina. Cabe destacar que, debido a su alta productividad anual de biomasa, las plantas de *Agave* superan en rendimiento a cultivos como el maíz y la caña de azúcar (Honorato- Salazar *et al.*, 2020). Los residuos o pencas de maguey pueden ser utilizados como alimento para el ganado a través del proceso de ensilado. En este proceso, se produce una descomposición parcial o total de la celulosa y hemicelulosa de la biomasa a temperaturas inferiores a 400 °C (Santiago-Martínez *et al.*, 2023).

Ante el cambio climático, se ha sugerido que los *Agaves* podrían beneficiarse de los aumentos en la temperatura y los niveles atmosféricos de CO<sup>2</sup>, lo que los convierte en una alternativa de uso intensivo en la agricultura o en la agroforestería. Esto se debe a que los *Agaves* están altamente adaptados a condiciones de escasez de agua y, por tanto, se presentan como candidatos idóneos para afrontar los desafíos que supone el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación (García-Moya *et al.*, 2011).

El (*Agave spp*) tiene un uso cada vez más importante como alimento forrajero y su valor nutricional son importantes debido a su tradicional uso como tal, y su creciente relevancia en diversas regiones del mundo. Identificar las propiedades alimenticias del maguey *Agave spp* podría permitir una inclusión más estratégica y eficiente en la alimentación animal en condiciones adversas y con recursos limitados. Además, su uso podría contribuir a la diversificación alimentaria animal y reducir los costos de producción. Este conocimiento también podría fomentar la investigación y el desarrollo de tecnologías para mejorar su aprovechamiento.

## **1.1 Objetivo General**

Describir los usos actuales del maguey *Agave spp* como alimento forrajero y sus propiedades alimenticias.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Generalidades del género *Agave*

El género *Agave* propuesto por Linnaeus (1753), palabra de origen griego que significa admirable, incluye varias especies de plantas adaptadas a condiciones áridas (Gentry, 1982). Se ubica dentro de la familia Agaváceas, la cual surgió aproximadamente hace 15 millones de años (Eguiarte, *et al.*, 2000), y de acuerdo con Eguiarte y Souza (2007) el género *Agave*, al cual pertenecen los magueyes se originó hace 10 millones de años en el territorio mexicano. Este género es uno de los grupos de plantas más destacados de las zonas áridas del mundo, con una estimación de entre 200 y 250 especies, con una amplia variedad de adaptaciones fisiológicas y morfológicas (González, 2022), así como su coevolución con sus principales polinizadores, como los murciélagos nectarívoros.

Presenta un metabolismo tipo MAC (Metabolismo Ácido de las Crasuláceas) y posee otras adaptaciones fisiológicas y morfológicas, tales como: hojas suculentas, un sistema de raíces superficial, cutículas gruesas en la epidermis de la hoja y acumulación de ceras en la superficie; dichas adaptaciones les ha permitido presentar una amplia dispersión en diferentes zonas geográficas con climas adversos. Todo esto hace que estas plantas sean clave para la supervivencia de muchos animales y del ser humano (Eguiarte *et al.*, 2021).

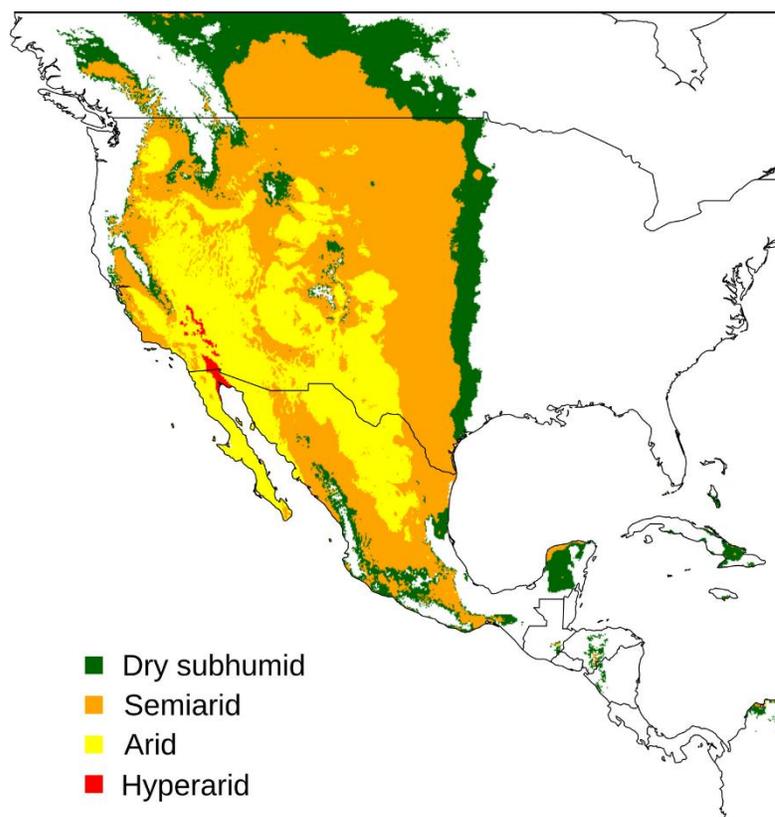
Por su historia natural, etnobotánica y alta productividad en ambientes extremos, los magueyes representan un recurso fitogenético importante de México (Mora-López *et al.*, 2011).

### 2.2. Distribución del género *Agave*

Los *Agaves* son plantas que pueden encontrarse en gran diversidad de hábitats, desde los valles y planicies hasta cerros y laderas pedregosas, incluyendo lugares montañosos de gran altitud. Se desarrollan mejor, tanto a nivel individual como poblacional, sobre planicies extensas con suelos aluviales, de profundidad y textura medias y pH de neutro

a ligeramente alcalino. Conviven también con variados tipos de vegetación, destacando entre otros: la vegetación xerófito, pastizales, matorrales, bosques, entre otras. En cuanto a la altitud, las especies de *Agave* se encuentran en un rango que va desde los 500 hasta los 2,500 metros, localizándose preferentemente en los matorrales de zonas áridas y semiáridas, aunque también está presente en otros tipos de vegetación (Thiede, 2020).

El género es endémico de América, las especies se distribuyen desde los 34° Latitud Norte hasta los 60° Latitud Sur, es decir desde el sur de los Estados Unidos de América hasta Colombia y Venezuela (García-Mendoza *et al.*, 2019). El género *Agave* se encuentra distribuido desde las áreas subhúmedas secas, semiárido, árido e hiperárido en Norteamérica (Eguiarte *et al.*, 2021), como se observa en la Figura 1.



**Figura 1.** Áreas de distribución del género *Agave* en Norteamérica.

Tomada de Zomer *et al.*, 2008.



## **2.3. Descripción botánica del género Agave**

### **2.3.1 Agave**

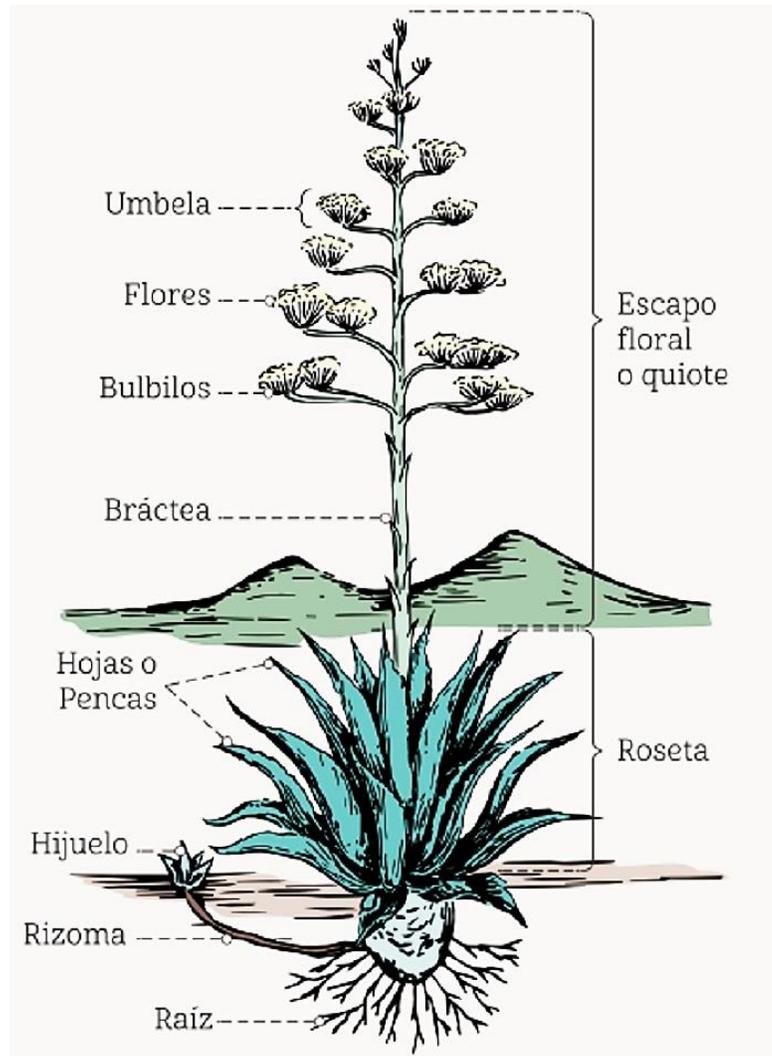
El maguey es una planta monocárpica, ya que florece solamente una vez en su vida y posteriormente muere (García-Herrera *et al.*, 2010).

#### **2.3.1.1. Descripción botánica**

Los magueyes son plantas xerófitas, adaptadas a vivir en condiciones climáticas desfavorables, con largos periodos de sequía y altas temperaturas. Las especializaciones morfológicas a las condiciones adversas consisten en modificaciones en la estructura básica de una planta como respuesta a las presiones del ambiente (García-Mendoza, 2007). Según la descripción de García-Mendoza (2011), la morfología de los Agaves se puede describir de la siguiente manera:

- Las raíces son fibrosas, poco profundas
- Los tallos son gruesos pero cortos, generalmente simples, ramificados en las plantas postradas, y pueden presentar vástagos estoloníferos o intrafoliares.
- Las hojas se disponen en roseta, pudiendo ser densas o laxas. Tienen forma lineal, lanceolada, espatulada u ovada, con el ápice terminando en una espina o ligeramente endurecido. El margen puede presentar mamilas ocasionalmente, con dientes, denticulaciones, ser córneo o filífero. Las hojas son rígidas, lisas, estriadas o escabrosas, y pueden ser suculentas o fibrosas. Por lo general, son glabras y varían en color desde un verde brillante hasta un gris azulado intenso. El grosor de la cutícula afecta el color, pudiendo aparecer bandas horizontales. A lo largo de su longitud, las hojas suelen tener fibras alargadas.
- Las inflorescencias están compuestas por un escapo alto y semileñoso, con una estructura terminal en forma de espiga o panoja donde se encuentran las flores. Debido a que los Agaves son monocárpicos, la floración ocurre solo una vez en su

vida, generalmente entre los 5 y 20 años, dependiendo de la especie. Las inflorescencias presentan una apariencia paniculada y una estructura racemosa. El tamaño de las inflorescencias varía según la especie y suele ser proporcional al tamaño de la roseta (Gentry, 2004).



**Figura 3.** Morfología general del maguey

Tomada de CIATEJ, (2017).

- Las flores de los Agaves tienen órganos reproductivos masculinos como femeninos. Exhiben protandria, es decir, los órganos masculinos maduran antes que los femeninos en cada flor. Pueden ser pediceladas (con pedicelo) o sésiles

(sin pedicelo), y se mantienen en posición erecta. Poseen una disposición epígina, donde la parte femenina (gineceo) se encuentra por encima de la parte masculina (androceo) en la estructura floral. Son flores suculentas, con un estrechamiento en la base que las rodea sobre el ovario. El color de las flores puede variar entre tonalidades verdosas, amarillentas, blanquecinas o purpúreas, mostrando una amplia gama de colores. Se presentan en pares o en grupos de 2 a 40 flores por inflorescencia, lo que contribuye a la vistosidad de la inflorescencia de los Agaves.

En cuanto a los tépalos, estos se encuentran dispuestos en 6 a 2 verticilos, son similares entre sí, imbricados (superpuestos), y pueden estar libres o fusionados en un perigonio tubular, hipocrateriforme (forma de tubo con base plana), infundibuliforme (forma de embudo) o campanulado (forma de campana). El ápice de los tépalos puede ser recto o recurvado, y se encuentran presentes 3 nectarios.

Los estambres son 6 en número, pueden estar libres o insertos en el tubo floral, y se proyectan hacia fuera (exertos). Los filamentos de los estambres son filiformes, mientras que las anteras son dorsifijas (unidas al filamento en su parte posterior), versátiles (capaces de moverse) y presentan dehiscencia longitudinal (se abren longitudinalmente para liberar el polen).

El ovario de las flores es cilíndrico o triquétero (con tres lados), y se prolonga en un cuello. Es tricarpelar (compuesto por tres carpelos) y trilocular (con tres cavidades). En cada lóculo del ovario se encuentran numerosos óvulos, que son anátropos (con la base invertida) y están dispuestos en dos series por lóculo. El estilo es exerto (proyectado) y filiforme (delgado), mientras que el estigma es trilobado y presenta glándulas papilosas.

- Las semillas de los Agaves tienen forma lunular, es decir, en forma de media luna. Son triangulares y aplanadas, con una ligera ala estrecha en su parte convexa y tienen color negro y un aspecto brillante.

### 2.3.1.2. Taxonomía

Filo Tracheophyta

Subfilo Angiospermae

Monocotiledóneas

Clase Liliopsida

Orden Asparagales

Familia Asparagaceae

Subfamilia Agavoideae

Género Agave

CONABIO, 2022

### 2.4. Fisiología

Los Agaves son plantas xerófitas que han evolucionado con adaptaciones morfológicas y metabólicas, como el Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (CAM) un mecanismo de fotosíntesis que les permite maximizar la eficiencia en el uso del agua y sobrevivir en entornos áridos y secos. Estas características los convierten en plantas altamente resistentes a la sequía y les permiten prosperar en condiciones adversas (Nobel *et al.*, 2003; Pimienta *et al.*, 2005).

Las plantas pertenecientes al género *Agave* son conocidas por su notable capacidad de tolerar condiciones ambientales extremas, como la sequía, el calor y el frío, se debe en gran medida al tipo de metabolismo que presentan, conocido como metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), les permite a estas plantas ajustar su ciclo de fotosíntesis para realizar la captación de dióxido de carbono durante la noche, cuando las temperaturas son más frescas y la humedad relativa es más alta, y almacenar este dióxido de carbono para ser utilizado durante el día en la fase de fotosíntesis (Davis, 2022).

Las plantas CAM muestran una gran plasticidad en la captación nocturna de CO<sub>2</sub> y una diversidad de sistemas de almacenamiento de enzimas, ácidos orgánicos y carbohidratos. Además, presentan rasgos anatómicos como succulencia de los tejidos y estrategias de almacenamiento y captura de agua para enfrentar la sequía (Niechayev *et al.*, 2019). Algunas regiones con poblaciones silvestres de *Agave* reciben tan solo 7 mm de lluvia y otras regiones reciben hasta 762 mm o más de precipitación anual (Scheinvar, 2018).

La importancia ecológica de la fijación nocturna del CO<sub>2</sub> radica en su contribución a la sobrevivencia de las mismas plantas, al proveer un mecanismo de recirculación interna de CO<sub>2</sub> en condiciones de sequía severa, que evita la inhibición del aparato fotosintético, cuando el cierre de las estomas impide la absorción del CO<sub>2</sub> externo. Además, la vía MAC contribuye a la producción de materia orgánica y crecimiento de la planta (Schiller y Bräutigam, 2021). Adicionalmente, a las características anteriormente mencionadas, la organización de las hojas en forma de roseta en los Agaves permite captar mayor radiación para el proceso de fotosíntesis y canalizar el agua hacia las raíces superficiales, las cuales en épocas de sequía pueden disminuir de tamaño y así evitar la pérdida de agua mediante este sistema (Gentry, 2004).

Las hojas muertas que se acumulan en la base de los Agaves cumplen varias funciones beneficiosas. Por un lado, actúan como una capa protectora que amortigua el tejido foliar vivo contra las altas temperaturas de la superficie del suelo, que pueden alcanzar valores entre 50 y 55°C. Además, es probable que estas hojas muertas contribuyan a reducir la evaporación del suelo y aumentar la cantidad de materia orgánica presente en el suelo. (Nava-Rodríguez, 2014).

Los magueyes silvestres y cultivados prosperan en ambientes áridos y suelos pobres en tierras marginales, sus requerimientos edáficos incluyen suelos arenosos con buen drenaje, pueden encontrarse creciendo en suelos rocosos en los que las temperaturas pueden alcanzar los 70°C (Nobel, 1994), de acuerdo con Cen-Cen *et al.* (2015) los Agaves pueden poseer mecanismos celulares y bioquímicos de homeostasis nutricional alternos a los descritos en otras plantas.

Debido a que se desarrollan en regiones áridas y semiáridas, se podría suponer que las plantas MAC tienen una productividad baja, sin embargo, su productividad neta por día o por cosecha puede ser comparable a las de especies agrícolas C3 y C4 (Nobel, 2010). Particularmente la productividad de plantaciones de *Agave* varía entre 4000 y 30,000 kg/ha al año, y dependiendo del sistema de cultivo, puede ser aún mayor en comparación con la productividad de 5,000 a 26,000 kg/ha al año de especies fotosintéticas C4 como el maíz, el pasto de elefante y la caña de azúcar (Honorato-Salazar y Sadhukhan, 2020).

Los Agaves poseen un gran potencial para ser utilizados como cultivos bioenergéticos debido a su alta producción de biomasa. Entre las especies de mayor interés para este fin destacan *A. salmiana*, *A. mapisaga*, *A. americana* y *A. tequilana* (Escamilla-Treviño *et al.*, 2012; Stewart, 2015; Davis, 2022).

En este sentido, el uso de Agaves en la agricultura o la agroforestería podría ser beneficioso en términos de la sostenibilidad de los sistemas productivos, ya que se trata de una planta que requiere bajos niveles de mantenimiento y recursos, tales como agua y fertilizantes. Además, los Agaves presentan una alta capacidad de regeneración y un ciclo de vida relativamente corto, lo que los convierte en una opción de rápido crecimiento y rentabilidad. Por lo tanto, los Agaves se presentan como una alternativa prometedora en el contexto del cambio climático, debido a su capacidad de adaptación a condiciones ambientales adversas y a su potencial para su uso en sistemas productivos sostenibles y rentables (García-Moya *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2015).

#### **2.4.1 Reproducción**

Los Agaves son plantas hermafroditas y monocotiledóneas, se reproducen de manera sexual con la formación de semillas y asexual, formando hijuelos de rizoma, bulbillos o por micropropagación de tejidos (Rocha *et al.*, 2005).

### **2.4.1.1 Reproducción sexual**

La materia necesaria para generar la inflorescencia se moviliza desde las hojas, las cuales pierden gran cantidad de peso, además, se generan pérdidas de agua también por las ramas laterales de la inflorescencia, así como por las flores cuando producen abundante néctar (Nobel, 1977). Por lo tanto, la pérdida de agua constante es alta en la reproducción sexual, comparada con la pérdida de ésta en plantas con reproducción asexual.

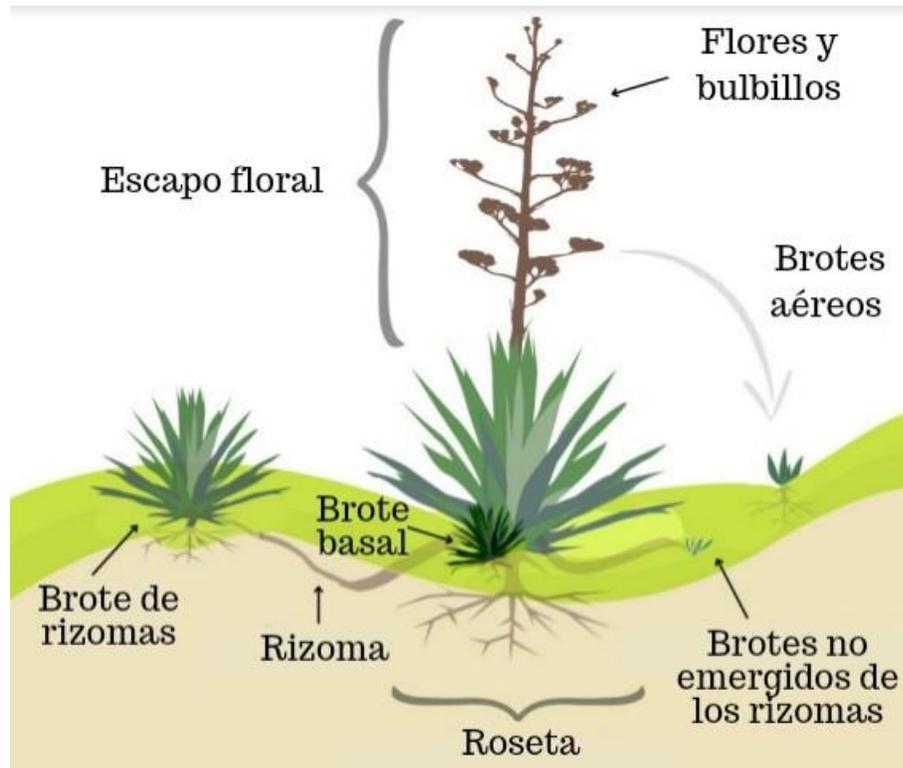
La reproducción sexual se lleva a cabo por la polinización, mediante agentes abióticos como el agua y el viento o bióticos como animales vertebrados principalmente por murciélagos nectarívoros (Gómez-Ruiz, 2020) y aves (Gómez-Aiza y Zuria, 2010), en menor medida insectos diurnos y nocturnos (palomillas, abejas, abejorros), los cuales polinizan el estigma de la flor y permiten transferencia del polen desde los sacos polínicos de las anteras, hasta el estigma en las angiospermas de la flor (Aguado *et al.*, 2015).

Los Agaves han desarrollado una amplia gama de mecanismos morfológicos y fisiológicos para aumentar o restringir la polinización y han coevolucionado frecuentemente con los polinizadores (Bewley y Black, 2012). La reproducción sexual de los Agaves es necesaria para mantener la estructura y la dinámica de las poblaciones, aumentando la variabilidad genética de estas (Figueredo-Urbina *et al.*, 2021).

### **2.4.1.2 Reproducción asexual**

La reproducción en los Agaves se lleva a cabo mediante un mecanismo fascinante que involucra la capacidad de la planta para generar clones en distintas áreas de su roseta. Estos clones, conocidos como hijuelos, permiten la reproducción asexual de la planta. Además, es posible propagar los Agaves mediante esquejes, es decir, al separar un fragmento de una de sus hojas y depositarlo en un sustrato adecuado, éste puede enraizar y generar un nuevo individuo. Esta forma de dispersión es otro método eficaz para multiplicar las plantas de Agave (García-Mendoza, 2007).

Los hijuelos son estructuras que se generan principalmente en la base de una planta, aunque también pueden surgir a cierta distancia de la planta madre a través de estolones. Estos hijuelos desarrollan raíces y, con el tiempo, crecen de forma autónoma. Además, existen hijuelos interfoliarios que se forman entre las hojas de la roseta y se desarrollan cuando se separan de la planta madre o cuando esta fallece (Salinas-Bonillo *et al.*, 2023). Este mecanismo de reproducción da lugar a densas y extensas agrupaciones de plantas, lo cual les brinda la capacidad de ampliar su área de distribución.



**Figura 4.** Esquema de la reproducción vegetativa y sexual del Agave

Tomada de Salinas-Bonillo *et al.*, 2023

### 2.4.1.3 Micropropagación

Algunos factores que impiden la multiplicación masiva de Agave por métodos convencionales son las bajas tasas de reproducción asexual y reproducción sexual limitada por problemas de polinización y viabilidad de las semillas (Chaves de Souza *et al.*, 2018), para algunas especies del género Agave el cultivo de células y tejidos vegetales ha sido utilizado con diversos fines desde hace muchos años, tal es el caso de la propagación por medio de proliferación de yemas axilares, organogénesis y embriogénesis somática (Bautista-Montes *et al.*, 2022).

Gracias a estas biotecnologías es posible aumentar poblaciones de especies vegetales en alguna situación de riesgo, Delgado-Aceves *et al.* (2022) realizaron la micropropagación de brotes de *Agave peacockii*, que se encuentra dentro de la NOM-059 (SEMARNAT), además se sometieron a un proceso de criopreservación con nitrógeno, para futuras investigaciones. La aplicación de técnicas de cultivo de tejido vegetal basadas en sistemas de cultivo in vitro, parece ser una alternativa viable que puede aumentar la densidad de las poblaciones de Agaves, pero es necesario desarrollar protocolos de micropropagación específicos para cada especie (Fernández *et al.*, 2020).

## 2.5. Importancia

El género Agave juega un papel ecológico fundamental en las regiones áridas y semiáridas, por su sistema radicular y morfología, estas plantas aprovechan eficientemente el agua, contribuyendo a su retención y recarga de los mantos freáticos. Además, desempeñan un papel crucial en la reducción de la erosión del suelo y en la captura de carbono (Bautista y Smit, 2012). Asimismo, los Agaves proveen refugio y alimento para una amplia variedad de especies animales, contribuyendo así a la biodiversidad de los ecosistemas donde se encuentran. Los Agaves son importantes actores ecológicos que desempeñan múltiples funciones, desde la conservación del agua hasta el mantenimiento de la vida silvestre (De la Rosa y Noriega, 2023).

Algunas especies pertenecientes al género *Agave* son consideradas de gran importancia para la conservación de la biodiversidad. Por ejemplo, ciertos murciélagos dependen directamente del néctar de *Agave* como fuente de alimento (Gómez-Ruíz *et al.*, 2015). Asimismo, García-Herrera *et al.* (2010) mencionan al menos cuatro especies de insectos que tienen una estrecha relación con el ciclo de vida del *Agave*. Estas especies incluyen hormigas, escamoles (*Liometopum apiculatum* y *L. occidentale*), el gusano blanco (*Acentrocneme hesperiaris*) y el gusano de maguey (*Hypopta agavis*). Estos ejemplos resaltan la importancia de los *Agaves* como hábitats y fuentes de alimento para diversas especies, contribuyendo así a la conservación de la biodiversidad.

La utilización de los magueyes ha desempeñado un papel crucial en el desarrollo humano de las regiones áridas y semiáridas de México. Su cultivo y aprovechamiento se remonta a tiempos precolombinos, cuando varias familias dependían económicamente de esta planta. Tanto los pueblos indígenas como los mestizos han aprovechado los *Agaves* de diversas maneras, utilizándolos como fuente de alimento, bebida, medicina, combustible, protección, ornato, fibras y materiales de construcción, entre otros usos (Gentry, 2004; García-Mendoza, 2007).

Durante las últimas décadas, las especies cultivadas de *Agave* han tenido un impacto económico considerable. Según el informe del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) para el año 2021, se destinaron aproximadamente 120,000 hectáreas a la producción de *Agaves* a nivel nacional. De esta superficie, se cosechó alrededor del 15%, lo que resultó en una producción total de 1,405,432 toneladas, con un rendimiento promedio de 76.8 toneladas por hectárea. Estos cultivos de *Agave* tuvieron un valor de producción que superó los \$27,235 millones (SIAP, 2022).

El Agave destaca tanto en su entorno natural como en cultivo gracias a sus cualidades excepcionales. Sus adaptaciones evolucionadas a entornos áridos, combinadas con la diversidad de productos que ofrece, respaldan su utilización como cultivo. Además, gracias a su eficiente vía de fotosíntesis CAM (Metabolismo Ácido de las Crasuláceas, por sus siglas en inglés) y a sus rasgos morfo-fisiológicos únicos, los Agaves desempeñan un papel importante en el equilibrio de los ecosistemas donde se encuentran (Stewart, 2015).

### **2.5.1 Usos**

La planta de maguey ofrece numerosas oportunidades de aprovechamiento, con más de 100 formas de uso conocidas, donde aproximadamente 70 proporcionan empleo a las personas que se dedican a su aprovechamiento (Esparza-Ibarra et al., 2015). Entre estos destacan aquellos Agaves que se utilizan como materia prima para la elaboración de bebidas espirituosas como la bacanora, raicilla, sotol, tequila, pulque y mezcal. Estas bebidas representan una parte importante de la tradición y la economía de las regiones donde se cultivan los Agaves.

Otras especies son utilizadas por sus fibras naturales como *Agave lechuguilla*, del que se obtienen sogas de alta calidad, con fines ornamentales y, principalmente por su función ecológica en la preservación de los murciélagos y otros polinizadores, por lo tanto, es importante la conservación de todas las especies de magueyes (Alducin Martínez, et al., 2023).

La conservación de todas las especies de Agave es de suma importancia debido a su destacado papel en la preservación de los murciélagos y otros polinizadores (Alducin Martínez, et al., 2023). Además, el uso ancestral de las fibras naturales de Agave, como en el caso del Agave lechuguilla, para la producción de sogas de alta calidad, es otro aspecto destacado, estas fibras no solo tienen aplicaciones ornamentales, sino que también representan una opción ecológica y sostenible.

**Cuadro 1.** Usos de las plantas del género *Agave*

<b>Uso</b>	<b>Parte de la planta</b>	<b>Uso</b>	<b>Parte de la Planta</b>
<b>Bebidas</b>		Levadura	Residuos de pulque
Aguamiel	Piña del maguey	Condimento	Pulque
Bacanora	Piña <i>Agave angustifolia</i>	Tortillas	Quiote
Jarabe	Aguamiel concentrada	Mezcal dulce	Penca asada
Pulque	Aguamiel fermentada	Barbacoa	Penca verde
Miel	Aguamiel concentrada	<b>Ornato</b>	
Vinagre	Aguamiel fermentada	Adornos de Navidad	Maguey completo
Aguardiente	Pulque destilado	Base para adornos	Penca
Mezcales	Piña de Agaves	Fibras para arcos florales	Penca
Tequila	Piña de <i>Agave tequilana</i>	Adornos corporales	Semillas
<b>Tejido y vestuario</b>		Sonajas	Semillas
Hilos, tejidos, costales, bolsas y mantas	Fibra de la penca	Tocados para mujeres	Fibras del quiote
Tapetes, lazos y morrales	Penca	<b>Uso doméstico en general</b>	
Sandalias y huipiles	Pencas	Jabón para ropa	Raíces y penca
Cinchos y hamacas	Pencas	Cepillos	Raíces
Sombreros y ayates gruesos para carga	Pencas	Escobas	Raíces

<b>Construcción</b>		Canastas	Raíces
Vigas	Quiote seco	Clavos	Espinas
Adobes	Bagazo de la piña	Aguja con hilo	Púa terminal con fibra
<b>Medicinal</b>	Diferentes partes de la planta	Recipientes	Penca
Alimento y condimentos		Estropajos y estopa	Fibras
Gusanos blancos	Pencas	Escobetas	Fibras de la penca
Gusanos rojos	Raíces	Bancos	Mezontete
Sal de gusano	Piña	<b>Agropecuario</b>	
Condimento de barbacoa	Pulque	Deslindar terrenos	Planta completa
Guiso de galumbo	Inflorescencia	Formar y proteger terrazas	Planta completa
Postre	Escapo asado, piña	Cercas protectoras	Planta completa
Endulzante	Aguamiel	Abono	Cenizas de pencas y piñas secas
Saborizante	Aguamiel y piña	Protección contra erosión	Planta completa
Mixiotes	Epidermis del cogollo	Alimento para aves	Residuos de pulque

Recientemente el Agave se considera como una plataforma para futuras bioindustrias debido a que pueden mantener una alta productividad de biomasa con bajos requerimientos de agua y parecen ser una buena alternativa de cultivo para bioindustrias adaptadas al cambio climático (Owen *et al.*, 2016).

## 2.6. Situación de la ganadería en México

Las zonas áridas y semiáridas de México abarcan aproximadamente el 50% del territorio nacional. En estas áreas, las condiciones ambientales no favorecen el desarrollo de sistemas pecuarios altamente productivos (Arámbula, 2005). En estas regiones, la alimentación del ganado se basa principalmente en el uso de recursos forrajeros. Esto es fundamental en los sistemas de producción de vacas y becerros, así como en la cría de caprinos y ovinos en condiciones extensivas. Sin embargo, estos sistemas presentan un desafío significativo debido a su alta dependencia de la precipitación, donde la cantidad de lluvia determina la producción de forraje y, por lo tanto, la disponibilidad de alimento para el ganado. Lamentablemente, los agostaderos han sufrido un deterioro alarmante, lo cual se atribuye en gran medida a la sobreexplotación de este recurso (Jurado-Guerra *et al.*, 2021).

La productividad de los agostaderos ha disminuido debido a la erosión y la pérdida de cobertura vegetal. Esta situación se agrava aún más por la falta de lluvias, lo que se refleja en una producción inferior al 50% del potencial de los agostaderos, con una tendencia negativa (CONAZA, 2021). En este escenario, los productores pecuarios enfrentan grandes dificultades para alimentar a su ganado durante la temporada de sequía, y muchos sistemas productivos fracasan debido a la volatilidad de los insumos (Cavallotti, 2014).

En los últimos años, las sequías han afectado a gran parte del territorio nacional (Bocco *et al.*, 2021). En la ganadería, el impacto inicial de la sequía se manifiesta en la reducción de la disponibilidad de forraje y, posteriormente, en una disminución de la producción, lo cual se refleja en la condición corporal del ganado, los índices productivos y las tasas de reproducción (Cuevas-Reyes y Rosales-Nieto, 2018).

Según investigaciones, dos o más años consecutivos de sequía tienen un impacto negativo mayor en comparación con un solo año de sequía seguido de uno con precipitación normal o regular (Lobato-Sánchez, 2016).



## **2.7. Calidad del forraje**

La calidad nutricional de cualquier tipo de forraje se determina por su composición química y su digestibilidad. La composición química está influenciada por la naturaleza de la planta, mientras que la digestibilidad es afectada tanto por la planta como por el animal que la consume (Kellems y Church, 2002).

La presencia de lignina tiene un impacto negativo directo en la digestión total y un efecto indirecto al dificultar el acceso de las bacterias a las partes de la fibra que pueden degradarse. La concentración de lignina varía según la especie de forraje y su estado de madurez, siendo mayor en plantas más maduras (Castro-Hernández *et al.*, 2017). La cantidad de lignina puede ser un factor determinante que limite la degradación de la pared celular. Sin embargo, la organización de la matriz de la pared, donde se encuentra la lignina, puede regular el grado en el que esta influye en la degradación de los polisacáridos de la pared celular (Hernández, 2022).

La palatabilidad es otro factor de gran importancia en la ingesta voluntaria de forraje. El sabor desempeña un papel biológico fundamental al relacionar al animal con su entorno y ayuda a regular la ingesta de alimentos agradables y a rechazar los menos apetecibles (Eslava y Gómez, 2012).

## **2.8. Aspectos nutricionales del Agave**

El maguey se ha identificado como una alternativa viable para la alimentación del ganado, ya que puede reducir la mortalidad de los animales, mejorar el uso eficiente del agua y disminuir la necesidad de comprar forraje adicional. En algunos ensayos se ha demostrado que el maguey representa un forraje de mejor calidad en comparación al heno de maíz, avena y el nopal (Silos *et al.*, 2011), no obstante, la calidad va depender de la parte que sea aprovechada, aunque el uso más común son las hojas.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el consumo de pencas frescas de maguey debe evitarse debido a su alto contenido de saponinas. En cambio, se recomienda la opción de ensilaje, que puede reducir la concentración de saponinas, mejorar la digestibilidad de la fibra y promover una mejor fermentación ruminal en los animales. Si bien el bagazo puede causar problemas digestivos, su digestibilidad puede mejorarse al agregar hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Por último, es importante destacar que la inflorescencia o qurote de maguey no causa problemas digestivos en las ovejas (Pérez-Zavala, *et al.*, 2020).

*Agave americana* presenta un contenido de materia seca del 11,15%, el cual se considera bajo. Además, su contenido de proteína bruta también es bajo, con un valor del 5,69% de materia seca. Este valor está por debajo del umbral mínimo del 7% requerido para el correcto funcionamiento de los microorganismos ruminales (Castillo-López y Domínguez-Ordoñez, 2019).

No obstante, debido a que es una planta CAM, tiene la capacidad de retener una gran cantidad de agua y producir hasta 5 veces más materia seca por milímetro de lluvia que otras especies. Por lo tanto, puede ser utilizada como complemento en las dietas de los animales durante los períodos de sequía, constituyendo una fuente complementaria de agua viable para los rumiantes (Maduro-Dias *et al.*, 2023).

### **2.8.1 Contenido de fibra**

Las especies del género *Agave* producen fibras en sus pencas, las cuales son de baja densidad, alta tenacidad, largas y biodegradables. Estas fibras están compuestas principalmente por celulosa, lignina y hemicelulosa, junto con pequeñas cantidades de otros componentes como pectina, ceras y sustancias solubles en agua. La estructura química de estas fibras consiste en celulosa, la lignina y la hemicelulosa, además de pequeñas cantidades de pectina, ceras, sustancias solubles en agua (Hulle *et al.*, 2015).

Las pencas de Agave o el bagazo contienen tanto fibra como jugo, además de una serie de sustancias valiosas como compuestos fenólicos, fructanos, saponinas y azúcares (Saraiva *et al.*, 2022). La cantidad de fibra está estrechamente relacionada con la digestibilidad, en general las especies del género *Agave* presentan buenos niveles de digestibilidad *in vitro*, Mata *et al.* (2011) registraron porcentajes de 67.43% a 82.74% de degradabilidad para tres variedades de *Agave salmiana*, resultados que dependen del estado de madurez de la planta.

### **2.8.2 Azúcares**

Los Agaves son ricos en azúcares, incluyendo los fructanos de Agave que son carbohidratos naturales de reserva. Estos últimos son considerados polisacáridos compuestos por mezclas de polímeros de fructosa con diferentes grados de polimerización, que se utilizan en la industria alimenticia por sus beneficios en la salud humana en la prevención de enfermedades (Espinosa-Andrews *et al.*, 2021).

Las pencas de maguey se utilizan para extraer los jugos necesarios en la elaboración de bebidas espirituosas. Una vez realizado este proceso, se obtiene un residuo denominado bagazo, el cual, a pesar de su apariencia, contiene azúcares y fructanos de buena calidad con un pH entre 5.6 y 5.8 y una concentración de sólidos solubles que oscila entre 25.0 y 28.8 °Bx. Debido a estas características, el bagazo puede ser utilizado como alimento para el ganado (Juárez-Flores *et al.*, 2015).

Las hojas superiores e inferiores de *A. salmiana* son una buena fuente de carbohidratos solubles. Sin embargo, presentan un bajo contenido de proteína cruda, lo que requiere suplementación proteica. El ensilado disminuye su concentración de saponinas y sus características de fermentación son aceptables. La composición química sugiere que las etapas de madurez y brote son las más adecuadas para ser utilizadas como alimento para rumiantes, aunque se debe tener en cuenta el riesgo asociado con su contenido de saponinas. No obstante, la técnica de ensilado y fermentación resulta efectiva para reducir dicha concentración y hacerlo apto como alimento para rumiantes (Pinos-Rodríguez *et al.*, 2008).

### 2.8.3 Minerales

Se ha demostrado mediante análisis que las plantas del género *Agave* son abundantes en micro y macrominerales (Delgadillo-Ruiz *et al.*, 2015). Destaca la presencia de calcio como el mineral más predominante en estas plantas. Por lo tanto, durante las estaciones secas, el ensilaje de maguey puede cubrir los requerimientos de calcio para los rumiantes (Noguera y Ochoa, 2016).

Delgadillo *et al.* (2015), menciona que el bagazo de *Agave tequilana weber* puede representar una fuente natural de calcio ya que las plantas de *Agave* contienen cristales de oxalato de calcio, después de la incineración del *Agave* los compuestos de calcio tienen mayor disponibilidad, además el hierro encontrado en el bagazo de maguey puede suministrar requisitos de rumiantes que han sido estimadas entre 40 y 50 ppm para las ovejas y el ganado bovino (NRC, 2007).

Las pencas de *Agave salmiana* presentan una destacada presencia y contenido de Selenio (5.95 g/100g), así como de otros minerales como Magnesio, Zinc, Hierro, Cobre, Boro y Fósforo (Silos-Espino *et al.*, 2011). Estos minerales son suficientes para cubrir los requerimientos diarios del ganado bovino (NRC, 2007).

**Cuadro 2.** Composición mineral de los bagazos de diferentes especies de *Agave*

Nutriente	<i>Agave salmiana</i>	<i>Agave weberi cela</i>	<i>Agave tequilana weber</i>	<i>Agave angustifolia Haw</i>	Requirimiento en dieta bovino mg/dia <sup>-1</sup>
Macrominerales					
Nitrógeno Total	0.54%	0.73%	0.77%	-----	-----
Fósforo	0.03%	0.02%	0.07	0.14%	40-80
Potasio	0.43%	0.08%	0.26%	.36%	8000
Calcio	3.46%	1.95%	3.68%	7.3%	2400
Magnesio	0.12%	0.08%	0.23%	0.33%	1800
Azufre	0.21%	0.53%	-----	-----	1600
Microminerales					

Hierro	79.1 ppm	485 ppm	371 ppm	402.67 ppm	50
Zinc	38.5 ppm	25.9 ppm	30.49 ppm	59 ppm	75-100
Manganeso	8.16 ppm	7.81 ppm	9.12 ppm	10.67 ppm	40
Cobre	1.89 ppm	5.17 ppm	4.85 ppm	38 ppm	6-8

Fuente: Adaptado de NRC. (2007); Delgadillo-Ruiz *et al.* (2015); Hidalgo-Reyes *et al.* (2015).

### **2.9. Fuente de alimento para el ganado y la fauna**

En las zonas donde se cultiva o se encuentra de forma natural, esta planta se ha utilizado como alimento de emergencia para el ganado durante las temporadas de sequía (Martín *et al.*, 2011). Los ganaderos suelen cortar las pencas y el tallo del maguey en el campo o en el corral y combinarlo con otras fuentes de alimento, como los residuos de la cosecha. Incluso, los propios animales ramonean la planta cuando está en etapa de floración (Ober y Steidl, 2004).



**Figura 6.** Aspecto del corte de pencas de maguey

Tomada de Sector Maguey Mezcal, 2019

Las plantas de Agave se presentan como una opción viable para el alimento del ganado debido a sus altos niveles de minerales esenciales como calcio, magnesio y potasio, así como su contenido de fibra soluble. Investigaciones han demostrado que las dietas basadas en Agave pueden mejorar el aumento de peso y la salud general del ganado. Por lo tanto, aprovechar el potencial de las plantas como fuente sostenible de alimento para el ganado puede ser una estrategia efectiva y respetuosa con el medio ambiente (Saraiva *et al.*, 2022).

La concentración de saponina en extractos acuosos de pencas de *A. salmiana* varía según la etapa de crecimiento de la planta, y se ha observado un aumento en las hojas de plantas maduras en comparación con las hojas de plantas en la etapa de brote. Las saponinas son compuestos químicos que se encuentran en muchas plantas, incluyendo el Agave, y se ha demostrado su capacidad antimicrobiana, antiinflamatoria y antitumoral en estudios in vitro y en animales (Pinos-Rodríguez *et al.*, 2008).

La inflorescencia del Agave se está considerando como una alternativa para la alimentación del ganado debido a su alto contenido de fibra. La sustitución del 75% de alfalfa con flores ásperas de maguey cenizo no afecta negativamente el peso promedio, la ingesta de materia seca y las características de fermentación ruminal de las cabras, lo que sugiere que el Agave podría ser un sustituto adecuado de la alfalfa, por lo tanto, el Agave es una opción ecológica y accesible para la alimentación del ganado en zonas áridas (Mellado *et al.*, 2008).

Se ha evaluado en conejos la suplementación de hasta un 1.5% de polvo de tallo de *Agave tequilana*, y se encontró que no afectó su viabilidad y tuvo un efecto natural que promovió su crecimiento. Además, se observó un aumento en la ingesta de alimento y un cambio en el grosor de las capas musculares y mucosas en los intestinos, lo cual está asociado con una mejor salud intestinal, este efecto positivo se debe a la combinación de fructanos y metabolitos secundarios presentes en el polvo de tallo. Los resultados muestran que este polvo puede ser utilizado como un promotor de crecimiento natural en conejos, aunque su efecto puede variar dependiendo de la cantidad de carbohidratos en la dieta y la especie animal (Martínez *et al.*, 2022).

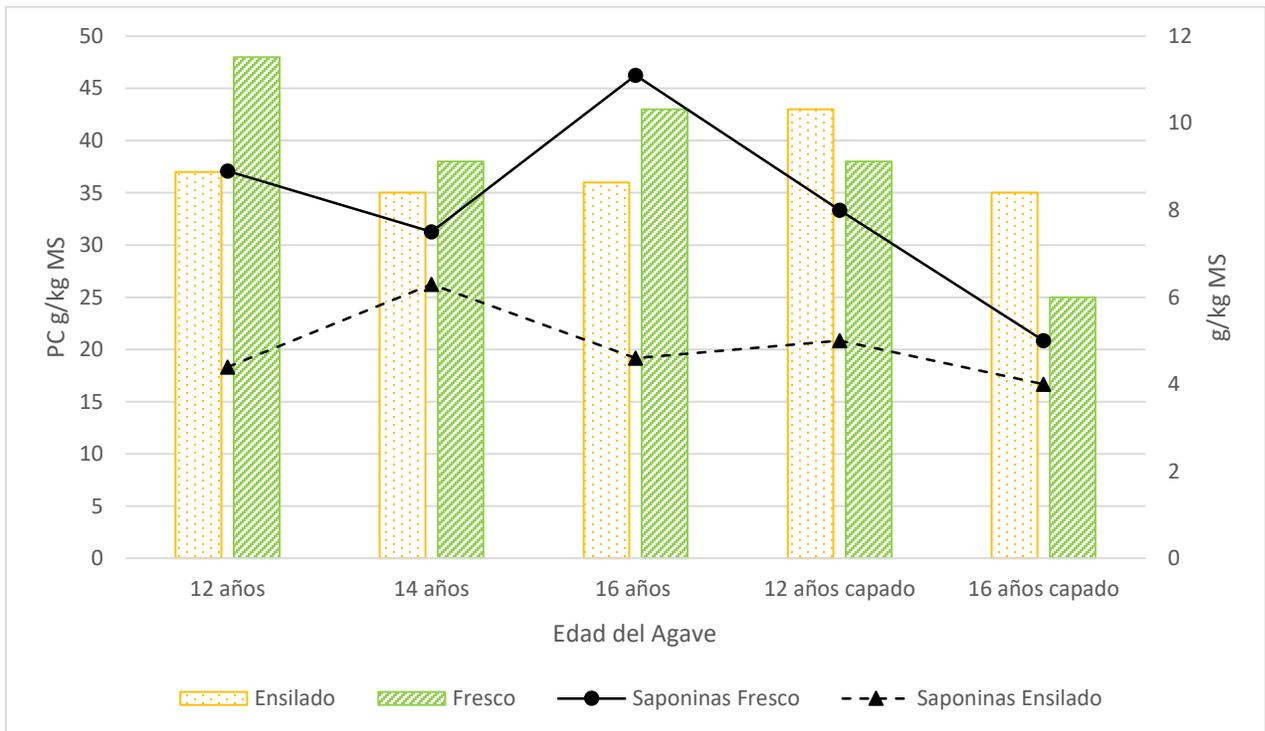
El maguey es consumido por los ejemplares de venado cola blanca durante todo el año (Villarreal-Espino *et al.*, 2011), se ha encontrado que los animales del desierto consumen inflorescencias o ejemplares de maguey cuando se presenta la sequía en los agostaderos del norte de México (Gastelum *et al.*, 2020).

### **2.9.1 Factores que determinan el valor nutrimental del Maguey**

El valor nutritivo de cualquier forraje se ve afectado por su composición y digestibilidad. La composición química está determinada por la naturaleza de la planta, mientras que la digestibilidad depende tanto de la planta como del animal. La cantidad de forraje consumido está influenciada por la facilidad con la que el animal lo selecciona e ingiere, la velocidad de digestión, la cantidad de forraje disponible y los efectos directos del entorno en el animal que se está alimentando (Kellems y Church, 2002).

### 2.9.1.1 Edad y etapa fenológica

El estado de madurez de la planta de maguey fresco tiene un impacto directo en la degradación de la materia seca, independientemente de la especie (Mata, 2011). Tanto las pencas frescas como las ensiladas en etapas maduras y de yemas son más deseables del Agave como alimento para los rumiantes (Zamudio *et al.*, 2009). Según Pinos-Rodríguez *et al.* (2008), a diferencia de los forrajes comunes, la composición química del ensilaje de Agave no se ve afectada por su madurez, esto puede deberse a la mayor concentración de carbohidratos solubles que se convierten en ácido láctico en etapas maduras o de yemas en comparación con los Agaves jóvenes. Además, no se encontraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) en el contenido de proteína cruda en función de la edad de la cosecha como se observa en la Figura 7.



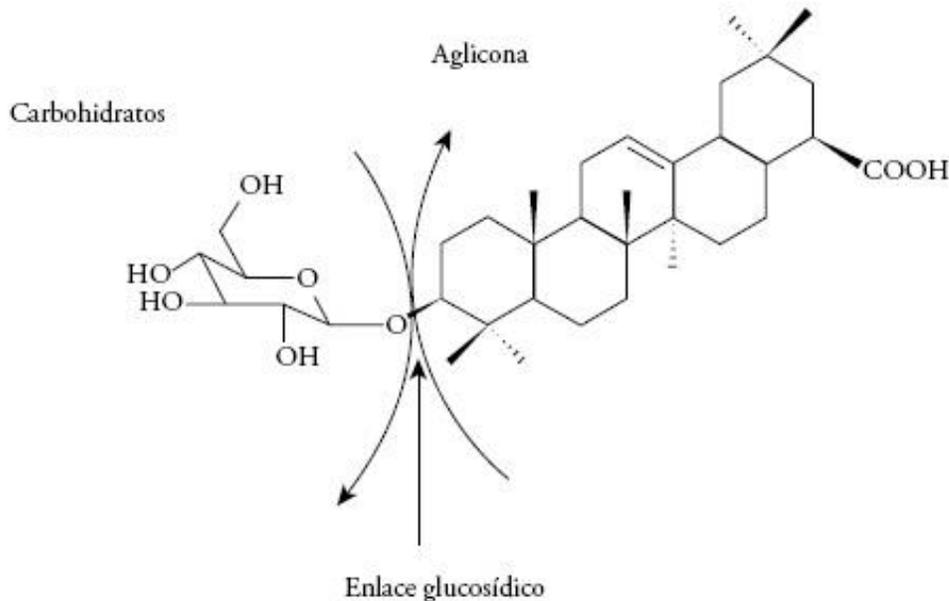
**Figura 7.** Contenido de PC y Saponinas en Agave a diferentes edades fresco y ensilado

Adaptada de Pinos-Rodríguez *et al.* (2008); Zamudio *et al.* (2009).

### 2.9.1.2 Metabolitos secundarios

Los compuestos bioquímicos presentes en el Agave son altamente variables y parecen no cumplir funciones específicas en el metabolismo. Sin embargo, estos compuestos representan una estrategia adaptativa para evitar el consumo por herbívoros, ya que muchos de ellos poseen olores y sabores desagradables para los animales, o generan efectos secundarios perjudiciales. Entre los principales metabolitos secundarios del Agave se encuentran las saponinas (Sidana *et al.*, 2016).

El término saponina proviene del latín *sapon*, que significa jabón, y hace referencia a las propiedades de estas sustancias para reducir la tensión superficial y formar espuma en soluciones acuosas. Esto se debe a que su estructura incluye un extremo hidrofílico y otro extremo altamente hidrofóbico (García-Parra *et al.*, 2018). Las saponinas consisten en un núcleo lipofílico que puede tener una estructura esteroide o triterpenoide, y están unidas a una o más cadenas de carbohidratos como se observa en la Figura 8.



**Figura 8.** Estructura de una saponina

Las pencas de *Agave americana* presentan un alto contenido de saponinas, aproximadamente 80 g/eq. de diosgenina por kilogramo de materia seca (Nasri y Salem, 2012). Estas saponinas tienen un sabor amargo y algunos autores las consideran compuestos antinutricionales, ya que pueden causar irritación en la piel y no son digeridas. Cuando son consumidas por el ganado, pueden provocar inflamación y ardor en el esófago (Aranibar, 2017; Centty-Rodríguez, 2022). Sin embargo, las concentraciones de saponinas en el Agave se reducen hasta un 60% después del proceso de ensilaje (Pinos-Rodríguez *et al.*, 2008).

El efecto de estos compuestos sobre la digestibilidad depende de la composición y del nivel de inclusión en la dieta (Aazami *et al.*, 2013) no obstante se ha demostrado que la utilización de Agave como forraje no provoca trastornos digestivos en el ganado (Álvarez-Fuentes *et al.*, 2015).

### **2.9.1.3 Tratamiento previo**

Los rumiantes cuentan con una población microbiana diversa, compuesta principalmente por hongos anaeróbicos fibrolíticos y protozoarios. Estos microorganismos desempeñan un papel crucial en la descomposición de la fibra, siendo responsables de aproximadamente el 70% del proceso de digestión de los alimentos. La eficiencia de estos microorganismos depende en gran medida de la calidad de los forrajes que consumen los animales. En el caso específico del maguey, se ha comprobado que el ensilaje tiene un impacto significativo en las características físico-químicas de este alimento, lo que a su vez mejora su digestibilidad y palatabilidad (Castro-Rivera, 2015; Reyes-Castro *et al.*, 2022). Esto puede traducirse en un aumento en la ingesta de alimento y en el rendimiento de los animales.

Una opción consiste en procesar las pencas mediante el ensilaje, un proceso de fermentación de los carbohidratos solubles presentes en el forraje. Esta fermentación no requiere necesariamente aditivos, ya que las bacterias productoras de ácido láctico están naturalmente presentes en el ensilaje. Estas bacterias ácido lácticas desempeñan la función de producir metabolitos de ácido láctico y ácido acético en proporciones equilibradas para mejorar el proceso de fermentación.

Esto permite conservar el material vegetativo, ya que el pH se mantiene entre 3.8 y 5. La disminución del pH es ocasionada por el ácido láctico, el cual ayuda a inhibir el crecimiento de microorganismos aeróbicos que pueden provocar la descomposición del material vegetativo (Molina *et al.*, 2004).

En el ensilado, es importante considerar el tamaño de las partículas durante el proceso, ya que, si las partículas son demasiado pequeñas, el proceso de rumia adecuado se ve comprometido, lo que a su vez disminuye la producción de saliva y altera el pH en el rumen, lo que puede resultar en acidosis en el ganado bovino (Kononoff *et al.*, 2003). Se ha demostrado que el contenido de Fibra Neutra Detergente (FND), la digestibilidad y el tamaño de partícula del ensilaje tienen un impacto significativo en la actividad de la rumia y en el consumo de materia seca (CMS) en los rumiantes. Además, es importante destacar que los forrajes con una mayor concentración de Fibra Detergente Neutra (FDN) o con partículas más grandes requieren más tiempo para ser consumidos (Grant y Ferraretto, 2018).

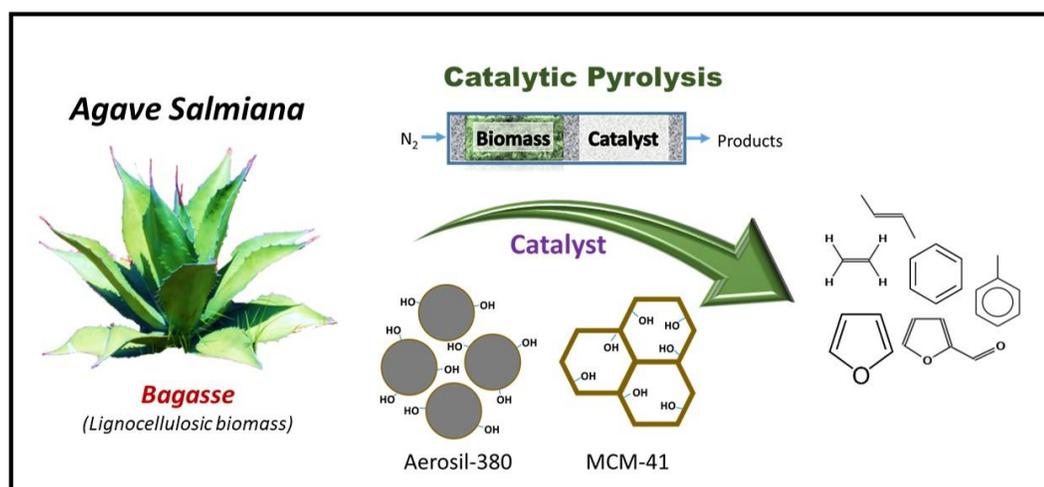
En el procesamiento del maguey se han diseñado equipos especiales para abordar sus características particulares. Las pencas de maguey, con un grosor que puede alcanzar los 15 cm, junto con su alto contenido de lignina y fibra, requieren un corte homogéneo y un tamaño de partícula adecuado para su procesamiento (Durán-García *et al.*, 2021).

## **2.10. Ensilado de maguey**

El bagazo de Agave es un subproducto generado principalmente por las industrias de bebidas alcohólicas mexicanas, especialmente en la producción de tequila y mezcal. Se trata de la fibra remanente que queda una vez que los tallos de Agave han sido cocidos, triturados y sometidos a extracción de agua dulce. Aproximadamente, representa alrededor del 40% del peso total del Agave molido, considerando una base de peso en húmedo (Cohuo, 2018).

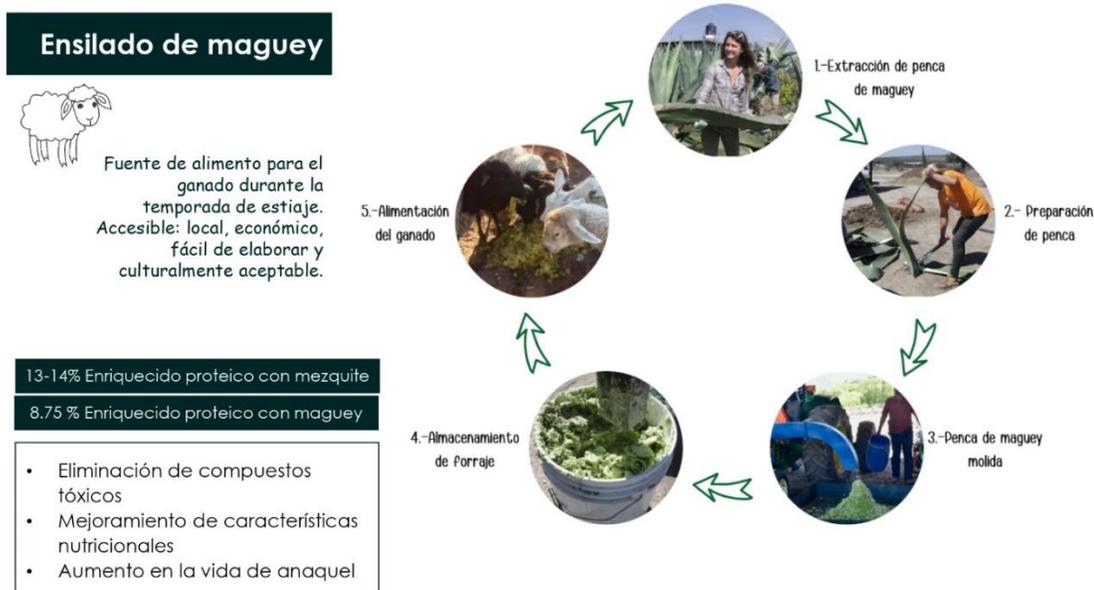
El bagazo de *Agave* presenta diversas posibilidades de uso, entre ellas su aprovechamiento como alimento para el ganado. Durante el proceso de ensilado de los residuos o pencas del maguey, se puede lograr la descomposición parcial o total de los componentes de celulosa y hemicelulosa de la biomasa a temperaturas cercanas a 400 °C (Santiago-Martínez *et al.*, 2023).

Según el análisis de digestibilidad *in vitro* y la producción de energía (AGV), se ha observado que los bagazos de *Agave salmiana*, *A. tequilana* y *A. weberi* poseen un potencial prometedor para satisfacer los requisitos de mantenimiento de los rumiantes (Delgadillo-Ruiz *et al.*, 2015).



**Figura 9.**Proceso de pirolisis del bagazo de *Agave salmiana*.

El ensilado de las pencas de maguey, un proceso en el cual se cortan las pencas maduras de la planta y se fermentan en un ambiente sin oxígeno, resulta en un producto rico en carbohidratos y fibra (Frías, 2020). Este ensilado puede desempeñar un papel fundamental como fuente de alimento para el ganado durante épocas de escasez de pasto o forraje. Además, el proceso de ensilado contribuye a mejorar la digestibilidad y palatabilidad del material, haciéndolo aún más beneficioso para su uso como alimento animal (Reyes-Castro *et al.*, 2022).



**Figura 10.** Proceso de ensilaje de pencas de maguey

Fuente: Tomado de [viaorganica.org](http://viaorganica.org)

Descripción del proceso de ensilaje:

1. Comienza con la cosecha y el corte de las pencas de maguey.
2. Las pencas se cortan en pedazos pequeños con ayuda de un molino con fuerza del tractor agrícola.
3. Se colocan en una estructura de almacenamiento, como un silo, en capas. Entre cada capa se agrega un aditivo, que es una mezcla de bacterias ácido lácticas que ayuda a iniciar y mantener el proceso de fermentación.
4. Una vez que se ha llenado el silo con las pencas y el inoculante, se sella herméticamente para evitar la entrada de oxígeno, lo que permitiría la proliferación de bacterias no deseadas y la degradación del material.
5. El proceso de fermentación comienza con la acción de las bacterias ácidos lácticos, que convierten los azúcares presentes en las pencas de maguey en ácido láctico y otros ácidos orgánicos. Estos ácidos disminuyen el pH del ambiente y detienen el crecimiento de bacterias dañinas. El proceso de fermentación también genera calor, lo que puede elevar la temperatura dentro del silo.
6. Después de algunas semanas de fermentación, el ensilado de pencas de maguey está listo para su uso como alimento para animales.

Para mejorar el valor nutricional de ensilaje de maguey se ha recomendado la adición de urea al 1% con el fin de aumentar el contenido proteico (García *et al.*, 2021), así como un periodo de almacenamiento de 30 días para completar la fermentación del ensilaje del maguey (Reyes-Castro *et al.*, 2022).

La composición química del ensilado de hojas de Agave de varias especies, basada en análisis bromatológicos realizados en diferentes estudios. Se ha observado un contenido elevado de proteína cruda (PC) en todos los casos (31.6%), así como una alta digestibilidad in vitro de la materia orgánica (75%) (Mata *et al.*, 2011).

**Cuadro 3.** Composición química (% en base a MS) del ensilado de hojas de Agaves

Componente	<i>Agave tequilana weber</i>	<i>Agave salmiana</i>
MS	22.6	24
PC	31.6	30.8
CEN	13.1	20.5
MO	86.9	91.4
FC	-----	22
EE	1.3	-----
DIVMS	75	67.43 - 82.74

Fuente: Adaptado de Mata *et al.* (2011); Reyes-Castro *et al.* (2022).

## **2.11. Especies de Agave usadas como alimento para el ganado**

Existen varias especies de Agave que se han utilizado como forraje para el ganado. Algunas de las especies más comúnmente utilizadas son:

### **2.11.1. *Agave americana***

Esta especie es originaria de México y del suroeste de Estados Unidos. Además de ser comúnmente utilizado para la producción de fibra y aguamiel, también puede emplearse como forraje, y se le considera una fuente complementaria de agua adecuada para los rumiantes (Maduro *et al.*, 2023).

### **2.11.2. *Agave salmiana***

*Agave salmiana*, comúnmente conocida como maguey pulquero o Agave gigante es originaria de México, se distribuye principalmente norte del país y en el Altiplano central (García-Mendoza, 2011), se ha utilizado principalmente como materia prima para la elaboración de bebidas fermentadas (pulque), y en la preparación de alimentos.

Se caracteriza por su gran tamaño, la roseta puede alcanzar un diámetro de 5m en su etapa adulta, y desarrollar entre 30 a 70 hojas (pencas), de hasta 2 m de largo y 35 cm de ancho en la base (Cruz, 2019). Además, su productividad respecto otras especies del género Agave es sobresaliente, en plantaciones con manejo agronómico con densidades de 1400 a 2000 plantas/ha se registra una productividad de 800 ton/ha (Frías,2020).

*Agave Salmiana* se ha convertido en una de las especies más estudiadas en cuanto a los beneficios que aporta su uso para alimentar a los rumiantes como las cabras (Zamudio *et al.*, 2009), su valor nutrimental y su disponibilidad la hacen una opción viable como forraje alternativo, de manera empírica ganaderos del estado de Tlaxcala han utilizado los residuos de maguey pulquero como forraje en la alimentación de ovinos y bovinos (Álvarez *et al.*, 2018).

### **2.11.3. *Agave tequilana***

Conocido como el Agave azul, esta especie es originaria de México y es cultivada principalmente para la producción de tequila. Sin embargo, el bagazo y sus hojas también pueden ser utilizadas como forraje. En el estado de Tamaulipas en plantaciones bajo irrigación la productividad de las plantas aumentó significativamente, llegó a registrarse una biomasa total 491 toneladas por hectárea, considerando una densidad de siembra de 3 300 plantas por hectárea, de esta biomasa, 236.6 toneladas por hectárea estuvieron formadas por las hojas (Zuñiga *et al.*, 2018), lo que evidencia el potencial forrajero de esta especie.

El ensilado de hojas de *Agave tequilana* Weber cv azul, se ha sido utilizado para alimentar corderos. Al agregar un 2% de urea en el ensilaje, se ha observado un incremento en el contenido de proteína cruda (PC) y una mejora en la digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS), lo que mejora la calidad del alimento. De esta manera, el ensilado de hojas de *A. tequilana* puede ser considerado como una alternativa viable de alimento para la engorda de corderos (Reyes-Castro *et al.*, 2022).

### **2.11.4. *Agave fourcroydes***

También conocido como henequén o sisal, esta especie es originaria de México y América Central. Es cultivado principalmente para la producción de fibra, de la planta solo se aprovecha en fibra 4 %, lo que genera grandes volúmenes de bagazo húmedo, con alta carga orgánica, obteniéndose como promedio nueve toneladas de residuo por tonelada de fibra procesada (Gutiérrez *et al.*, 2018). Sus hojas también pueden ser utilizadas como forraje, como el caso de uso como aditivo zootécnico para mejorar el desempeño y la salud de los conejos (Martínez *et al.*, 2021).

### III. CONCLUSIONES

En conclusión, la investigación científica ha demostrado que el Agave tiene un potencial como alimento para el ganado debido a su contenido nutricional. Es una fuente rica en fibra dietética, proteínas, minerales y vitaminas, lo cual contribuye a satisfacer los requerimientos nutricionales de los animales rumiantes. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la composición nutricional del Agave puede variar según la especie, las condiciones de cultivo y los métodos de procesamiento utilizados. Para aprovechar al máximo el Agave como forraje, se recomienda contar con la asesoría de un nutricionista especializado en ganado.

De acuerdo con las recomendaciones de un nutricionista especializado, se puede lograr una utilización óptima del Agave como fuente de alimento, lo cual contribuirá al bienestar y rendimiento del ganado. La investigación continúa desempeñando un papel importante en la comprensión del potencial del Agave y su aplicación efectiva en la alimentación del ganado, en beneficio de la industria pecuaria.

### IV. LITERATURA CITADA

**Aazami**, M. H., Tahmasbi, A. M., Ghaffari, M. H., Naserian, A. A., Valizadeh, R., y Ghaffari, A. H. (2013). Effects of saponins on rumen fermentation, nutrients digestibility, performance, and plasma metabolites in sheep and goat kids. *Annual Research & Review in Biology*, 596-607.

**Aguado**, L. O., Fereres Castiel, A., y Viñuela Sandoval, E. (2015). La polinización de las plantas. En *Guía de campo de los polinizadores de España*, Ed.; Mundi-Prensa: Madrid, España, 2017, 1-6.

- Alducin-Martínez, C., Ruiz, M., Jiménez-Barrón, O., Aguirre-Planter, E., Gasca-Pineda, J., Eguiarte, L. E., y Medellín, R. A. (2023).** Uses, Knowledge and Extinction Risk Faced by *Agave* Species in Mexico. *Plants*, 12(1), 124.
- Álvarez, D. M.C., García, M. E., Suárez, E. J., Luna, C. M., y Rodríguez, A. M. (2018).** Conocimiento tradicional, cultivo y aprovechamiento del maguey pulquero en los municipios de Puebla y Tlaxcala. *Polibotánica*, (45), 205-222.
- Álvarez-Fuentes, G., García-López, J. C., Pinos-Rodríguez, J. M., Jasso-Pineda, Y., Tristán-Patiño, F. M., y González-Garduño, R. (2015).** Maguey (*Agave spp.*) silage production with either alfalfa or mesquite pod meal as protein sources. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 24(1), 3714-3721.
- Arámbula, L. T. (2005).** Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 4(2), 17-21.
- Aranibar, T. G. M. (2017).** Efecto inhibitorio de la saponina de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) en la flora fúngica natural e inducida de *Penicillium digitatum* en naranjas (*Citrus sinensis*).
- Bautista, J. A., y Smit, M. A. (2012).** Sustentabilidad y agricultura en la " región del mezcal" de Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(1), 5-20.
- Bautista-Montes, E., Hernández-Soriano, L., y Simpson, J. (2022).** Advances in the micropropagation and genetic transformation of *Agave* species. *Plants*, 11(13), 1757.
- Bergsten, S. J., y Stewart, J. R. (2014).** Measurement of the influence of low water availability on the productivity of *Agave weberi* cultivated under controlled irrigation. *Canadian Journal of Plant Science*, 94(2), 439-444.
- Bewley, J. D., y Black, M. (2012).** Physiology and biochemistry of seeds in relation to germination: volume 2: viability, dormancy, and environmental control. Springer Science & Business Media.

- Bocco**, G., Orozco, R. Q., Alvarez, L. A., Solís, B., y Dobler M. C. (2021). El estudio del impacto de la sequía en pequeñas comunidades rurales de México: Una revisión de la bibliografía.
- Castillo-Lopez**, E., y Domínguez-Ordóñez, M. G. (2019). Factores que afectan la composición microbiana ruminal y métodos para determinar el rendimiento de la proteína microbiana. Revisión. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 10(1), 120-148.
- Castro-Hernández**, H., Domínguez, V. I. A., Morales, A., E., y Huerta, B. M. (2017). Composición química, contenido mineral y digestibilidad in vitro de raigrás (*Lolium perenne*) según intervalo de corte y época de crecimiento. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 8(2), 201-210.
- Castro-Rivera**, R. (2015). Evaluación de ensilados de pencas de magueyes mezcaleros de Oaxaca. *Proyectos de Investigación 2015 (SIP-IPN)*.
- Cavallotti**, V. B. A. (2014). Ganadería bovina de carne y leche. Problemática y alternativas. *El cotidiano*, (188), 95-101.
- Cen-Cen**, E. R., Gómez-Merino, F., y Martínez-Hernández, A. (2015). Tolerancia de *Agave tequilana* a altas concentraciones de cationes metálicos divalentes. *Polibotánica*, (40), 163-182.
- Centty-Rodríguez**, M. N. (2022). Tesis para optar el Grado Académico de Maestra en Sistemas de Gestión de la Calidad e Inocuidad de la Industria Alimentaria. Saponina en la calidad nutricional, compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de quinuas (*Chenopodium quinoa*).
- Chaves** de Souza S, Vasconcelos, C. J. J., Cordeiro, R. J. P., Alves, I., Cavalcanti-dos Santos R., y Maria-de Lima, L. (2018) Genetic divergence in *Agave* accessions through ISSR markers and phenotypic traits. *African Journal of Agricultural Research* 13: 526–533,

**Cohuo**, M. S. C. P. (2018). Obtención y modificación de nanocristales de celulosa de residuos de Agave Tequilana Weber para la producción de nanorefuerzos para Poli (ácido láctico). *Mérida, Yucatán, México*.

**CONABIO**, (2022). Naturalista. Disponible <https://www.naturalista.mx/home>

**CONAGUA**, SMN. Monitor de sequía en México. Servicio Meteorológico Nacional.

Recuperado el 15 mayo 2023 de:

<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>

**CONAZA**. (2021). Lucha contra la desertificación y la sequía

**Cruz**, V. S. T. (2019). Crecimiento y fisiología de maguey pulquero (*Agave salmiana Otto ex Salm-Dyck*) obtenido por semilla.

**Cuevas-Reyes**, V., y **Rosales-Nieto**, C. (2018). Caracterización del sistema bovino doble propósito en el noroeste de México: productores, recursos y problemática. *Revista MVZ Córdoba*, 23(1), 2018. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1240>

**Davis**, S. C. (2022). Agave americana: Characteristics and Potential Breeding Priorities. *Plants*, 11(17), 2305.

**De la Rosa**, T. A., y **Noriega**, M. S. J. (2023). Jardín botánico de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán: centro de conservación de polinizadores y visitantes florales en el norte del valle de México. *Herreriana*, 5(1), 21-26.

**Delgadillo**, R. L., **Bañuelos**, V. R., **Esparza**, I. E. L., **Gutiérrez**, B. H., **Cabral**, A.F. J., y **Muro**, R. A. (2015). Evaluación del perfil de nutrientes de bagazo de Agave como alternativa de alimento para rumiantes. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(SPE11), 2099-2103.

**Delgado-Aceves**, L., **Portillo**, L., **Folgado**, R. New approaches for micropropagation and cryopreservation of *Agave peacockii*, an endangered species. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 150, 85–95 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02246-z>

- Duran-García, H. M., Pulido, D. J. L., Ávila, G. A., Vasilevich K., Y., y Vladimirovna K.L.** (2021). Diseño de una picadora de pencas de maguey y nopal. *Acta universitaria*, 31.
- Eguiarte, L. E y Souza, V.** (2007). Historia natural del *Agave* y sus parientes: Evolución y Ecología. En: En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros *Agaves*. CICY-CONABIOINE. México
- Eguiarte, L. E., Jiménez, B. O. A., Aguirre-Planter, E., Scheinvar, E., Gámez, N., Gasca-Pineda, J., y Souza, V.** (2021). Evolutionary ecology of *Agave*: distribution patterns, phylogeny, and coevolution (an homage to Howard S. Gentry). *American Journal of Botany*, 108(2), 216-235.
- Eguiarte, L. E., Souza, V., y Silva-Montellano, A.** (2000). Evolución de la familia *Agavaceae*: filogenia, biología reproductiva y genética de poblaciones. *Botanical Sciences*, (66), 131-150
- Escamilla-Treviño, L. L.** (2012). Potential of plants from the genus *Agave* as bioenergy crops. *Bioenergy Research*, 5, 1-9.
- Eslava- Velásquez, A. G., y Gómez, B. L. F.** (2012). Evaluación de la selectividad y palatabilidad de especies arbustivas forrajeras por bovinos en los Llanos Orientales de Colombia.
- Esparza-Ibarra, E. L., Violante-González, S. J., Monks, J. C., Iñiguez, C., Araujo-Andrade y Rossel-Kipping, E. D.** (2015). Los *Agaves* mezcaleros del Altiplano Potosino y Zacatecano. *Estudios en Biodiversidad. University of Nebraska-Lincoln*. 227-245 pp.
- Espinosa-Andrews, H., Urias-Silvas, J. E., y Morales-Hernandez, N.** (2021). The role of *Agave* fructans in health and food applications: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 585-598.
- Fernandez, A. M. A., Velasco, I. M., Aragón, C. A., Martínez-Martínez, S. Y., y Norman-Mondragon, T. H.** (2020). Morphogenetic response of two *Agave* species regenerated in vitro. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(2).

- Figueredo-Urbina, C. J., Álvarez-Ríos, G. D., García-Montes, M. A., y Octavio-Aguilar, P.** (2021). Morphological and genetic diversity of traditional varieties of Agave in Hidalgo State, Mexico. *Plos one*, 16(7), e0254376.
- Frías, H. J. T.** (2020). El proyecto billón de agaves. *Regeneration International*. Recuperado de: <https://regenerationinternational.org/wp-content/uploads/Present-Agaves-website.pdf>
- García-Mendoza, A. J.** (2011). *Agavaceae*. Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F. 88. 1-95.
- García, M.A. J.** (2007). Los Agaves de México. *Ciencias* 87: 14-23.
- García, P., Reyes, S., Frías, J., Arredondo, M., Gutiérrez, A. y Gutiérrez, D.** (2021). Evaluación nutricional del ensilado de *Agave salmiana* y *Agave americana* enriquecidos con urea. AIDA.
- García-Herrera, E., Méndez-Gallegos, S. y Talavera-Magaña, D.** (2010). El género *Agave* spp. En México principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica. RESPYN. Edición especial. 5. 109-127.
- García-Mendoza, A.** (2002). Distribution of *Agave* (*Agavaceae*) in México. México. *Cactus and Succulent Journal*. 74:177-186.
- García-Mendoza, A. J., Martínez, I. S. F. y Sandoval, G. D.** (2019). Cuatro especies nuevas de *Agave* (*Asparagaceae, Agavoideae*) del sur de México. *Acta Botanica Mexicana*. 126
- García-Moya, E., Romero-Manzanares, A., y Nobel, P. S.** (2011). Highlights for *Agave* productivity. *Gcb Bioenergy*, 3(1), 4-14.
- García-Parra, M. Á., Plazas-Leguizamón, N. Z., Rodríguez, D. C. C., Torrado, S. C. F., y Parra, J. D.** (2018). Descripción de las saponinas en quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) en relación con el suelo y el clima: una revisión. *Informador Técnico*, 82(2), 241-249.

- Gastelum**, M. F. I., Cantú, A. C. M., Uvalle, S. J. I., Lozano, C. E. A., Serna, L. R., y González, S. F. N. (2020). Importancia del matorral desértico micrófilo para el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus Mearns*, 1898) en Coahuila. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 11(62), 136-156.
- Gentry**, A. H. (1982). Patterns of neotropical plant species diversity. *Evolutionary Biology*: Volume 15, 1-84.
- Gentry**, H. S. (2004). *Agaves of Continental North America*. Tucson, AZ, EE.UU.: University of Arizona Press, 670 pp.
- Gómez-Ruiz**, E. P. (2020). Murciélagos polinizadores del noreste de México. *Biología y Sociedad*, 3(1), 35-43.
- Gómez-Aíza**, L., y Zuria, I. (2010). Aves visitantes a las flores del maguey (*Agave salmiana*) en una zona urbana del centro de México. *Ornitología Neotropical*, 21, 17-30.
- Gómez-Ruiz**, E. P., Jimenez, C., Flores-Maldonado, J. J., Lacher, T. E., y Packard, J. M. (2015). Conservación de murciélagos nectarívoros (Phyllostomidae: Glossophagini) en riesgo en Coahuila y Nuevo León. *Therya*, 6(1), 89-102.
- González**, R. L. (2022). Caracterización genética y fenotípica de tres taxones de *Agave salmiana* (*Asparagaceae*) de la región poblano-veracruzana.
- Grant**, R. J., y Ferraretto, L. F. (2018). Silage review: Silage feeding management: Silage characteristics and dairy cow feeding behavior. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 4111-4121.
- Hernández**, I. T. (2022). Revalorización de lignina funcionalizada con potencial aplicación en tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados.
- Honorato-Salazar**, J. A., y Sadhukhan, J. (2020). Annual biomass variation of agriculture crops and forestry residues, and seasonality of crop residues for energy production in Mexico. *Food and Bioproducts Processing*, 119, 1-19.

- Honorato-Salazar, J. A., Aburto, J., y Amezcua-Allieri, M. A. (2021).** *Agave and Opuntia* species as sustainable feedstocks for bioenergy and byproducts. *Sustainability*, 13(21), 12263.
- Hulle, A., Kadole, P., y Katkar, P. (2015).** *Agave Americana* leaf fibers. *Fibers*, 3(1), 64-75.
- Juárez-Flores, B. I., Ortiz, P. M. D., Godínez-Hernández, C. I., Becerra, J. J., y Aguirre, R. J. R. (2016).** Extraction and characterization of *Agave salmiana Otto ex Salm-Dyck* fructans. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(1), 59-72.
- Jurado-Guerra, P., Velázquez-Martínez, M., Sánchez, G. R. A., Álvarez-Holguín, A., Domínguez, M. P. A., Gutiérrez-Luna, R., Garza-Cedillo, R. D., Luna-Luna, M., y Chávez-Ruiz, M. G. (2021).** Los pastizales y matorrales de zonas áridas y semiáridas de México: Estatus actual, retos y perspectivas. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 12(Supl. 3), 261-285. Epub 24 de enero de 2022.h
- Kellems, R. O., y Church, D. C. (2002).** *Livestock feeds and feeding* (No. 04; SF95, K4 2002.). Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Kononoff, P. J., Heinrichs, A. J., y Lehman, H. A. (2003).** The effect of corn silage particle size on eating behavior, chewing activities, and rumen fermentation in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 86(10), 3343-3353.
- Lobato-Sánchez, R. (2016).** El monitor de la sequía en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5), 197-211.
- Maduro-Dias, C. S., Nunes, H., Vouzela, C., Madruga, J., y Borba, A. (2023).** In Vitro Rumen Fermentation Kinetics Determination and Nutritional Evaluation of Several Non-Conventional Plants with Potential for Ruminant Feeding. *Fermentation*, 9(5), 416.
- Martin, M. P., Peters, C. M., Palmer, M. I., y Illsley, C. (2011).** Effect of habitat and grazing on the regeneration of wild *Agave cupreata* in Guerrero, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 2628(8), 1443-1451.

- Martínez-López, J. R.** (2009). Estimación de las características biológicas y químicas en el volumen radical de nopal (*Opuntia spp.*) y maguey (*Agave spp.*), y evaluaciones forrajeras. Tesis doctoral, UANL.
- Martínez, Y., Iser, M., Valdivié, M., Galindo, J., y Sánchez, D.** (2021). Suplementación con harina de *Agave fourcroydes* en el crecimiento, características de la canal, peso de los órganos, morfometría intestinal y bioquímica sanguínea en conejos de engorda. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*
- Martínez, Y., Iser, M., Valdivié, M., Rosales, M., Albarrán, E., y Sánchez, D.** (2022). Dietary Supplementation with *Agave tequilana* (Weber Var. Blue) Stem Powder Improves the Performance and Intestinal Integrity of Broiler Rabbits. *Animals*, 12(9), 1117.
- Mata, E., M. A., Torres-C., M. G., Hernández-I., G., Cobos-P., M. A., Rodríguez-S., G., Luevano-L., A., Guzmán-G., D. R., y Gámez-A., M. M.** (2011). Degradación in vitro DE *Agave mapisaga*, *Agave salmiana var. salmiana* Y *Agave salmiana var. ferox*. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, X (2), 123-129.
- Mellado, M., Garcia, J. E., y Pittroff, W.** (2008). Rough Agave flowers as a potential feed resource for growing goats. *Rangeland ecology & management*, 61(6), 640-646.
- Molina, A. M. G., Roa, L. B., Alzate, S. R., León, J. G. S. D., y Arango, A. F. B.** (2004). Ensilaje como fuente de alimentación para el ganado. *Revista lasallista de investigación*, 1(1), 66-71.
- Mora-López, J. L., Reyes-Agüero, J. A., Flores-Flores, J. L., Peña-Valdivia, C. B., y Aguirre-Rivera, J. R.** (2011). Variación morfológica y humanización de la sección *Salmianae* del género *Agave*. *Agrociencia*, 45(4), 465-477.
- Nasri, S., y Salem, H. B.** (2012). Effect of oral administration of *Agave americana* or Quillaja saponaria extracts on digestion and growth of Barbarine female lamb. *Livestock Science*, 147(1-3), 59-65.

- NRC.** National Research Council (US). Committee on Nutrient Requirements of Small Ruminants, National Research Council, Committee on the Nutrient Requirements of Small Ruminants, Board on Agriculture, Division on Earth, & Life Studies. (2007). Nutrient requirements of small ruminants: sheep, goats, cervids, and new world camelids.
- Nava-Rodríguez, B. O.** (2014). Diversidad genética de maguey pulquero (*Agave salmiana* y *A mapisaga Trel*) y uso de tecnologías agroecológicas.
- Niechayev, N. A., Pereira, P. N., y Cushman, J. C.** (2019). Understanding trait diversity associated with crassulacean acid metabolism (CAM). *Current Opinion in Plant Biology*, 49, 74-85
- Nobel, P. S.** (1977). Water relations of flowering of *Agave deserti*. *Botanical Gazette*, 138(1), 1-6.
- Nobel, P. S.** (2003). Environmental biology of Agaves and cacti. Cambridge University Press.
- Nobel, P. S.** (2010). Sabiduría del desierto/Agaves y cactus: CO<sub>2</sub>, agua, cambio climático. Nueva York, NY: iUniverse.
- Noguera, R. R., y Ochoa, S. L. P.** (2016). Cálculo de sales minerales para vacunos en pastoreo. Fondo Editorial Biogénesis, 1-29.
- Ober, H. K., y Steidl, R. J.** (2004). Foraging rates of *Leptonycteris curasoae* vary with characteristics of *Agave palmeri*. *The Southwestern Naturalist*, 49(1), 68-74.
- Owen, N. A., Fahy, K. F., y Griffiths, H.** (2016). "Crassulacean acid metabolism (CAM) offers sustainable bioenergy production and resilience to climate change" *GCB Bioenergy*: 8(4): 737-749.
- Pérez-Zavala, M. D. L., Hernández-Arzaba, J. C., Bideshi, D. K., y Barboza-Corona, J. E.** (2020). *Agave*: a natural renewable resource with multiple applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(15), 5324-5333.

- Pimienta**, B. E., Zañudo H. J., Nobel, P. S., y García, G. J. (2005). Respuesta fisiológica a factores ambientales del *Agave azul (Agave tequilana Weber)*. *Scientia-CUCBA*, 7(2), 85-97.
- Pinos-Rodríguez**, J. M., Zamudio, M., y González, S. S. (2008). The effect of plant age on the chemical composition of fresh and ensiled *Agave salmiana* leaves. *South African journal of animal Science*, 38(1), 43-50.
- Reyes-Castro**, S., Valencia-Posadas, M., Gutiérrez-Arenas, D. A., De la Luz Ruiz, G. M., Gutiérrez-Chávez, A. J., Isidró-Pérez, M. F., y Núñez-Palenius, H. G. (2022). Uso del ensilado de *Agave tequilana weber* cv. azul en la alimentación de ovinos en crecimiento. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(2), 2137-2148.
- Rocha**, M., Valera, A., y Eguiarte, L. E. (2005). Reproductive ecology of five sympatric *Agave Littaea (Agavaceae)* species in central Mexico. *American Journal of Botany*, 92(8), 1330-1341.
- Salinas-Bonillo**, M. J., Torres, G. M. T, Paniagua, M. M., Sánchez, M. M., y Cabello, J. (2023) Clonal mechanisms that matter in *Agave fourcroydes* and *A. sisalana* invasions in drylands: implications for their management. *Management of Biological Invasions* 14(1): 80–97
- Santiago-Martínez**, L., González-Falcón, C. I., Reyes-Hernández, J., Handy, B. E., y Cárdenas-Galindo, M. G. (2023). Improved Light Hydrocarbon, Furans, and Production from the Catalytic Assisted Pyrolysis of *Agave salmiana* Bagasse over Silica Mesoporous Catalysts. *Catalysts*, 13(3), 548.
- Saraiva**, A., Carrascosa, C., Ramos, F., Raheem, D., y Raposo, A. (2022). *Agave syrup*: chemical analysis and nutritional profile, applications in the food industry and health impacts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7022.

- Scheinvar** G.E. (2018). Filogeografía de *Agave lechuguilla* y patrones de distribución de *Agave* en México (Doctoral dissertation, INSTITUTO DE BIOLOGÍA).
- Schiller**, K., y **Bräutigam**, A. (2021). Engineering of crassulacean acid metabolism. *Annual review of plant biology*, 72, 77-103.
- SIAP**. (2022) Panorama Agroalimentario 2022.
- Sidana**, J., **Singh**, B., y **Sharma**, O. P. (2016). Saponins of *Agave*: Chemistry and bioactivity. *Phytochemistry*, 130, 22-46.
- Silos-Espino**, H., **Tovar-Robles**, C. L., **González-Cortés**, N., **Méndez-Gallegos**, S. J., y **Rossel-Kipping**, D. (2011). Estudio integral del maguey (*Agave salmiana*): propagación y valor nutricional. *Rev. Salud Pública y Nutrición*, 5, 75-82.
- Stewart**, J. R. (2015). *Agave* as a model CAM crop system for a warming and drying world. *Frontiers in plant science*, 6, 684.
- Thiede**, J. (2020). *Agave Agavaceae*. *Monocotyledons*, 21-311
- Villarreal-Espino**, O. A., **Plata-Pérez**, F. X., **Camacho-Ronquillo**, J. C., **Hernández-Hernández**, J. E., **Franco-Guerra**, F. J., **Aguilar-Ortega**, B., y **Mendoza-Martínez**, G. D. (2011). El Venado Cola Blanca en la mixteca poblana. *Therya*, 2(2), 103-110. [fecha de Consulta 11 de Mayo de 2023]. ISSN: Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=402336264002>
- Yang**, X., **Cushman**, J. C., **Borland**, A. M., **Edwards**, E. J., **Wullschleger**, S. D., **Tuskan**, G. A., ... y **Holtum**, J. A. (2015). A roadmap for research on crassulacean acid metabolism (CAM) to enhance sustainable food and bioenergy production in a hotter, drier world. *New Phytologist*, 207(3), 491-504.
- Zamudio**, D. M., **Pinos-Rodríguez**, J. M., **González**, S. S., **Robinson**, P. H., **García**, J. C., y **Montañez**, O. (2009). Effects of *Agave salmiana* *Otto Ex Salm-Dyck* silage as forage on ruminal fermentation and growth in goats. *Animal Feed Science and Technology*, 148(1), 1-11.

**Zomer**, R. J., A. Trabucco, D. A. Bossio, and L. V. Verchot. (2008). Climate change mitigation: a spatial analysis of global land suitability for clean development mechanism afforestation and reforestation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 126: 67– 80.

**Zúñiga**, E. L., Rosales, R. E., Yáñez, M. D. J., y Jacques, H. C. (2018). Características y productividad de una planta MAC, *Agave tequilana* desarrollada con fertigación en Tamaulipas, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(3), 553-564.

## V. ANEXO



Figura 11. Corte de las pencas de maguey



Figura 12. Proceso de ensilaje de pencas de maguey en depósitos de 20 litros



**Figura 13.** Producto final obtenido del proceso de ensilaje y alimentando cabras