

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

DIVISION DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE NUTRICIÓN ANIMAL



**CALIDAD Y EFECTO DE LA COBERTURA VEGETAL POR DISTURBIOS
(FUEGO)**

Por

LUCAS MARTINEZ LUIS ENRIQUE

TESIS

Presenta como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE NUTRICIÓN ANIMAL
CALIDAD Y EFECTO DE LA COBERTURA VEGETAL POR DISTURBIOS
(FUEGO)

Por

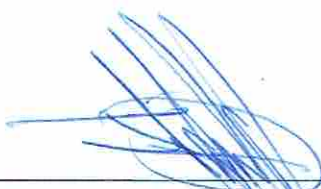
LUCAS MARTINEZ LUIS ENRIQUE

TESIS

Que se Somete a Consideración del H. Jurado Examinador como
Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA

Aprobada por:


Dr. Julio Cesar Espinoza Hernández
Director


M.C. Camelia Cruz Rodríguez
Codirector


Dr. Francisco Alonso Rodríguez Huerta
Asesor


Dra. Azucena Vargas Valero
Asesora externa


M.C. Pedro Carrillo López
Coordinador de la División de Ciencia Animal
Buenavista, Saltillo, Coahuila, México



Junio 2026

DERECHO DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es responsable directo y jura bajo protesta de decir la verdad que no se ha incurrido en el 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 (autoplagio); por comprar, robar, pedir prestado los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citas textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamiento de un autor sin citar; 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 el respectivo titular de los Derechos de Autor. Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa organización, medio público o privado.

Atentamente

Alma Terra Mater



Lucas Martinez Luis Enrique

Pasante

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio 2026

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO** por darme la oportunidad de realizar mi carrera profesional y brindarme todos los servicios. Gracias.

Al **Dr. Julio Cesar Espinoza Hernández**, por su confianza, apoyo y su amistad. Por darme la oportunidad de realizar la presente tesis, así como el tiempo dedicado para revisión de la misma. Gracias por todo.

A mi familia, por su apoyo incondicional. Siempre tuvieron las palabras adecuadas para darme motivación y fortaleza para seguir adelante. Gracias

A mi novia **Karla**, por su apoyo incondicional, por acompañarme en este proceso. Cada consejo, cada risa y momento compartido serán inolvidables.

Al resto de mis amigos y compañeros. A todos sin excepción, a los que compartieron conmigo el anhelo de ser I.A.Z. y sus experiencias en estos años de estudio.

DEDICATORIA

A mis padres, **Lorena Martinez Esiquio y Antonio Lucas Abarca**, por siempre apoyarme para culminar mi carrera profesional. Por darme todo lo que estaba en sus manos, son las personas que más quiero.

A mis abuelitos, **Carlota Abarca Parra y Placido Lucas Moreno (†)**. Por darme palabras de ánimo e inculcarme el seguir estudiando. Este logro es de ustedes. Gracias por todo.

A mis tíos, **Aurea, Adelina, Genaro y Arnoldo**, por siempre apoyarme en todo momento, hasta el día de hoy. Espero y siempre sigamos unidos como hasta ahora. Gracias.

A mis hermanos, **Marcos y Denisse**, gracias por estar a mi lado compartiendo cada momento juntos.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN	v
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. JUSTIFICACIÓN	2
3. OBJETIVOS	3
4. HIPOTESIS	3
5. REVISIÓN DE LITERATURA	4
5.1. Alteraciones en los componentes nutritivos	4
5.2. Efecto y factores críticos después de la quema	5
5.3. Principales modificaciones químicas	6
5.4. Efectos en el rebrote posterior	8
5.5. Alteración de las fracciones de la fibra	10
5.6. Incremento de carbohidratos no estructurales (CNE)	11
5.7. Cinética de degradabilidad ruminal	12
5.8. Sincronismo energético-proteico en el rumen	13
5.9. Ecofisiología del rebrote y removilización de reservas	15
5.10. Dinámica de la fase lítica y colonización bacteriana de la celulosa amorfa ..	16
6. MATERIALES Y METODOS	18
6.3. Método	19
6.4. Determinación de materia seca	19
6.5. Determinación de ceniza	20
6.6. Preparación de bolsas	22

6.7. Preparación de muestras	23
6.8. Preparación de solución	24
6.9. Preparación de incubadora	25
6.10. Obtención de líquido ruminal.....	26
6.11. Preparación de bolsas dentro de la solución y liquido ruminal	28
6.12. Temperatura y movimiento de la incubadora	28
6.13. Extracción de bolsas	29
6.14. Lavado y secado de bolsas	30
6.15. Pesado de bolsas post incubadora	31
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
7.1. Dinámica de Mineralización y Composición Bromatológica	38
7.2. Digestibilidad <i>In Vitro</i> de la Materia Seca (DIVMS) Post-Quema	39
7.3. Gramíneas.....	39
7.4. Arbustivas.....	39
7.5. Herbáceas	40
8. CONCLUSIÓN	42
9. LITERATURA CITADA.....	44

RESUMEN

La ganadería extensiva en las regiones áridas y semiáridas de México las cuales representan más del 60 % del territorio, encuentra su principal sustento en la vegetación nativa. Sin embargo, el valor nutricional de estas especies endémicas suele pasar desapercibido. Si bien es cierto que estas plantas han desarrollado mecanismos evolutivos admirables para resistir sequías y temperaturas extremas, tales como la lignificación y la producción de metabolitos secundarios, estas mismas defensas reducen su digestibilidad y el aprovechamiento energético dentro del rumen.

Frente a este panorama, la técnica de digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS) se consolida como una herramienta científica indispensable y éticamente responsable. Este método nos permite evaluar con gran precisión cómo se degradan los forrajes nativos, aportando el conocimiento técnico necesario para optimizar la nutrición del ganado. De este modo, podemos transicionar con éxito hacia una ganadería de precisión, capaz de adaptarse a las exigencias del cambio climático.

Palabras claves: Especies nativas, Gramíneas, forraje, *in vitro*, semi árido, arbustivas, degradabilidad ruminal.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.- Forraje quemado vs. no quemado	4
Cuadro 2. Las diferencias cuantitativas se pueden esquematizar en su comportamiento de fermentación ruminal.....	17
Cuadro 3. Composición bromatológica (% Cenizas y % Materia Orgánica) de grupos forrajeros en sitios quemados (SQ) y no quemados (SNQ).....	32
Cuadro 4. Digestibilidad <i>in vitro</i> de la materia seca (%) y desviación estándar de grupos forrajeros en Sitio No Quemado (SNQ).....	33
Cuadro 5. Digestibilidad <i>in vitro</i> de la materia seca (%) y desviación estándar de grupos forrajeros en sitio quemado (SNQ).	34
Cuadro 6. Efecto de la quema del sitio sobre la degradabilidad <i>in vitro</i> de gramíneas forrajeras.....	35
Cuadro 7. Análisis comparativo de la digestibilidad <i>in vitro</i> en arbustivas según la condición del área de muestreo.	36
Cuadro 8. Efecto de la quema sobre la degradabilidad <i>in vitro</i> y desviación estándar de vegetación herbácea.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Efectos del Fuego sobre la Calidad Forrajera y el Suelo	5
Figura 2.- biomasa vegetal y capa superficial.....	7
Figura 3.- relación molar de AGV en el rumen	9
Figura 4.- Mecanismo metabólico y de sincronización nutricional del rebrote post fuego.....	10

1. INTRODUCCIÓN

Las regiones áridas y semiáridas abarcan más del 60% del territorio mexicano, concentrándose principalmente en los estados del norte como Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango y Nuevo León (Arraíza & Alía, 2019). Este entorno extremo, con precipitaciones anuales inferiores a 400 mm y temperaturas que varían entre -5 °C en invierno y 45 °C en verano, tiene en la producción pecuaria extensiva su principal actividad socioeconómica. La dieta del sistema ganadero depende casi exclusivamente de la vegetación nativa, compuesta por pastizales naturales, matorrales xerófilos y matorrales micrófilo (Juárez et al., 2021).

Históricamente, se ha subestimado o ignorado el valor nutricional de estas especies nativas debido a la falta de caracterización biológica local (Minson, 2015). A diferencia de las especies introducidas o cultivadas, las plantas nativas han desarrollado mecanismos evolutivos de adaptación al estrés hídrico y térmico, como la lignificación, la acumulación de metabolitos secundarios (taninos y alcaloides) y modificaciones en sus cutículas. Estas adaptaciones, aunque aseguran la supervivencia de la planta en el desierto, alteran significativamente su degradabilidad y aprovechamiento energético por los microorganismos del rumen (Ramírez, 2022).

La técnica de digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS) es esencial en la nutrición animal contemporánea, ya que recrea con precisión las condiciones del tracto digestivo de los rumiantes sin incurrir en los costos y dilemas éticos de la experimentación in vivo (Moya & Cerrillo, 2020). Evaluar la cinética de degradación de los forrajes nativos permite descifrar su potencial nutritivo real, sentando las bases científicas para una ganadería de precisión adaptada al cambio climático (Van Soest et al., 1991).

2. JUSTIFICACIÓN

La formulación de suplementos y planes de manejo del agostadero en el norte de México se realiza empíricamente o con coeficientes de digestibilidad de forrajes nativos. Esto genera dos escenarios críticos: una sobreestimación de la energía disponible que causa pérdidas de peso del ganado durante las épocas de estiaje, o una sobresuplementación costosa en proteínas y energía.

Esta investigación se justifica al crear una base de datos dinámica sobre la cinética de degradación ruminal de especies forrajeras clave. Comprender la digestibilidad de los forrajes aporta información valiosa sobre la selectividad del pastoreo y la capacidad de carga animal de los agostaderos, evitando la degradación del suelo por sobrepastoreo. Económicamente, los resultados proporcionarán a los productores y a los investigadores herramientas analíticas para optimizar el uso de los recursos forrajeros, reduciendo la dependencia de insumos importados, disminuyendo los costos de producción y mejorando la huella de carbono de la carne producida en las zonas áridas del país.

3. OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el valor nutricional y la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS) de las principales especies forrajeras presente en el agostadero del norte de México.

Objetivos Específicos

Determinar el impacto en la calidad de los forrajes en el verano de las gramíneas nativas (*Bouteloua gracilis*, *Aristida adscensionis*) y arbustivas nativas (*Prosopis juliflora*, *Acacia farnesiana*).

Cuantificar la Digestibilidad *in vitro* de la Materia Seca (DIVMS) de cada especie nativa tras un periodo de incubación microbiana de 72 horas.

4. HIPOTESIS

Las gramíneas y arbustivas en la dieta de rumiantes durante la época de sequía estacional en el norte de México, afectara negativamente la Digestibilidad *in vitro* de la Materia Seca (DIVMS).

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1. Alteraciones en los componentes nutritivos

El fuego modifica drásticamente la composición química de las plantas forrajeras a través de los siguientes efectos, aumento de Proteína Cruda (PC), los rebrotes jóvenes post-fuego presentan concentraciones significativamente más altas de nitrógeno en comparación con las áreas no quemadas (Cerrillo *et al.*, 2016); Disminución de la fibra detrítica, el fuego consume la fibra cruda, celulosa y lignina acumulada del ciclo anterior, lo que incrementa de forma directa la digestibilidad de la materia seca; Para los Minerales las deposiciones de las cenizas en el suelo actúan como fertilizante, elevando temporalmente los niveles de fósforo, calcio, potasio y sodio en el tejido de las plantas; Mejora la gustocidad (palatabilidad) al eliminarse las estructuras muertas y punzantes (pajonales viejos), el forraje se vuelve más accesible y atractivo para el ganado, aumentando el consumo voluntario (González *et al.*, 2018).

Cuadro 1.- Forraje quemado vs. no quemado

Parámetro nutricional	Forraje post-fuego (rebrote joven)	Forraje sin quemar (Maduro/acumulado)
Proteína cruda (PC)	Mayor aporte de nitrógeno en la hoja	Madurez del tejido
Fibra (FDN y FDA)	Tejidos tiernos y celulares (bajo contenido de FDN y FDA)	Tallos lignificados y material seco
Digestibilidad	Fácil degradación ruminal	Mayor % de lignina
Accesibilidad	Estructura adecuada de la planta	Presencia de material seco y viejo

5.2. Efecto y factores críticos después de la quema

Ocurrido el fenómeno de la quema, el pico de mejor calidad forrajera ocurre durante los primeros tres a seis meses posteriores al fuego (Encinas *et al.*, 2016). Una vez que la planta avanza su estado fenológico y latencia, los valores nutricionales se asemejan a las zonas no quemadas. Si los incendios se presentan de manera muy frecuente (anual o sin control), tiende agotarse la materia orgánica del suelo, provocando la pérdida de nitrógeno por volatilización y disminuyendo la calidad de los nuevos rebrotes a mediano plazo (Rosero & Osorio, 2024). Si las quemas descontroladas con una alta intensidad destruyen los microorganismos benéficos del suelo, compactan la tierra y limitan la absorción de nutrientes por parte de las raíces (Mataix & Cerda, 2009).



Figura 1.- Efectos del Fuego sobre la Calidad Forrajera y del Suelo

Durante los primeros 90 días, el tejido foliar de los forrajes está compuesto casi exclusivamente por parénquima joven, cuyas paredes celulares primarias son elásticas y delgadas (Moore & Jung, 2001). No obstante, a medida que el rebrote avanza en edad fenológica, la planta requiere soporte mecánico para competir por la luz solar. En respuesta, se activa la ruta de los fenilpropanoides, lo que da inicio al depósito de paredes secundarias gruesas y al proceso de lignificación (Maceda, 2019). La deposición de lignina en la matriz de celulosa y hemicelulosa no solo reduce la digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS), sino que también genera un efecto de dilución: la acumulación excesiva de carbohidratos estructurales disminuye la proporción relativa de nitrógeno en el tejido total (Moore & Jung, 2001).

Cerca del sexto mes, las hojas nuevas alcanzan su madurez biológica y el dosel vegetal recupera su autonomía energética. La prioridad de la planta cambia de la "expansión foliar" a la "reproducción". Los fotoasimilados y los aminoácidos funcionales dejan de invertirse en la biomasa aérea y comienzan a ser redirigidos hacia la producción de estructuras florales (bajo valor forrajero) o son translocados de vuelta hacia las raíces para reconstituir las reservas utilizadas durante el rebrote, empobreciendo la calidad del forraje (Gomide *et al.*, 2002).

Si se utiliza el fuego controlado (quema prescrita) como herramienta de manejo, se debe de tener cuidado que no ingresen los animales inmediatamente de iniciar el rebrote. El sobrepastoreo en este punto debilita las reservas de las raíces y degrada el suelo. Por tanto, se debe permitir un periodo de descanso mínimo para que la planta desarrolle suficiente área foliar antes de someterla al pastoreo (Fuhlendorf *et al.*, 2009).

5.3. Principales modificaciones químicas

Pérdida de nitrógeno y azufre, estos elementos se volatilizan fácilmente con el calor y se pierden en la atmósfera en forma de gases. Las concentraciones de minerales

esenciales como el fósforo, potasio, calcio y magnesio no se queman; se acumulan y se concentran en las cenizas remanentes (Rosero & Osorio, 2024).

Existe una reducción de compuestos orgánicos como los carbohidratos, lípidos y proteínas solubles se destruyen o se desnaturalizan por las altas temperaturas. Así también, el incremento de cenizas por la combustión deja un residuo rico en sales minerales que modifica el pH del suelo de forma temporal (González *et al.*, 2004). Por otra parte, la destrucción de metabolitos secundarios por el fuego degrada compuestos de defensa de la planta, como los taninos y toxinas, reduciendo temporalmente su presencia en el rebrote (Close *et al.*, 2004).

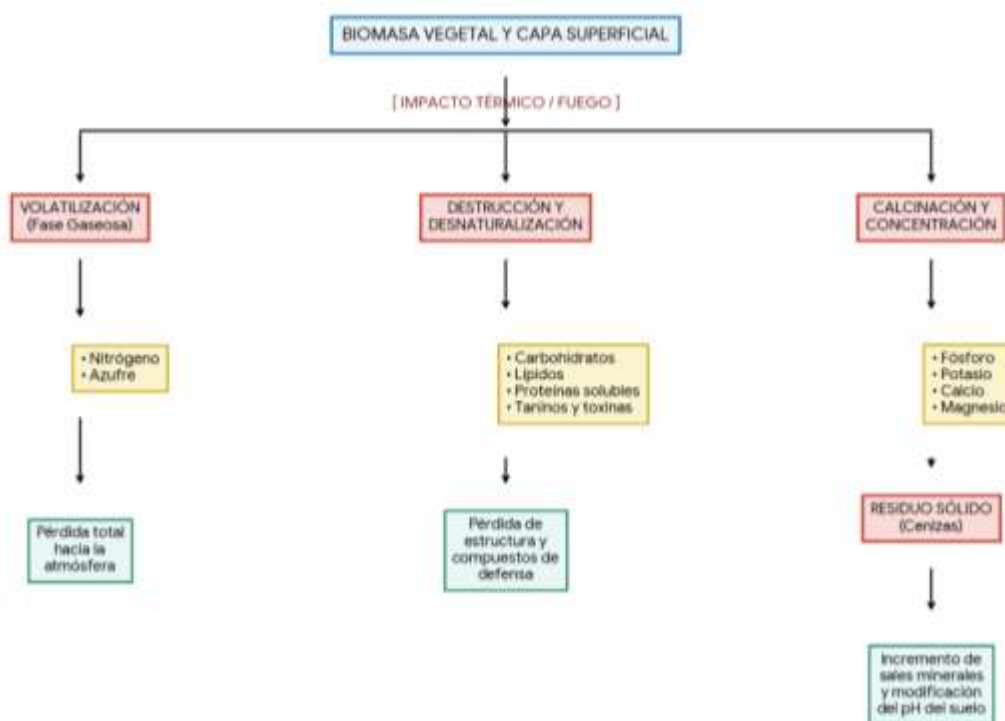


Figura 2.- biomasa vegetal y capa superficial

Al absorber el abundante nitrógeno posterior al fuego en un entorno edáfico donde el azufre se ha volatilizado, la relación molecular (N:S) dentro de las células vegetales aumenta drásticamente (mayor a 17:1) (Certini, 2005). Al no encontrarse suficiente azufre para sintetizar aminoácidos esenciales (cisteína y metionina), la translocación en los ribosomas se detiene (Saito, 2004). El nitrógeno sintetizado no

puede convertirse en proteína verdadera y se acumula en las vacuolas de las hojas tiernas como Nitrógeno No Proteico (nitratos libres). Esto incrementa el riesgo de toxicidad por nitratos en el ganado bovino o caprino que consume el rebrote tierno y palatable (Guilherme *et al.*, 2020).

Una vez que han perdido toda su biomasa aérea, las plantas perennes entran en un estado de emergencia fotosintética. En esta situación, toda la energía (ATP) generada y los carbonos disponibles provenientes de las reservas almacenadas en las raíces se emplean exclusivamente en la división celular, el alargamiento de las hojas y la síntesis fotosintética activa (Avice & Oury, 2016).

5.4. Efectos en el rebrote posterior

Las plantas que rebrotan después de un incendio presentan un mayor contenido de proteína cruda, ya que absorben los nutrientes presentes en la ceniza, lo que duplica temporalmente su nivel de nitrógeno. Además, al tratarse de tejidos jóvenes, el rebrote muestra una menor proporción de fibra, con niveles reducidos de lignina y celulosa, lo que incrementa drásticamente su digestibilidad para el ganado (Veen *et al.*, 2014).

El fuego provoca un rejuvenecimiento fenológico forzado en las plantas, lo que interrumpe su proceso biológico normal al detener la transición hacia la madurez de los tejidos. Como resultado, se inhibe la acumulación de fibra, y los tejidos jóvenes del rebrote forrajero suspenden temporalmente la formación de la pared celular (Allred *et al.*, 2011). En consecuencia, el material vegetal muestra una baja concentración de Fibra Detergente Neutro (FDN) -que incluye hemicelulosa, celulosa y lignina- y una alta proporción de contenido celular soluble, compuesto por proteínas, azúcares y lípidos (McGranahan *et al.*, 2012).

Además, se detiene el proceso de lignificación, lo que se traduce en la ausencia de Lignina Detergente Ácido (LDA). La LDA es un polímero fenólico tridimensional e

indigerible que normalmente evita la formación de enlaces cruzados con la celulosa (constituyendo la Fibra Detergente Ácido, FDA). Al no generarse esta lignina, desaparece la barrera física que habitualmente impide el acceso de las enzimas microbianas del rumen al núcleo de los carbohidratos estructurales (Akin, 2008).

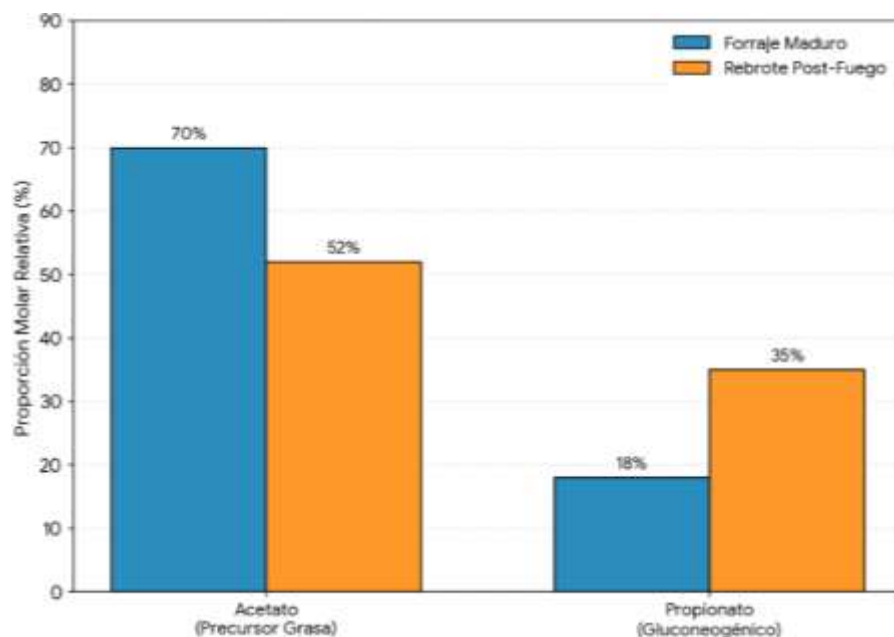


Figura 3.- relación molar de AGV en el rumen

En forrajes fibrosos, las bacterias celulolíticas (*Fibrobacter succinogenes*, *Ruminococcus albus*) tardan de 4 a 8 horas en colonizar los tejidos debido a la barrera de cera y lignina (Gul *et al.*, 2014). En el rebrote, la ausencia de estas barreras permite la adherencia bacteriana e hidrólisis enzimática casi inmediata. La rápida fermentación de los carbohidratos solubles y la celulosa deforma alteran la relación de AGV en el rumen (Cuadro 2). Disminuye proporcionalmente la producción de acetato (típico de fibras maduras) y se incrementa la síntesis de propionato. El propionato es absorbido por la pared ruminal y viaja al hígado, donde actúa como el principal sustrato gluconeogénico para el ganado, elevando la energía neta de lactancia o de ganancia de peso (Condori & Huanca, 2022). El exceso de nitrógeno en el rebrote se presenta principalmente como nitrógeno no

proteico (NNP) y proteínas altamente solubles. Si el rumen dispone al mismo tiempo de los carbohidratos de rápida fermentación de los tejidos jóvenes, las bacterias ruminales tienen la energía necesaria para capturar ese amonio libre y transformarlo en proteína microbial de alto valor biológico, evitando que el nitrógeno se pierda como urea en la orina (Krause *et al.*, 2003).

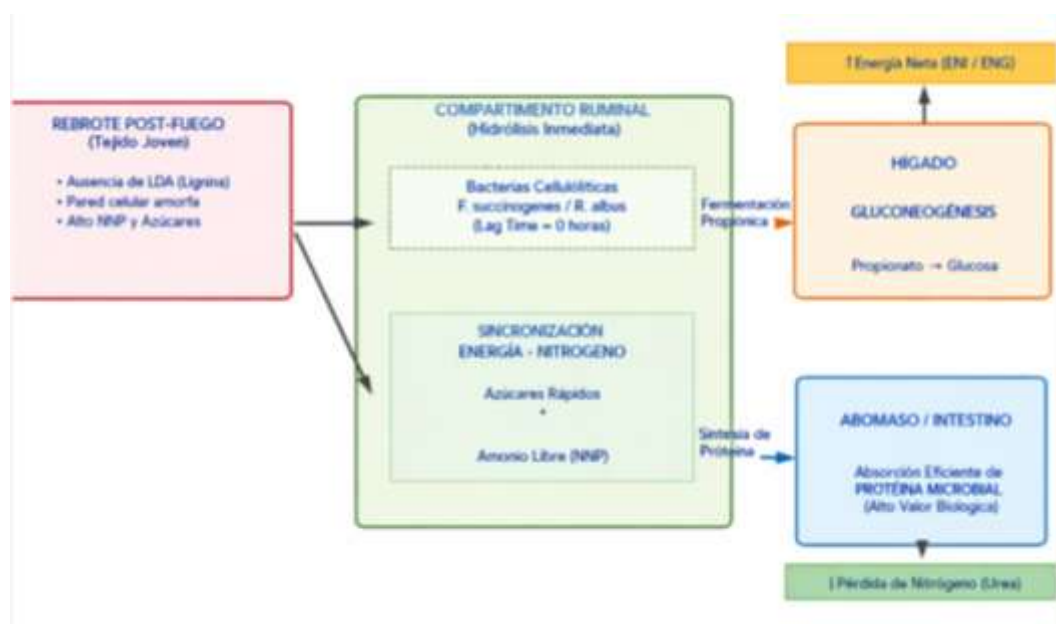


Figura 4.- Mecanismo metabólico y de sincronización nutricional del rebrote post fuego

5.5. Alteración de las fracciones de la fibra

El tejido vegetal joven presenta una composición de sus carbohidratos estructurales y una reducción de Lignina (fracción indigerible) es mínima en el rebrote, eliminando la barrera física que impide el ataque bacteriano. Así también, menor Fibra Detergente Neutro (FDN), favorece a disminuir la proporción total de la pared celular (celulosa, hemicelulosa y lignina), lo que reduce el efecto de llenado ruminal (Van Soest, 1994). Otro factor, es menor Fibra Detergente Ácido (FDA), por una reducción en la celulosa y lignina, el forraje requiere menos tiempo de suspensión para ser degradado (Mertens, 1994).

La FDN, que engloba la totalidad de la estructura de la pared celular (hemicelulosa, celulosa y lignina), presenta una reducción significativa durante las primeras semanas post-incendio (Spiess & Rittenhouse, 2024). En plantas forrajeras senescentes, la FDN suele representar entre el 65 % al 80 % de la materia seca total, limitando mecánicamente la capacidad de ingestión del animal (Mertens, 1987). En contraste, el rebrote post-fuego detiene de forma abrupta la transición ontogénica hacia la síntesis de la pared celular. Al verse interrumpida la elongación celular y priorizarse la división meristemática activa, los tejidos emergentes se componen predominantemente de pared celular primaria y citoplasma denso. Bromatológicamente, esto se traduce en una contracción de la FDN a niveles inferiores al 40-45 %. Como consecuencia directa, se expande la fracción correspondiente al contenido celular soluble (proteínas, carbohidratos no estructurales, lípidos y pectinas), el cual posee una buena digestibilidad aparente (Van Soest, 1991). La ausencia de LDA no solo favorece la digestibilidad intrínseca *in vitro* e *in vivo* del forraje a rangos óptimos, sino que disminuye drásticamente el tiempo de retención de las partículas del forraje en el retículo-rumen (Mertens, 1987). La digestibilidad del forraje y el desbloqueo de los receptores de la pared ruminal regulan la saciedad a nivel del sistema nervioso central, provocando un incremento significativo en el consumo voluntario de materia seca por parte del ganado (Spiess & Rittenhouse, 2024).

5.6. Incremento de carbohidratos no estructurales (CNE)

Las células tiernas poseen una mayor proporción de contenido celular (citoplasma) en relación con la pared celular, aumentando la concentración de azúcares solubles, almidones y pectinas. Estos compuestos son fermentados casi al 100 % por los microorganismos del rumen a una mayor velocidad (García & López, 2023). En relación al tejido vegetal maduro, el contenido celular es predominantemente debido a una gran vacuola central y una pared celular engrosada, lo que diluye los

componentes solubles del citoplasma. Por el contrario, las células meristemáticas y los tejidos tiernos del rebrote post-incendio presentan una elevada densidad citoplasmática y celular por unidad de superficie. A diferencia de los carbohidratos estructurales, cuya hidrólisis está limitada por la síntesis de enzimas fibrolíticas complejas, los CNE se caracterizan por una accesibilidad molecular inmediata (Sánchez & Torres, 2021).

Los microorganismos ruminales amilolíticos y sacarolíticos (*Streptococcus bovis*, *Ruminobacter amylophilus*, *Bacteroides rumenicola*) colonizan e hidrolizan estos sustratos sin necesidad de un periodo de adherencia prolongado (Ramírez & Castro, 2022). En dietas convencionales basadas en forrajes maduros, la degradación de la fibra es demasiado lenta para suministrar el ATP que las bacterias requieren para incorporar el amonio libre derivado de la digestión proteica. Esto provoca una acumulación de amonio ruminal, su posterior absorción a través de la pared del rumen y una pérdida energética neta en el hígado mediante el ciclo de la urea. En el rebrote post-incendio, la liberación coordinada y veloz de cadenas de carbono digeribles (CNE) y de nitrógeno soluble provee de manera simultánea el esqueleto de carbono (cetoácidos) y la energía metabólica celular necesarios (Fernández, 2024). Como consecuencia, se maximiza la eficiencia de síntesis de proteína microbial por kilogramo de materia orgánica fermentada, incrementando el flujo de aminoácidos de alto valor biológico hacia el abomaso y duodeno del hospedero (Morales & Villalobos, 2025).

5.7. Cinética de degradabilidad ruminal

La digestibilidad se mide a través de la tasa de degradación en el tiempo. Al aumentar la fracción soluble (a) la proporción de forraje que se degrada rápidamente en el rumen es significativamente mejor. La velocidad a la que las bacterias colonizan y fermentan la fracción potencialmente digerible aumenta debido a la alta porosidad de los tejidos jóvenes (Herrera & Benítez, 2024).

Así también, al aumentar la fracción soluble (a), la proporción de forraje que se degrada rápidamente en el rumen es significativamente mayor. Esto altera el gradiente osmótico ruminal e inicia una cascada metabólica positiva, donde los jugos e iones celulares (ricos en carbohidratos solubles y nitrógeno no proteico) quedan inmediatamente expuestos a las ectoenzimas de la microbiota ruminal libre en el líquido ruminal (Valenzuela, 2023). Esto elimina el gasto energético que las bacterias destinan comúnmente a la síntesis de complejos enzimáticos extracelulares para romper estructuras complejas, acelerando el inicio de la fase logarítmica del crecimiento microbiano (Suárez *et al.*, 2025).

Debido a la alta porosidad y solubilidad, la proporción real de materia seca que se digiere dentro del rumen se mantiene por encima del 75 %, incluso tasas de pasaje aceleradas. El alimento se fermenta a mayor velocidad debido a la permeabilidad de sus tejidos, donde el espacio físico del retículo-rumen se libera con rapidez (Cárdenas & Pardo, 2024). Esto disminuye la retención mecánica y desactiva los mecanorreceptores de distensión que inducen la saciedad a nivel del hipotálamo, desencadenando un incremento sostenido en el Consumo Voluntario de Materia Seca (CMS). Por lo tanto, el animal es metabólicamente capaz de ingerir más nutrientes por unidad de tiempo, mejorando la eficiencia de conversión biológica (Mendoza, 2023).

Las partículas reducen su tamaño por debajo del umbral crítico de escape microbiano (1.18 mm) en un lapso de tiempo reducido, acelerando la tasa de pasaje ruminal (k). El vaciado fisiológico del órgano digestivo mitiga la distensión interna de manera prematura (Ríos *et al.*, 2025).

5.8. Sincronismo energético-proteico en el rumen

El fuego mineraliza el suelo, provocando que el rebrote absorba altas cantidades de nitrógeno no proteico y aminoácidos libres (Ratnam *et al.*, 2022). Esta abundancia

estimula el crecimiento de las poblaciones de bacterias celulolíticas y amilolíticas. Por lo que la microbiota ruminal se multiplica rápidamente, optimizando la digestión de la dieta ingerida (McDonald *et al.*, 2022).

El paso del fuego induce una mineralización instantánea de la materia orgánica superficial del suelo (piromineralización), transformando las fracciones nitrogenadas complejas en formas inorgánicas altamente asimilables, predominantemente amonio (Certini, 2005). El sistema radicular remanente, impulsado por una alta presión de selección fisiológica y reservas energéticas subterráneas, absorbe masivamente este flujo de nutrientes (Turner *et al.*, 2007).

Debido a la velocidad del crecimiento morfogénico del rebrote, la tasa de absorción de nitrógeno supera temporalmente la capacidad de asimilación e incorporación en proteínas estructurales complejas. Como consecuencia, el tejido foliar joven acumula altas concentraciones de Nitrógeno No Proteico (NNP), nitratos y aminoácidos libres (Ratnam & Wilmshurst, 2022). Desde la perspectiva de la nutrición animal, esta alteración transforma el forraje en una fuente de nitrógeno de degradabilidad ruminal instantánea (Gómez *et al.*, 2023).

Al ser ingerido y masticado por el ganado, las uniones celulares del tejido tierno se rompen con facilidad, liberando el NNP y los aminoácidos libres directamente en el fluido ruminal. Las peptidasas y deaminasas bacterianas hidrolizan de forma casi inmediata estos componentes, elevando de manera significativa la concentración de amonio ruminal (Bach *et al.*, 2005).

La consecuencia directa de esta explosión demográfica bacteriana es un aumento en la capacidad enzimática total del compartimento ruminal. Al haber una mayor densidad de microorganismos por unidad de volumen, se incrementa la probabilidad de encuentro y fijación entre las enzimas bacterianas y las partículas de alimento remanentes en el rumen (Hess *et al.*, 2011)

Las bacterias celulolíticas remanentes, al estar nutricionalmente respaldadas por el nitrógeno del rebrote, pueden atacar con mayor agresividad otras porciones de fibra más complejas que el animal haya consumido (Van Soest, 1994).

5.9. Ecofisiología del rebrote y removilización de reservas

La capacidad de las plantas forrajeras nativas para restablecer su área foliar tras un disturbio drástico (fuego, pastoreo severo o sequía) depende de una respuesta coordinada a nivel fisiológico, bioquímico y morfológico. Al suprimirse el aparato fotosintético aéreo, la planta experimenta una transición metabólica crítica, pasa de una fase autótrofa (donde produce sus propios fotoasimilados) a una fase temporalmente heterótrofa (Donaghy & Fulkerson, 1998). Durante esta ventana fenológica, la supervivencia y la velocidad de emisión del rebrote están supeditadas a la disponibilidad y eficiencia de removilización de las reservas orgánicas almacenadas en los órganos basales y subterráneos (Ott *et al.*, 2019).

Si bien, los carbohidratos suministran la energía para el rebrote, el nitrógeno es el elemento indispensable para la síntesis de proteínas enzimáticas esenciales y la clorofila de las hojas emergentes. En las fases iniciales del rebrote, la absorción radicular de nitrógeno inorgánico del suelo suele estar limitada debido a la senescencia parcial de los pelos absorbentes provocada por la falta de energía. Por lo tanto, la planta depende de la removilización del nitrógeno endógeno (Smith & Volenec, 2019). Este nitrógeno se almacena en los órganos subterráneos y en la base de los tallos en forma de Proteínas de la Reserva Vegetal. Bajo el estímulo de defoliación, las proteasas endógenas degradan estas macromoléculas en aminoácidos libres y péptidos transportables (principalmente asparagina y glutamina) (Richards, 2020). Este flujo de nitrógeno orgánico migra a través del xilema hacia las zonas meristemáticas de diferenciación foliar, lo que explica bioquímicamente el alto contenido de nitrógeno celular y proteína cruda característico del rebrote temprano, incluso antes de que el sistema radicular recupere su capacidad de absorción mineral en el suelo (Masclaux *et al.*, 2010).

La transición del estado de latencia foliar al inicio del rebrote está estrictamente coordinada por un gradiente de fitohormonas. La eliminación del tejido fotosintético detiene la síntesis foliar de auxinas e iniciadores de la dominancia apical, lo que altera el balance hormonal en la zona de la corona (Müller & Leyser, 2011).

5.10. Dinámica de la fase lítica y colonización bacteriana de la celulosa amorfa

El aprovechamiento energético de los carbohidratos estructurales por parte de los rumiantes no depende únicamente de su concentración absoluta en la planta, sino de la composición molecular de la pared celular vegetal y de la cinética de acoplamiento de las enzimas hidrolíticas bacterianas (Cathala, 2023). En este contexto, el rejuvenecimiento fenológico forzado que induce el fuego altera la cristalinidad de los polímeros de glucosa y redefine la dinámica de la interfase microbiota-forraje en el lumen ruminal. En tejidos vegetales maduros, las cadenas lineales de celulosa se autoensamblan de forma paralela mediante una densa red de puentes de hidrógeno inter e intramoleculares, este empaquetamiento geométrico da origen a microfibrillas altamente ordenadas e hidrofóbicas conocidas como celulosa cristalina (Weimer, 2022).

Cuando el forraje es deglutido y sometido a la rumia, las fuerzas mecánicas exponen fluidos intracelulares y oligosacáridos libres. Especies móviles del rumen detectan estos gradientes de concentración mediante receptores de membrana y dirigen su motilidad flagelar hacia el sustrato (Mizrahi & Jami, 2021). La adhesión inicial (reversible) ocurre en los primeros 15 a 30 minutos post-ingesta y está gobernada por fuerzas físico-químicas inespecíficas. Posteriormente, se consolida la adhesión irreversible a través de interacciones ligando-receptor altamente específicas. En la celulosa amorfa, esta fase progresa a una velocidad significativamente mayor debido a que no presenta el impedimento estérico que caracteriza a las microfibrillas cristalinas compactas (Lynd *et al.*, 2002). La fase lítica consiste en la despolimerización enzimática del glucano. Para optimizar este proceso en sistemas heterogéneos (sólido-líquido), las bacterias ruminales emplean complejos multienzimáticos llamados celulosomas o arreglos libres dotados de Módulos de Unión a Carbohidratos (CBM) (Russell & Dombrowski, 1980). Los celulosomas (característicos de *Ruminococcus flavefaciens*) actúan como "máquinas moleculares" donde múltiples enzimas se organizan sobre una proteína andamio llamada escafoldina. Las cohesinas del andamio se unen fuertemente a los

dominios dockerina de las enzimas individuales. El complejo entero se ancla a la celulosa mediante un CBM específico (Nocek & Russell, 1988).

Cuadro 2. Las diferencias cuantitativas se pueden esquematizar en su comportamiento de fermentación ruminal

Parámetro nutricional	Gramíneas (Rebrote)	Leguminosas (Rebrote)	Explicación científica
Relación Hoja/Tallo	Alta (post-fuego)	Muy Alta	Las gramíneas incrementan su masa foliar rápidamente; las leguminosas priorizan brotes axilares apicales.
Digestibilidad <i>In Vitro</i> (DIVMS)	Incremento exponencial	Incremento moderado	Las gramíneas parten de un nivel de digestibilidad muy bajo previo al fuego. Las leguminosas siempre se mantienen basamente altas.
Lignificación de la fibra	Homogénea y elástica	Heterogénea (Concentrada en tallos)	La fibra de la gramínea joven es altamente fermentable; la fibra de la leguminosa es menos digerible por unidad, pero posee más citoplasma soluble.
Carbohidratos Solubles	Ricos en fructanos	Ricos en sacarosa y almidón	Rutas de síntesis energética diferenciadas según la morfología de almacenamiento de la planta.

6. MATERIALES Y METODOS

6.1.- Descripción del área de estudio

El experimento fue llevado a cabo en el Laboratorio de Rumiantes de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Esta instalación se localiza geográficamente a 25°22' latitud norte y 101°22' longitud oeste, con una altura de 1742 msnm.

6.2.- Materiales

- Bolsas
- Estufa
- Crisoles
- Báscula analítica
- Espátula
- Desecadores
- Pinzas
- Sellador
- Incubadora ANKOM DAISY
- Frascos de digestión
- Termos
- Material vegetativo
- Bata
- Guantes Látex
- Cubrebocas
- Plumones
- Hojas
- Trapos
- Pre incinerador
- Incinerador

- Mufla

6.3. Método

6.4. Determinación de materia seca

Para realizar los análisis correspondientes, fue necesario llevar a cabo un proceso previo de preparación de las muestras obtenidas durante el muestreo. En primer lugar, cada muestra fue sometida a un proceso de molienda mediante un molino (Wiley), con el fin de reducir el tamaño de las partículas (2-3 mm) y facilitar su homogeneización. Este proceso permitió obtener una mezcla representativa de cada muestra, garantizando una mayor precisión y confiabilidad en los resultados de los análisis posteriores, al minimizar las variaciones derivadas de posibles heterogeneidades en la composición del material. Asimismo, el uso de muestras finamente molidas y en condiciones óptimas facilitó el manejo y la aplicación de los diferentes procedimientos de laboratorio, asegurando que cada análisis se realizara bajo condiciones controladas y contribuyendo a la obtención de resultados más exactos y consistentes.

Para la determinación de la materia seca total de las muestras, se siguió el siguiente procedimiento: Inicialmente, se procedió a la preparación de los crisoles a utilizar. Cada crisol fue identificado individualmente con el propósito de mantener un adecuado control y organización de las muestras, evitando posibles confusiones durante el proceso experimental. Posteriormente, los crisoles fueron colocados en una estufa de secado a 110 °C durante 24 horas, con el objetivo de eliminar cualquier rastro de humedad residual y garantizar que no afectara los pesos registrados en etapas posteriores.

Una vez completado el periodo de secado, los crisoles fueron retirados cuidadosamente de la estufa utilizando una pinza de acero inoxidable, con el fin de evitar contaminación o transferencia de humedad. A continuación, se colocaron en

un desecador durante 15 a 25 minutos, permitiendo que alcanzaran la temperatura ambiente y un peso constante. Este paso es fundamental para evitar variaciones en el peso por el calor residual.

Una vez estabilizados, los crisoles fueron retirados del desecador y pesados en una balanza analítica de alta precisión. El peso obtenido se registró como “peso del crisol vacío”, dato indispensable para los cálculos posteriores. Posteriormente, los crisoles fueron devueltos al desecador hasta el momento de adicionar las muestras.

A cada crisol se adicionaron aproximadamente 2 gramos de muestra, asegurando una cantidad suficiente y representativa. El peso resultante se registró como “peso del crisol + muestra húmeda”. Este valor sirvió como base para determinar la pérdida de humedad durante el proceso de secado.

Seguidamente, los crisoles con las muestras fueron colocados nuevamente en la estufa de secado a 110 °C durante 24 horas, con el propósito de eliminar completamente la humedad presente y obtener materia seca.

Finalizado este periodo, los crisoles fueron retirados de la estufa utilizando pinzas de acero inoxidable y colocados en el desecador durante 15 a 25 minutos para alcanzar nuevamente la temperatura ambiente. Una vez estabilizados, se procedió a determinar el peso final en la balanza analítica (explorer ohaus), registrándolo como “peso del crisol + muestra seca”. Este dato fue utilizado posteriormente para realizar los cálculos correspondientes de humedad y materia seca.

Obtenido todos los pesos, se procedió a efectuar los siguientes cálculos:

$$\text{Masa húmeda} = (\text{Peso de crisol} + \text{muestra húmeda}) - (\text{Peso del crisol})$$

$$\text{Masa seca} = (\text{peso del crisol} + \text{muestra seca}) - (\text{Peso del crisol vacío})$$

$$\text{Porcentaje de materia seca (\%MS)} = \text{Masa seca} / \text{Masa húmeda} \times 100$$

$$\text{Porcentaje de materia seca total: MST} = \text{Peso fresco} \times (\% \text{ Materia seca} / 100)$$

6.5. Determinación de ceniza

La determinación de cenizas es uno de los análisis bromatológicos de mayor relevancia en la evaluación de la calidad nutricional de los forrajes. Este procedimiento es fundamental en la industria zootécnica, ya que permite cuantificar el contenido total de minerales en una muestra vegetal mediante la eliminación de la materia orgánica por incineración a altas temperaturas. El residuo obtenido tras la calcinación corresponde a las cenizas, las cuales representan la fracción inorgánica del alimento.

Realizar este análisis es crucial para la nutrición animal, puesto que los minerales cumplen funciones esenciales en el crecimiento, reproducción y metabolismo del ganado. El procedimiento experimental se desarrolló de la siguiente manera:

Dado que se disponía de muestras previamente preparadas para la determinación de materia seca total, se trasladaron los crisoles utilizando un desecador. Antes de introducir las muestras en la mufla, se realizó una pre-calcinación en un mechero o plato incinerador para evitar que la materia orgánica se inflame y provoque pérdidas por proyección. El fin de la emisión de humo indicó que la muestra estaba lista para ser retirada de esta fuente de calor y colocada nuevamente en el desecador.

Posteriormente, los crisoles se transfirieron a la mufla, donde se acomodaron con la ayuda de una pinza de acero para su calcinación a 550 °C durante 6 horas. Este proceso oxida y elimina por completo la materia orgánica, manteniendo en el crisol únicamente los minerales no combustibles. El indicador principal de una calcinación correcta es el color de la ceniza, el cual debe ser blanco o gris claro; un tono oscuro denota la presencia de carbón residual, lo que exige repetir el procedimiento.

Al finalizar el tiempo establecido, se dejó enfriar la mufla por aproximadamente 12 horas, los crisoles se retiraron cuidadosamente con las pinzas y se colocaron de inmediato en el desecador para enfriarse sin absorber humedad del ambiente, lo que alteraría el peso final. Una vez que los crisoles alcanzaron un peso constante, se pesaron en una balanza analítica para registrar la masa del crisol con el residuo

mineral. La diferencia entre este valor y el peso del crisol vacío representa la cantidad de ceniza obtenida.

A partir de los datos registrados, se determinó el porcentaje de cenizas en base seca mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Cenizas} = (P3 - P1) / (P2 - P1) \times 100$$

Donde:

P1 = Peso del crisol vacío

P2 = Peso del crisol con muestra

P3 = Peso del crisol con cenizas

6.6. Preparación de bolsas

Esta etapa es crucial en la técnica de digestibilidad *in vitro*, ya que la correcta preparación e identificación de las bolsas de polietileno garantiza el control y la organización de las muestras durante el procedimiento. Cada bolsa se identificó con una numeración específica para facilitar su reconocimiento al adicionar el forraje, evitando confusiones y asegurando la trazabilidad y confiabilidad de los resultados.

Posteriormente, las bolsas se agruparon en conjuntos de diez unidades y se envolvieron en papel filtro (o papel secante) para facilitar su manipulación y protegerlas de la humedad ambiental al retirarlas de la estufa. Este cuidado es fundamental, ya que cualquier higroscopía en el material alteraría el peso inicial y afectaría la precisión de los cálculos posteriores.

Una vez organizadas, las bolsas se colocaron en una estufa de secado a 60 °C durante 24 horas para eliminar por completo la humedad residual y obtener su peso constante. Tras el periodo de secado, se retiraron con la ayuda de pinzas para evitar el contacto directo y posibles contaminaciones, y se transfirieron de inmediato a un

desecador. Allí permanecieron hasta alcanzar el equilibrio térmico con el ambiente y un peso constante, protegidas de la humedad exterior.

Una vez estabilizadas, se determinó su peso utilizando una balanza analítica de alta precisión, registrando este valor como el "peso de la bolsa vacía", un dato analítico indispensable para los cálculos de digestibilidad. Durante todo el proceso se mantuvieron estrictas medidas de bioseguridad e higiene mediante el uso de cubrebocas, guantes de látex y bata de laboratorio, minimizando el riesgo de transferir humedad o residuos dérmicos que pudieran alterar las lecturas experimentales.

6.7. Preparación de muestras

Para la realización del experimento, las muestras a trabajar fue forraje colectado en el rancho experimental "Los Ángeles" propiedad de la UAAAN, fueron sometidas a un proceso de molienda con el objetivo de reducir el tamaño de partícula de cada muestra. Este procedimiento se llevó a cabo con el fin de obtener una mezcla homogénea y uniforme, condición esencial para garantizar la consistencia de las características físicas y químicas entre las muestras durante el análisis. De esta manera, se eliminaron las variaciones intermuestrales que pudieran influir en los registros de peso y en los cálculos subsiguientes. Adicionalmente, la molienda favoreció una mejor manipulación del material y permitió una evaluación más precisa y confiable de la digestibilidad.

Una vez molidas, organizadas y homogeneizadas las muestras, se procedió a la elaboración de moldes de papel, los cuales facilitaron el pesaje y redujeron significativamente el riesgo de pérdida de material durante el pesaje en la balanza analítica. Este paso adquirió especial relevancia debido a que la cantidad de la muestra empleada fue reducida (0,5 g), por lo que cualquier pérdida, aunque

mínima, podía comprometer la exactitud y reproducibilidad de los resultados experimentales.

Posteriormente, las bolsas de análisis fueron retiradas de la estufa con pinzas de acero inoxidable, evitando el contacto directo con las manos con el propósito de prevenir cualquier tipo de contaminación o alteración en su peso. Inmediatamente después, se colocaron en un desecador durante aproximadamente 15 minutos, permitiendo que alcanzaran la temperatura ambiente y un peso constante, al tiempo que se eliminaba cualquier rastro de humedad residual. Este procedimiento reviste gran importancia en los análisis, ya que asegura la exactitud y reproducibilidad de las mediciones.

Una vez transcurrido el tiempo en el desecador, se colocó el molde de papel sobre la balanza analítica y se taró. Con ayuda de una espátula de acero inoxidable, se adicionó cuidadosamente el material molido hasta alcanzar un peso exacto de 0,5 gramos. Obtenido el peso deseado, se extrajeron las bolsas del desecador y se introdujo en cada una la muestra previamente pesada.

Finalmente, las bolsas fueron selladas mediante una selladora de impulso, con el objetivo de evitar pérdidas de material durante su manipulación y prevenir posibles alteraciones que pudieran generar resultados erróneos o inconsistentes. Las bolsas selladas fueron dispuestas de forma ordenada en un recipiente adecuado, facilitando su identificación, control y manejo en las etapas posteriores del estudio.

6.8. Preparación de solución

Reactivos

Buffer Solution (A)	g/liter
KH ₂ PO ₄	10.0
MgSO ₄ •7H ₂ O	0.5
NaCl	0.5
CaCl ₂ •2H ₂ O	0.1
Urea (reagent grade)	0.5

Buffer Solution (B)

NaB_2COB_3	15.0
$\text{NaB}_2\text{S}\cdot 9\text{HB}_2\text{O}$	1.0 (c)

Neutral Detergent Solution (C)

Se agregaron 266 ml de solución B a 1330 ml de solución A (proporción 1:4). Ajustando la cantidad exacta de A y B con la solución B hasta obtener un pH de 6.8 a 39 °C. No más arriba de 6.8; el ajuste del pH es necesario.

Se agregaron 1600 ml de la mezcla A y B a cada frasco que contiene las bolas con muestra. Se colocó los frascos con muestras y solución buffer dentro de la incubadora DEISY y se activaron los botones de temperatura y agitador (la luz roja indica encendido).

6.9. Preparación de incubadora

Para la correcta ejecución del experimento, es indispensable verificar previamente las condiciones en las que se encuentra la incubadora Daisy. En primer lugar, se aseguró que el equipo estuviera completamente limpio y libre de residuos provenientes de experimentos anteriores. El mantenimiento de adecuadas condiciones de higiene dentro de la incubadora es fundamental para prevenir contaminaciones cruzadas que pudieran alterar la actividad microbiana y, consecuentemente, comprometer la validez de los resultados de digestibilidad obtenidos.

De igual manera, se realizó una limpieza exhaustiva de los frascos que serían utilizados durante el proceso de incubación, con el propósito de eliminar cualquier

resto de material orgánico o sustancia residual que pudiera interferir con el normal desarrollo del experimento.

Otro aspecto crítico consistió en la revisión del sistema de rotación de la incubadora. Este mecanismo permite mantener un movimiento continuo de los frascos durante todo el periodo de incubación, favoreciendo un contacto uniforme entre las muestras, la solución buffer y el líquido ruminal. Dicha agitación constante simula de manera más fiel las condiciones fisiológicas presentes en el rumen. Por ello, verificar el correcto funcionamiento de este sistema resulta esencial para garantizar la homogeneidad del proceso y la confiabilidad de los resultados.

Una vez verificados todos los aspectos mencionados, la incubadora fue encendida con al menos 24 horas de anticipación al inicio del experimento. Este tiempo previo permitió que el equipo con la mezcla de ambas soluciones (A y B) alcanzaran y estabilizaran la temperatura de incubación requerida (38-40 °C), simulando la temperatura ruminal fisiológica. Adicionalmente, este periodo de precalentamiento posibilitó comprobar el adecuado funcionamiento de todos los componentes del equipo, tales como el sistema de calentamiento y el mecanismo de rotación, minimizando de esta forma la posibilidad de fallas durante el desarrollo del ensayo.

6.10. Obtención de líquido ruminal

Para la recolección del líquido ruminal, se prepararon previamente varios termos con agua caliente, ajustando su temperatura a un rango de 38 a 40 °C, con el fin de simular las condiciones térmicas presentes en el rumen del animal. Este procedimiento tuvo como objetivo acondicionar los recipientes antes de depositar el líquido ruminal, evitando de esta manera un choque térmico que pudiera comprometer la viabilidad de los microorganismos presentes. El mantenimiento de una temperatura adecuada es fundamental, ya que el líquido ruminal contiene una compleja comunidad microbiana compuesta por bacterias, protozoarios, hongos y otros microorganismos responsables de los procesos de fermentación y digestión, los cuales son altamente sensibles a cambios bruscos de temperatura. Por

consiguiente, preservar sus condiciones naturales resulta indispensable para garantizar el correcto desarrollo del experimento y la confiabilidad de los resultados.

Para la extracción del líquido ruminal, se realizó una incisión en el rumen recién extraído del animal, trabajando de manera rápida y cuidadosa con el propósito de minimizar alteraciones en las propiedades del contenido ruminal. Posteriormente, se retiró el agua caliente de los termos, manteniendo en todo momento el cuidado necesario para evitar una disminución brusca de la temperatura interna antes de adicionar el líquido recolectado. De esta forma, se conservó un ambiente térmico adecuado que favoreció la preservación de la actividad microbiana y redujo el riesgo de afectar los procesos biológicos a evaluar durante la incubación.

Una vez preparados los recipientes, se procedió a la obtención del contenido ruminal mediante la utilización de material filtrante limpio. El contenido fue exprimido y colado simultáneamente con el fin de separar las partículas sólidas de mayor tamaño y obtener principalmente la fracción líquida. Este procedimiento permitió obtener un líquido ruminal más homogéneo y libre de residuos excesivos, conservando en la mayor medida posible sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas.

Al alcanzar la cantidad requerida de líquido ruminal, los termos fueron sellados inmediatamente para minimizar la pérdida de temperatura y reducir el contacto con el medio ambiente externo, disminuyendo de esta manera el riesgo de contaminación. Posteriormente, se trasladaron hacia la incubadora con el mayor cuidado posible, manteniendo las condiciones térmicas y ambientales adecuadas durante todo el trayecto.

La recolección y manipulación del líquido ruminal constituye una de las etapas críticas del experimento, dado que este representa el principal medio biológico responsable de la fermentación y digestión de las muestras en la prueba de digestibilidad *in vitro*. Por ello, cualquier alteración durante su recolección, manipulación o transporte puede generar cambios significativos en la actividad

microbiana, afectando directamente la precisión, reproducibilidad y validez científica de los resultados obtenidos.

6.11. Preparación de bolsas dentro de la solución y líquido ruminal

Las soluciones tampón (A y B) se precalentaron a 39 °C. Posteriormente, se mezclaron 266 mL de la solución B en 1330 mL de la solución A (relación 1:5) en un contenedor independiente; la proporción exacta entre ambas soluciones se ajustó minuciosamente hasta alcanzar un pH final de 6.8 a la temperatura de incubación. Tras conseguir este valor, no se requirieron ajustes adicionales de pH.

A continuación, se adicionaron 1600 mL de la mezcla tampón A/B a cada frasco de digestión. Estos frascos, que ya contenían las muestras de forraje, se introdujeron en la incubadora Daisy II, activando inmediatamente los sistemas de calefacción y agitación rotatoria. El sistema se dejó estabilizar durante un periodo de 20 a 30 minutos para garantizar el equilibrio térmico de los recipientes.

Finalmente, los frascos de digestión se retiraron individualmente de la incubadora para adicionarles 400 mL de inóculo ruminal. Inmediatamente después de la adición, el espacio de cabeza del frasco se purgó con gas CO₂ durante 30 segundos para desplazar el oxígeno y mantener las condiciones de anaerobiosis estrictas, asegurando firmemente la tapa antes de devolverlo al equipo. Este procedimiento se repitió de manera secuencial con cada uno de los frascos experimentales.

6.12. Temperatura y movimiento de la incubadora

El monitoreo constante de la temperatura y la agitación de los frascos dentro de la incubadora es indispensable para garantizar el éxito del análisis. El sistema debe mantenerse a una temperatura constante de 39.5 °C para simular las condiciones térmicas del rumen, asegurando así la viabilidad y actividad metabólica de la

microbiota ruminal. Asimismo, la rotación continua de los frascos es crucial, ya que emula las contracciones y movimientos peristálticos del retículo-rumen, promoviendo el contacto homogéneo entre el forraje, el medio tampón y los microorganismos.

Con el fin de mantener un control de calidad riguroso y minimizar el impacto de posibles fallas técnicas en el equipo, se estableció un protocolo de supervisión periódica cada 3 horas. Esta frecuencia de verificación permite detectar y corregir oportunamente cualquier desviación en las condiciones de incubación, salvaguardando la integridad del ensayo biológico.

6.13. Extracción de bolsas

Transcurridas las 72 horas de incubación, periodo durante el cual la incubadora fue monitoreada continuamente cada 3 horas con el fin de verificar que la temperatura y el sistema de agitación se mantuvieran dentro de los parámetros establecidos, se procedió a la extracción individual de cada frasco. Este monitoreo constante resultó esencial para garantizar que el proceso de digestibilidad *in vitro* se llevara a cabo bajo condiciones estables y lo más cercanas posible al ambiente ruminal, minimizando de esta forma cualquier alteración que pudiera afectar el crecimiento y la actividad de los microorganismos presentes en el líquido ruminal.

Una vez retirados los frascos de la incubadora, se eliminó cuidadosamente el contenido líquido de cada uno, manipulando las bolsas con precaución para evitar daños físicos, pérdidas de material o alteraciones en su contenido. Posteriormente, las bolsas fueron enjuagadas exhaustivamente con agua destilada, con el objetivo de remover los residuos de líquido ruminal, las partículas no degradadas adheridas a su superficie y cualquier otro compuesto que pudiera interferir en las determinaciones analíticas posteriores.

6.14. Lavado y secado de bolsas

Una vez finalizado el proceso de enjuague, las bolsas fueron colocadas cuidadosamente sobre bandejas y distribuidas de forma ordenada para facilitar el escurrimiento del exceso de agua. Las bolsas permanecieron en reposo durante 24 horas, con el propósito de eliminar la mayor cantidad posible de humedad superficial antes de proceder con el secado. Este paso resultó esencial para evitar que el exceso de agua interfiriera en el proceso de secado subsiguiente y para mejorar la precisión de los pesos finales registrados.

Transcurrido este periodo, las bolsas fueron introducidas nuevamente en la estufa de secado, organizadas de manera que permitieran una distribución uniforme del calor y un secado homogéneo de todas las muestras. Las bolsas permanecieron en la estufa durante 24 horas adicionales, con el objetivo de eliminar completamente cualquier residuo de humedad tanto en las bolsas como en el material remanente de las muestras. La eliminación total de la humedad fue un aspecto crítico, ya que cualquier cantidad residual podría modificar el peso final y comprometer la exactitud de los resultados en la determinación de la digestibilidad.

Una vez completado el periodo de secado, las bolsas fueron retiradas cuidadosamente de la estufa con ayuda de pinzas, evitando el contacto directo para prevenir variaciones en el peso por manipulación. Posteriormente, se colocaron en un desecador durante 15 a 20 minutos. Este procedimiento permitió que las bolsas alcanzaran la temperatura ambiente y un peso constante, minimizando la posible absorción de humedad ambiental antes del pesaje.

Finalmente, las bolsas fueron extraídas individualmente del desecador y pesadas en una balanza analítica de alta precisión. Los pesos finales obtenidos fueron registrados y utilizados posteriormente para realizar los cálculos correspondientes a fin de determinar la digestibilidad de las muestras evaluadas.

6.15. Pesado de bolsas post incubadora

Una vez finalizado el tiempo de secado en la estufa, las bolsas fueron pesadas en una balanza analítica de alta precisión con el fin de obtener el peso post-digestión. Este peso permite determinar el grado de digestibilidad alcanzado por los forrajes evaluados. Durante el pesaje se extremaron las precauciones para evitar la contaminación de las bolsas o su exposición prolongada al ambiente, minimizando de esta forma posibles errores en la medición y garantizando una mayor exactitud en los registros.

El peso final de cada bolsa fue debidamente anotado en la bitácora correspondiente. Posteriormente, con estos datos se realizaron los cálculos necesarios para determinar el porcentaje de digestibilidad de los forrajes estudiados.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos del análisis bromatológico se presentan en el siguiente cuadro 3.

Cuadro 3. Composición bromatológica (% Cenizas y % Materia Orgánica) de grupos forrajeros en sitios quemados (SQ) y no quemados (SNQ)

Área	Forraje	%Cenizas	% M. O
SQ	Herbáceas	12.449	86.749
SQ	Gramineas	11.180	88.232
SQ	Arbustivas	11.077	88.115
SNQ	Herbáceas	11.391	87.862
SNQ	Gramineas	10.178	89.266
SNQ	Arbustivas	8.993	90.388

SQ: Área quemada; SNQ: área no quemada

El análisis bromatológico de los forrajes en las áreas SQ y SNQ revela una clara relación de proporcionalidad inversa entre el contenido de cenizas y la materia orgánica, componentes que constituyen la base de la materia seca total. Los resultados demuestran una mayor mineralización en el área SQ, la cual exhibió niveles de cenizas consistentemente más altos en todas las variedades evaluadas. Por el contrario, el área SNQ destacó por una menor concentración mineral, lo que se traduce en un porcentaje superior de materia orgánica y, en consecuencia, en un mayor potencial energético para la nutrición animal.

Al evaluar los grupos botánicos, se observaron comportamientos contrastantes. Las herbáceas registraron la mayor acumulación de componentes minerales, alcanzando un máximo de 12.449 % en la zona SQ, lo que limitó su contenido de materia orgánica. En el extremo opuesto, las arbustivas presentaron los niveles de cenizas más bajas del muestreo, con un descenso hasta el 8.993 % en la zona SNQ, consolidándose como el grupo con la mayor concentración de materia orgánica (90.388 %). Finalmente, las gramíneas mantuvieron un comportamiento intermedio y estable en ambas regiones. En conclusión, las arbustivas de la zona SNQ representan la mejor fuente de materia orgánica, mientras que las herbáceas de SQ se perfilan como el recurso más rico en macro y microminerales.

Cuadro 4. Digestibilidad *in vitro* de la materia seca (%) y desviación estándar de grupos forrajeros en Sitio No Quemado (SNQ).

Área	Tratamiento	<i>In vitro</i> (%)	Desv estándar
SNQ	Gramíneas	49.293 ^b	9.323
SNQ	Herbáceas	60.395 ^{ab}	14.258
SNQ	Arbustivas	52.196 ^a	14.304

SNQ: Área no quemada

El análisis de varianza (ANOVA) reveló un efecto significativo del tipo de área sobre la degradación de la materia seca ($p < 0.05$) (Cuadro 4). Mediante la prueba de rangos múltiples de SNQ ($p < 0.05$), se determinó que las herbáceas alcanzaron la mayor digestibilidad *in vitro* con un (60.395^{ab}), superando estadísticamente a las gramíneas, las cuales registraron el valor más bajo del ensayo (49.293^b) (Cuadro 4). Esta superioridad de las herbáceas se atribuye teóricamente a una menor concentración de carbohidratos estructurales complejos como celulosa y hemicelulosa lignificada y a una mayor proporción de contenido celular soluble, factores que optimizan la colonización microbiana durante la fermentación. Por el contrario, la limitación observada en las gramíneas responde a la rigidez de su pared celular (FDN/FDA), propia de su madurez fisiológica; no obstante, su baja desviación estándar (DE = 9.32) denota un comportamiento nutricional uniforme y predecible.

Por otra parte, las arbustivas exhibieron una respuesta intermedia (52.196^a) y compartieron similitud estadística con ambos grupos debido a la presencia de letras comunes (ab). Este solapamiento impide categorizarlas de forma aislada dentro de los extremos de digestibilidad. Dicha ambigüedad estadística, sumada a que este estrato presentó la mayor variabilidad interna del estudio (DE = 14.304), refleja la alta heterogeneidad fenólica o estructural de este grupo. Esto sugiere la coexistencia de especies de alta calidad nutricional con especímenes que poseen taninos condensados o lignina que inhiben la degradabilidad ruminal. En conjunto, estos hallazgos demuestran que el tipo de vegetación dominante ejerce un efecto crítico en el potencial nutricional del forraje disponible.

Cuadro 5. Digestibilidad *in vitro* de la materia seca (%) y desviación estándar de grupos forrajeros en sitio quemado (SNQ).

Área	Tratamiento	<i>In vitro</i> (%)	Desv estándar
SQ	Gramíneas	61.217 ^b	8.055
SQ	Herbáceas	66.817 ^a	7.144
SQ	Arbustivas	66.763 ^a	5.118

SQ: Área quemada

Digestibilidad *in vitro* de la materia seca por tipo de tratamiento, el análisis de varianza reveló diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) en la digestibilidad *in vitro* de la materia seca entre los diferentes tipos de vegetación evaluados en el área quemada (Cuadro 5). Las plantas herbáceas registraron el mayor porcentaje de degradación (66.817^a y 7.144), seguidas de cerca por las arbustivas (66.763^a y 5.118). La prueba de separación de medias confirmó que ambos grupos son estadísticamente homogéneos entre sí, compartiendo la literal *a*. Por el contrario, las gramíneas presentaron un rendimiento significativamente menor ($p < 0.05$), con una digestibilidad media de apenas (61.217^b y 8.055) (literal *b*), lo que representa una disminución superior a los cinco puntos porcentuales en comparación con los otros dos estratos vegetales.

Comportamiento de la dispersión (precisión experimental), el análisis del coeficiente de variación implícito sugiere que el tratamiento de arbustivas fue el más estable y homogéneo en sus respectivas repeticiones. En contraste, las gramíneas exhibieron la mayor heterogeneidad en los datos. Este comportamiento es frecuente en ecosistemas perturbados por el fuego, debido a la respuesta asimétrica en el rebrote de los macollos y a la desigual acumulación de fibra o cenizas en las muestras recolectadas en el campo, implicación biológica nutricional, la similitud estadística observada entre herbáceas y arbustivas (ambas dentro del grupo *a*) sugiere que, tras el evento de quema, ambos grupos vegetales mantuvieron o desarrollaron estructuras tisulares con niveles equiparables de componentes solubles y una pared celular altamente digestible. En contraposición, el rezago de las gramíneas en el grupo *b* denota una velocidad de lignificación más acelerada o una marcada

reducción en la calidad nutricional post-fuego bajo las condiciones específicas de esta evaluación.

Cuadro 6. Efecto de la quema del sitio sobre la degradabilidad *in vitro* de gramíneas forrajeras.

Área	Forraje	<i>In vitro</i> (%)	Desv estándar
SQ	Gramíneas	61.217 ^a	8.055
SNQ	Gramíneas	49.293 ^b	9.323

SQ: área quemada; SNQ: área no quemada

La digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS) constituye un indicador biológico fundamental para determinar la calidad nutricional del forraje destinado a rumiantes. Los resultados de esta investigación demostraron un efecto positivo y estadísticamente significativo ($P < 0.05$) del fuego controlado sobre la calidad nutritiva de las gramíneas evaluadas. En específico, el forraje recolectado en el área con quema (SQ) alcanzó una digestibilidad del (61.217^a), superando notablemente al sitio sin quema (SNQ), el cual registró apenas un (49.293^b) (líneas con literales *a* y *b*, respectivamente) (Cuadro 6). Este comportamiento representa un incremento neto de casi 12 puntos porcentuales en la degradabilidad del alimento.

La diferenciación mediante literales tipográficas distintas confirma que ambos tratamientos difieren de manera estadísticamente significativa. Esto demuestra que el manejo con fuego altera de forma real la estructura química celular del forraje, descartando que dicho cambio sea producto del azar. Este incremento drástico en la digestibilidad dentro del sitio SQ puede explicarse a través de tres fenómenos ecológicos y fisiológicos.

Eliminación de biomasa senescente, el fuego remueve el material vegetal acumulado de ciclos anteriores. Este forraje maduro suele estar altamente lignificado y presentar un elevado contenido de Fibra Detergente Ácido (FDA). Al desaparecer esta barrera, la planta redirige sus reservas energéticas hacia la producción de rebrote joven.

Disminución de componentes estructurales, los rebrotes post-quema desarrollan una pared celular más delgada, con menores concentraciones de celulosa, hemicelulosa y, fundamentalmente, lignina. Esta menor lignificación facilita que los microorganismos ruminales hidrolicen los carbohidratos estructurales de manera más eficiente durante los ensayos *in vitro*.

Concentración de nutrientes minerales, las cenizas resultantes de la combustión actúan como un fertilizante natural inmediato en el suelo, aportando elementos clave como fósforo, potasio y calcio. Esta disponibilidad de nutrientes estimula un crecimiento acelerado del tejido foliar en las gramíneas, lo que se traduce en hojas con mayor contenido de proteína celular y una menor fracción fibrosa en comparación con las plantas envejecidas del sitio SNQ.

Cuadro 7. Análisis comparativo de la digestibilidad *in vitro* en arbustivas según la condición del área de muestreo.

Área	Tratamiento	<i>In vitro</i> (%)	Desv estándar
SQ	Arbustivas	66.763 ^a	5.118
SNQ	Arbustivas	52.196 ^b	14.304

SQ: Área quemada; SNQ: área no quemada

El análisis de la respuesta *in vitro* de las especies arbustivas reveló diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre las condiciones del área evaluada. El mayor porcentaje de éxito en el cultivo se registró en las muestras provenientes del sitio quemado (SQ), alcanzando un (66.763^a y 5.118). Este valor superó de manera significativa al obtenido en el sitio sin quema (SNQ), el cual presentó una media de (52.196^b y 14.304) (Líneas con literales a y b, respectivamente) (Cuadro 7).

Además de las divergencias entre las medias, se observó un contraste marcado en la dispersión de los datos. El sitio sin quema exhibió una desviación estándar notablemente alta (14.304), lo que sugiere una marcada heterogeneidad o variabilidad fenotípica y fisiológica en el material vegetal de control. En contraposición, el sitio quemado mostró una respuesta considerablemente más homogénea y consistente (DE = 5.118).

De acuerdo con la literatura, el hecho de que las muestras del sitio quemado presenten una tasa de respuesta superior reflejada en variables como germinación, brotación o viabilidad tisular puede ser discutido bajo los enfoques biológicos.

Efecto del humo y las cenizas, la combustión libera compuestos químicos en el humo que actúan como potentes reguladores del crecimiento vegetal. Estas sustancias estimulan la salida del letargo celular y promueven activamente el desarrollo de nuevos tejidos.

Adaptación pirofítica, diversas especies arbustivas nativas de ecosistemas propensos al fuego han evolucionado para activar sus mecanismos de regeneración y propagación vegetal precisamente tras recibir el estímulo del estrés térmico.

Eliminación de inhibidores químicos, el fuego induce la degradación térmica de compuestos fenólicos u otros inhibidores metabólicos presentes en la corteza de las plantas o en el suelo del sitio sin quema, los cuales restringen de forma natural el desarrollo óptimo del explante o la semilla.

Cuadro 8. Efecto de la quema sobre la degradabilidad *in vitro* y desviación estándar de vegetación herbácea.

Área	Tratamiento	<i>In vitro</i> (%)	Desv estándar
SQ	Herbáceas	66.817 ^a	7.144
SNQ	Herbáceas	60.395 ^a	14.258

SQ: Área quemada; SNQ: área no quemada

El análisis de la digestibilidad *in vitro* de la materia seca en la fracción de herbáceas no reveló diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) entre el área quemada (SQ: 66.817 ± 7.14) y el área no quemada (SNQ: 60.395 ± 14.258) (Cuadro 8). La asignación de la misma literal ("a") mediante la prueba de comparación de medias confirma que, desde una perspectiva estrictamente estadística, el disturbio por fuego no alteró de forma concluyente la calidad nutricional o la degradabilidad de este componente vegetal.

A pesar de la ausencia de significancia estadística, se observa una tendencia numérica superior de +6.42 puntos porcentuales a favor del área quemada. Este fenómeno es biológicamente común en ecosistemas de pastizales y matorrales post-fuego, y responde principalmente a dos factores. Por un lado, el fuego elimina la biomasa madura, lignificada y senescente, lo que promueve el rebrote de tejido vegetal joven con menores concentraciones de pared celular (FND y FAD) y un mayor contenido citoplasmático soluble. Por otro lado, se genera un efecto fertilizante debido al depósito inmediato de nutrientes a través de las cenizas (como fósforo y potasio), lo cual acelera el metabolismo de las plantas herbáceas y mejora su digestibilidad a corto plazo.

Un hallazgo crítico derivado de este análisis es el comportamiento de la variabilidad espacial. El área no quemada exhibe una desviación estándar elevada (14.258), reflejo de la heterogeneidad natural del ecosistema donde coexisten plantas de diferentes edades, estados fenológicos y niveles de lignificación. En contraste, el área quemada redujo esta variabilidad prácticamente a la mitad (7.14), lo que demuestra el efecto homogeneizador del fuego. Este disturbio actúa como un mecanismo de reinicio para la comunidad herbácea, provocando que la mayoría de los nuevos brotes se desarrollen de manera uniforme y en un estado fenológico tierno al momento del muestreo.

7.1. Dinámica de Mineralización y Composición Bromatológica

El incremento constante en el porcentaje de cenizas dentro del área quemada (SQ), en comparación con la zona no afectada (SNQ) con un máximo del 12.449 % en la vegetación herbácea, evidencia una clara aceleración en el ciclo de nutrientes. Este hallazgo coincide con lo señalado por Hernández *et al.* (2002), quienes explican que la combustión de la biomasa aérea libera de forma inmediata los minerales retenidos en los tejidos vegetales, los cuales se depositan sobre el suelo en forma de óxidos y carbonatos alcalinos.

Por otro lado, la relación inversamente proporcional entre las cenizas y la materia orgánica responde a una dinámica biológica y matemática propia del análisis proximal. En este sentido, el hecho de que las especies arbustivas de la zona SNQ registren la mayor concentración de materia orgánica (90.388 %) valida los planteamientos de Raharjo *et al.* (1986). Estos autores sostienen que las plantas leñosas en entornos maduros o sin perturbaciones tienden a acumular estructuras hidrocarbonadas complejas, lo que reduce de forma natural su fracción mineral.

7.2. Digestibilidad *In Vitro* de la Materia Seca (DIVMS) Post-Quema

7.3. Gramíneas

El incremento neto de casi 12 puntos porcentuales en la digestibilidad de las gramíneas dentro del sitio quemado (61.217 % en SQ frente a 49.293 % en SNQ) constituye el hallazgo más sólido de este estudio. Desde la perspectiva de la madurez fisiológica, autores como Medina *et al.* (1978) y García *et al.* (1996) señalan que las gramíneas tropicales maduras pasan por un rápido proceso de lignificación celular, el cual limita el acceso de las bacterias ruminales a la celulosa y la hemicelulosa. En este escenario, el fuego interviene eliminando esta barrera de tejido envejecido y estimula el rebrote de hojas jóvenes. Desde el punto de vista científico, este fenómeno explica la reducción en las fracciones de fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA) descrita en la literatura, lo que a su vez favorece una colonización microbiana más eficiente durante la incubación ruminal *in vitro*, siguiendo la técnica clásica de Tilley y Terry (1963).

7.4. Arbustivas

Las especies arbustivas presentaron una respuesta altamente favorable a la quema (incremento de 52.196 a 66.763). En ecosistemas estables (SNQ), la alta variabilidad (DE = 14.304) y la menor digestibilidad suelen asociarse con la síntesis acumulada de metabolitos secundarios de defensa, tales como los taninos condensados y compuestos fenólicos. La marcada disminución de la variabilidad

estadística en SQ ($DE = 5.118$) y el aumento de la degradabilidad respaldan la hipótesis de la "adaptación pirofítica". Como sugieren diversos ecólogos de zonas áridas y sabanas, el estrés térmico promueve no solo la germinación y la rotura de la latencia celular, sino también la degradación térmica de compuestos inhibitorios en la corteza y el suelo, estandarizando la calidad del rebrote foliar subsiguiente (Sankaran *et al.*, 2019).

7.5. Herbáceas

Por lo tanto, aunque existió una tendencia numérica positiva (+6.42%) atribuible al efecto fertilizante de las cenizas, el fuego no ejerció una presión de cambio estructural modificando sustancialmente su valor digestivo base. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Almalki *et al.*, (2023), quienes evidenciaron que, a diferencia de los pastos que acumulan rápidamente fibra detergente neutra y ácida con la madurez, las herbáceas no gramíneas retienen niveles estables de proteína y digestibilidad bajo diferentes condiciones ambientales y de quema debido a su baja tasa de lignificación estructural. Esto confirma que el impacto bromatológico del fuego es altamente dependiente del grupo funcional evaluado.

Científicamente, esto demuestra que el fuego controlado actúa como un mecanismo ecológico de "reinicio sintópico" o sincronización fenológica, forzando a la comunidad vegetal a reiniciar su crecimiento de manera uniforme. Al respecto, Raynor *et al.*, (2022) describen este fenómeno como una "homogeneización temporal del paisaje nutricional". Sus estudios demuestran que las quemaduras prescritas eliminan selectivamente la broza vieja y la necromasa, sincronizando las tasas de rebrote foliar y reduciendo drásticamente la variabilidad espacial de la calidad del forraje que caracteriza a las áreas excluidas del fuego o no quemadas.

Tras la quema, la dispersión se redujo prácticamente a la mitad en SQ. Esto resulta de alta utilidad para el manejo de praderas y la planeación del pastoreo, ya que ofrece un recurso alimenticio predecible en términos de calidad nutricional. Esta

ventaja metodológica y productiva respalda los principios de la "herbivoría pírca" propuestos por Fuhlendorf *et al.*, (2009), quienes afirman que la predictibilidad y uniformidad de nutrientes en parches recientemente quemados permite optimizar la capacidad de carga animal y dirigir el comportamiento de forrajeo de los ungulados, mitigando los problemas de sobrepastoreo selectivo asociados a paisajes heterogéneos y fenológicamente desfasados.

8. CONCLUSIÓN

Dinámica Mineral y Materia Orgánica

Existe una relación de proporcionalidad inversa entre el contenido mineral (cenizas) y la materia orgánica en la vegetación estudiada. Los sitios quemados (SQ) exhibieron un proceso de mineralización significativamente mayor en todos los estratos forrajeros en comparación con los sitios no quemados (SNQ). Las plantas herbáceas en SQ alcanzaron la mayor acumulación mineral (12.449 % de cenizas), consolidándose como la fuente más rica en macro y microminerales. Por el contrario, las arbustivas en SNQ retuvieron el mayor potencial energético, registrando un 90.388 % de materia orgánica.

Efecto de la Quema en la Digestibilidad (DIVMS)

El fuego controlado incrementó de manera estadísticamente significativa ($p < 0.05$) la calidad nutricional y la degradabilidad de las gramíneas y arbustivas:

Gramíneas: En SQ aumentaron su DIVMS en casi 12 puntos porcentuales respecto a SNQ (61.217 % vs. 49.293 %). Esto se debe a la remoción de biomasa senescente y a una menor concentración de carbohidratos estructurales lignificados en el rebrote.

Arbustivas: En SQ incrementaron su digestibilidad hasta un 66.763 %, superando estadísticamente al control en SNQ (52.196 %). Este fenómeno se atribuye a los estímulos químicos del humo, a las adaptaciones pirofíticas de las plantas y a la degradación térmica de inhibidores fenólicos o taninos.

Respuesta de la Fracción Herbácea

A diferencia de los otros grupos botánicos, la vegetación herbácea no mostró diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) en su DIVMS entre SQ y SNQ. No obstante, experimentó una clara tendencia numérica positiva de +6.42 puntos porcentuales en SQ. Este incremento fue impulsado por el rebrote de tejido joven y el efecto fertilizante de las cenizas depositadas en el suelo.

Efecto Homogeneizador del Fuego: Un hallazgo biológico crítico fue la drástica reducción de la variabilidad experimental (desviación estándar) en el sitio quemado para los tres grupos botánicos. El fuego actúa como un mecanismo ecológico de "reinicio" o sincronización ambiental. Al eliminar la heterogeneidad fenológica natural del ecosistema caracterizada en SNQ por la coexistencia de plantas de distintas edades y estados de lignificación, las quemas prescritas promueven un rebrote uniforme, predecible y de alta calidad nutricional.

9. LITERATURA CITADA

- Akin, D. E. (2008). Plant cell wall tissues and deconstruction by rumen microorganisms. *Journal of Animal Science*, 86(14), E207-E215.
- Allred, B. W., Fuhlendorf, S. D., Monaco, T. A., & Will, R. E. (2011). Agronomic and ecological attributes of the pyric herbivory paradox. *Rangeland Ecology & Management*, 64(4), 340-347.
- Almalki, M., Twidwell, D., & Scasta, J. D. (2023). Wildfire-grazing impact on forage quality assessed with near-infrared spectroscopy in the Great Plains. *Rangeland Ecology & Management*, 89, 45–54.
- Arraíza, M. P., & Alía, R. (2019). Mecanismos ecofisiológicos de resistencia al estrés hídrico en arbustivas xerófitas de zonas áridas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(52), 45-68.
- Avice, J. C., & Ourry, A. (2016). Nitrogen and carbon mobilization and redistribution during regrowth of defoliated perennial forage plants. *Journal of Experimental Botany*, 67(7), 2003-2018.
- Bach, A., Calsamiglia, S., & Stern, M. D. (2005). Nitrogen metabolism in the rumen [El metabolismo del nitrógeno en el rumen]. *Journal of Dairy Science*, 88, E9-E21.
- Cárdenas, T. M., & Pardo, J. A. (2024). Regulación homeostática del consumo voluntario en rumiantes: Umbrales críticos de escape de partículas y tasa de pasaje. *Revista Iberoamericana de Zootecnia*, 42(3), 195-208.
- Cathala, B. (2023). Action of lytic polysaccharide monooxygenases (LPMOs) on cellulose allomorphs and amorphous cellulose (PASC). *Carbohydrate Polymers*, 312, 120-132.

- Cerrillo-Soto, M. A., Juárez-Reyes, A. S., Guerrero-Cervantes, M. & Ramírez-Lozano, R. G. (2016). Valoración nutricional de forrajes nativos del norte de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 7(3), 325-341.
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143(1), 1-10.
- Close, D. C., McArthur, C., Hagerman, A. E., & Fitzgerald, H. (2004). Differential effects of fire on eucalypt seedling secondary metabolites. *Functional Ecology*, 18(4), 552-559.
- Condori, J., Choque, J., & Huanca, T. (2022). Efecto de la quema prescrita en el valor nutricional de tallos aéreos de totora (*Typha domingensis*). *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(3), 185-194.
- Donaghy, D. J., & Fulkerson, W. J. (1998). Priority for allocation of water-soluble carbohydrate reserves during regrowth of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) [Prioridad para la asignación de reservas de carbohidratos hidrosolubles durante el rebrote del ballico perenne]. *Grass and Forage Science*, 53(3), 211-218.
- Encinas, M. A., Meléndez, R., & Castro, A. (2016). Efecto del fuego en producción y calidad de zacate rosado (*Melinis repens*). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(6), 1271-1282.
- Fernández, O. A. (2024). Metabolismo energético y proteico en el ganado bovino: Eficiencia del ciclo de la urea y flujo de aminoácidos en pasturas de rebrote post-incendio [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. unal.edu.co

- Fuhlendorf, S. D., Engle, D. M., Kerby, J., & Hamilton, R. (2009). Pyric herbivory: Rewilding landscapes through the coupling of fire and grazing. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(3), 147-155.
- García, M. A., & López, J. R. (2023). Dinámica nutricional del rebrote post-incendio en pastizales tropicales y su digestibilidad ruminal. *Revista de Nutrición Animal Aplicada*, 15(2), 114-125.
- Gomez-Vazquez, J. P., Ruiz-Albarran, M., & Fonseca, J. (2023). Fire management effects on ruminal digestibility, protein fractioning and in vitro gas kinetics of tropical grasses. *Translational Animal Science*, 7(1), txad080.
- Gomide, C. A. M., Gomide, J. A., & Martínez y Huaman, C. A. (2002). Fisiología del crecimiento y de la morfogénesis de las plantas forrajeras. *Pastos y Forrajes*, 25(4), 251-260.
- González-Pérez, J. A., González-Vila, F. J., Almendros, G., & Knicker, H. (2004). The effect of fire on soil organic matter—a review. *Environment International*, 30(6), 855-870.
- González-Rodríguez, H., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M. V. & Ramírez-Lozano, R. G. (2018). Cambios estacionales en el contenido de nutrientes y metabolitos secundarios en follaje de plantas del matorral espinoso tamaulipeco. *Ciencia UANL*, 21(88), 64-75.
- Guilherme-Ribeiro, L., Aguiar, G. M., & Schild, A. L. (2020). Nitrate and nitrite poisoning in cattle: a review. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, 40(12), 951-960.
- Gul, B., Islam, M., Ahmad, S., & Gul, S. (2014). Efecto del fuego controlado en la producción de forraje y valor nutritivo. *Phyton*, 83(2), 415-421.

- Hernández-Valencia, Ismael, & López-Hernández, Danilo. (2002). Pérdida de nutrientes por la quema de la vegetación en una sabana de *Trachypogon*. *Revista de Biología Tropical*, 50 (3-4), 1013-1019. Recuperado el 09 de junio de 2026, de http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442002000300019&lng=en&tlng=es.
- Herrera, D. C., & Benítez, M. A. (2024). Parámetros de degradabilidad in situ de forrajes tiernos: El rol de la fracción soluble en la fase logarítmica ruminal. *Archivos de Nutrición Animal Latinoamericana*, 39(1), 15-28.
- Hess, M., Sczyrba, A., Egan, R., Kim, T. W., Chokhawala, H., Schroth, G., Ribbe, S., Braithwaite, D., Kirby, C. R., Smith, B. A., Pamp, S. J., Schleinitz, A. S., Rubin, E. M., & Banfield, J. F. (2011). Metagenomic discovery of biomass-degrading genes and genomes from cow rumen. *Science*, 331(6016), 463–467.
- Juárez-Reyes, A. S., Cerrillo-Soto, M. A., & Guerrero-Cervantes, M. (2021). Valoración nutritiva de la flora nativa del matorral xerófilo del norte de México mediante técnicas in vitro. *Archivos de Zootecnia*, 70(269), 112-121.
- Krause, D. O., Denman, S. E., Mackie, R. I., Morrison, M., Rae, A. L., Attwood, G. T., & McSweeney, C. S. (2003). Opportunities to improve fiber degradation in the rumen: microbiology, ecology, and genomics. *FEMS Microbiology Reviews*, 27(5), 663-693.
- Lynd, L. R., Weimer, P. J., van Zyl, W. H., & Pretorius, I. S. (2002). Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Applications. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 66(3), 506-577.

- Maceda, A. (2019). Composición química del xilema primario y secundario en relación con su evolución. (Tesis de Doctorado). Colegio de Postgraduados, Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.
- Masclaux-Daubresse, C., Daniel-Vedele, F., Dechorgnat, J., Chardon, F., Gaufichon, L., & Suzuki, A. (2010). Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: Challenges for sustainable and productive agriculture [Absorción, asimilación y removilización de nitrógeno en plantas: Desafíos para una agricultura sostenible y productiva]. *Journal of Experimental Botany*, 61(5), 1285-1302.
- Mataix-Solera, J., & Cerdà, A. (2009). Efectos de los incendios forestales en los suelos. Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE).
- McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F., Morgan, C. A., Sinclair, L. A., & Wilkinson, R. G. (2022). *Animal Nutrition* (8th ed.).
- McGranahan, D. A., Fuhlendorf, S. D., Elmore, R. D., Engle, D. M., & Tollison, J. D. (2012). Forage nutritive value in response to patch-burning and cattle grazing on rangeland. *Grass and Forage Science*, 67(4), 515-524.
- Mendoza, L. H. (2023). Fisiología digestiva y neuroendocrina del ganado bovino: Mecanismos del hipotálamo y distensión ruminal (1.^a ed.). Editorial Académica Iberoamericana.
- Mertens, D. R. (1987). Predicting intake and digestibility using mathematical models of ruminal function [Predicción del consumo y digestibilidad utilizando modelos matemáticos de la función ruminal]. *Journal of Animal Science*, 64(5), 1548–1558.

- Mertens, D. R. (1994). Regulation of forage intake. En J. R. Fahey (Ed.), Forage Quality, Evaluation, and Utilization (pp. 450–493). American Society of Agronomy.
- Minson, D. J. (2015). Forage in Ruminant Nutrition (2nd ed.). Academic Press.
- Mizrahi, I., & Jami, E. (2021). The concerted interaction of microbes in the rumen for efficient lignocellulose degradation. *Frontiers in Microbiology*, 12, 654-668.
- Moore, K. J., & Jung, H. J. G. (2001). Lignin and fiber digestion. *Journal of Range Management*, 54(4), 421-430.
- Morales, K. E., Ortega, G. P., & Villalobos, S. J. (2025). Cinética de colonización bacteriana en tejidos tiernos post-incendio. En A. Mendoza (Ed.), *Nutrición animal avanzada en ecosistemas perturbados* (pp. 89-105).
- Moya-Rodríguez, A., & Cerrillo-Soto, M. A. (2020). Relación entre los componentes de la pared celular y la digestibilidad verdadera in vitro de leñosas nativas del Desierto Chihuahuense. *Archivos de Zootecnia*, 69(266), 184-192.
- Müller, D., & Leyser, O. (2011). Auxin, cytokinin and the control of shoot branching [Auxina, citoquinina y el control de la ramificación del brote]. *Annals of Botany*, 107(7), 1103-1112.
- Nocek, J. E., & Russell, J. B. (1988). Protein and carbohydrate as an alternative alternative for microbial synthesis in the rumen: a review. *Journal of Dairy Science*, 71(8), 2070-2099.
- Ott, J. P., Klimešová, J., & Hartnett, D. C. (2019). The role of belowground bud banks in vegetative regeneration and population maintenance of herbaceous plants [El papel de los bancos de yemas subterráneos en la regeneración vegetativa

- y el mantenimiento de las poblaciones de plantas herbáceas]. *Annals of Botany*, 123(7), 1099-1112.
- Raharjo, Y. C., Cheeke, P. R., Patton, N. M., & Supriyati, K. (1986). Evaluation of tropical forages and by-products as feeds for rabbits. *Journal of Applied Rabbit Research*, 9(2), 56-66.
- Ramírez, J. F., & Castro, M. L. (2022). Sincronización de energía y nitrógeno en el rumen: Impacto de las bacterias amilolíticas en la síntesis de proteína microbiana. *Journal of Rumen Physiology*, 28(4), 210-223.
- Ramírez, R. G. (2022). Nutrición del rumiante en pastoreo en las zonas áridas y semiáridas de México. *Ciencia UANL*, 25(109), 34-47.
- Ratnam, J., Sensenig, R., & Wilmschurst, J. (2022). Fire and forage quality: Postfire regrowth quality and pyric herbivory. *Ecology and Evolution*, 12(4), e8794.
- Ratnam, J., Sensenig, R., & Wilmschurst, J. (2022). Fire and forage quality: Postfire regrowth quality, nutrient loading and pyric herbivory. *Ecology and Evolution*, 12(4), e8794.
- Raynor, E. J., Baldwin, H. A., & McGranahan, D. A. (2022). Fire and forage quality: Postfire regrowth quality and pyric herbivory in savanna and grassland ecosystems. *Ecology and Evolution*, 12(4), e8794.
- Richards, J. H. (2020). Physiology of plants recovering from defoliation. *Plant and Soil*, 446(1), 15-32.
- Ríos, A. F., Silva, E. V., & Vargas, G. M. (2025). Cinética de pasaje y vaciado fisiológico del retículo-rumen en pasturas tiernas. En M. Gómez (Ed.), *Avances en nutrición de precisión para rumiantes* (pp. 210-235).

- Rosero, M., & Osorio, J. (2024). Efectos del fuego sobre características físicas, químicas y nutricionales del suelo en tierras de vocación forestal. *Maderas y Bosques*, 30(1), e3012509.
- Russell, J. B., & Dombrowski, D. B. (1980). Effect of pH on the efficiency of growth by pure cultures of rumen cellulolytic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 39(3), 604-610.
- Saito, K. (2004). Sulfur assimilatory metabolism. The long and smelling road. *Plant Physiology*, 136(1), 2443-2450.
- Sánchez, L. M., Gómez, H. F., & Torres, A. P. (2024). Cinética de fermentación de tejidos meristemáticos. En R. Silva (Ed.), *Microbiología del rumen y degradación de la fibra* (pp. 45-68).
- Smith, A. J., & Volenec, J. J. (2019). Carbohydrate and nitrogen reserves in the regrowth of perennial forage grasses. *Crop Science*, 59(4), 1345-1358.
- Spiess, J. W., Baldwin, T. J., & Rittenhouse, L. R. (2024). Prescribed fire increases forage mineral content in grazed rangeland [El fuego prescrito aumenta el contenido mineral del forraje en pastizales pastoreados]. *Fire Ecology*, 20(1), Artículo 9.
- Suárez, G. I., Marín, L. F., & Delgado, P. H. (2025). Gradientes osmóticos y economía enzimática extracelular en el líquido ruminal. En E. Ríos (Ed.), *Fisiología gastrointestinal de los rumiantes domésticos* (pp. 142-165).
- Tilley, J. M. A., & Terry, R. A. (1963). A two-stage technique for the *in vitro* digestion of forage crops. *Journal of the British Grassland Society*, 18(2), 104-111.

- Turner, M. G., Smithwick, E. A., & Johnstone, J. F. (2007). Inorganic nitrogen availability, root uptake kinetics and soil ammonium pulses after severe stand-replacing fires. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 104(12), 4782-4789.
- Valenzuela, J. E. (2023). *Dinámica de la digestión ruminal: Modelos de tasas de pasaje y degradación celular* (1.^a ed.). Editorial Universitaria Agropecuaria.
- Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional ecology of the ruminant* (2.^a ed.). Cornell University Press.
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition [Métodos para la fibra dietética, fibra detergente neutro y polisacáridos no estarcidos en relación con la nutrición animal]. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583–3597.
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. B. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597
- Veen, G. F., Blair, J. M., Smith, M. D., & Collins, S. L. (2014). Influence of fire frequency on forage quality in tallgrass prairie. *Plant Ecology*, 215(11), 1305-1315.
- Weimer, P. J. (2022). Degradation of Cellulose and Hemicellulose by Ruminal Microbes. *Microorganisms*, 10(12), 2345.