

CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS VETERINARIAS
MAESTRÍA INTERINSTITUCIONAL EN PRODUCCIÓN PECUARIA

TESIS

**Mejoramiento en la producción de sistemas intensivos lecheros mediante
la modificación de la altura de corte del ensilado de maíz.**

QUE PRESENTA

Ing. Francisco Javier Santoyo Ávila

COMITÉ

Tutor: Dr. Carlos Urbán Häubi Segura

Co-Tutor: Dr. Omar Iván Santana

Dr. José Antonio Hernández Marín

Dr. José de Jesús Olmos Colmenero

Jesús María, Aguascalientes a 29 de noviembre del 2024

AUTORIZACIONES

DR. LUIS FERNANDO CISNEROS GUZMÁN
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIA

PRESENTE

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **FRANCISCO JAVIER SANTOYO ÁVILA** con ID 103127 quien realizó la tesis titulada: **MEJORAMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DE SISTEMAS INTENSIVOS LECHEROS MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE LA ALTURA DE CORTE DEL ENSILADO DE MAÍZ**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 27 día de noviembre de 2024.



Carlos Urban Haubi Segura
Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19

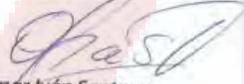
DR. LUIS FERNANDO CISNEROS GUZMÁN
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIA

PRESENTE

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **FRANCISCO JAVIER SANTOYO ÁVILA** con ID 103127 quien realizó la tesis titulada: **MEJORAMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DE SISTEMAS INTENSIVOS LECHEROS MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE LA ALTURA DE CORTE DEL ENSILADO DE MAÍZ**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 27 de noviembre de 2024.


Dr. Omar Iván Santana
Co-tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19

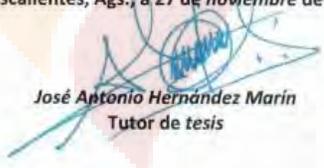
DR. LUIS FERNANDO CISNEROS GUZMÁN
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIA

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **FRANCISCO JAVIER SANTOYO ÁVILA** con ID **103127** quien realizó *la tesis* titulada: **MEJORAMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DE SISTEMAS INTENSIVOS LECHEROS MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE LA ALTURA DE CORTE DEL ENSILADO DE MAÍZ**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *él* pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 27 de noviembre de 2024.



José Antonio Hernández Marín
Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FQ-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19

DR. LUIS FERNANDO CISNEROS GUZMÁN
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIA

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **FRANCISCO JAVIER SANTOYO ÁVILA** con ID **103127** quien realizó la tesis titulada: **MEJORAMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DE SISTEMAS INTENSIVOS LECHEROS MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE LA ALTURA DE CORTE DEL ENSILADO DE MAÍZ**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *él* pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 27 de noviembre de 2024.



José de Jesús Olmos Colmenero
Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FQ.07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19



DICTAMEN DE LIBERACIÓN ACADÉMICA PARA INICIAR LOS TRÁMITES DEL EXAMEN DE GRADO



Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 29/11/2024

NOMBRE: FRANCISCO JAVIER SANTOYO ÁVILA ID: 103127

PROGRAMA: MAESTRÍA INTERINSTITUCIONAL EN PRODUCCIÓN PECUARIA LGAC (del posgrado): NUTRICIÓN ANIMAL

TIPO DE TRABAJO: (X) Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: Mejoramiento en la producción de sistemas intensivos lecheros mediante la modificación de la altura de corte del ensilado de maíz.

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): El trabajo analiza el impacto económico y ambiental de realizar los cortes del ensilado de maíz a mayor altura para reducir la proporción de fibra no digestible, mejorando la calidad nutritiva del forraje y la producción de leche, así como aumentar el residuo en campo y mejorar la materia orgánica del suelo.

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN	CORRESPONDA:
Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:					
SI					El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI					La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI					Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI					Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI					Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI					El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI					Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI					Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI					Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
El egresado cumple con lo siguiente:					
SI					Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI					Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI					Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
N.A.					Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI					Coincide con el título y objetivo registrado
SI					Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI					Tiene el CVU del Conacyt actualizado
SI					Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
En caso de Tesis por artículos científicos publicados					
N.A.					Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.					El estudiante es el primer autor
N.A.					El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.					En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.					Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.					La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado: SI No

FIRMAS

Elaboró: * NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN: Dr. Carlos Urban Haubi Segura

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO: Dra. Rosa María Meléndez Soto

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó: NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO: Dr. Emmanuel Hernández Valdivia

Autorizó: NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO: Dr. Luis Fernando Cisneros Guzmán

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cerrar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, iniciar el seguimiento de los planes.

Elaborado por: D. Apoyo al Posg.
Revisado por: B. Control Escolar/O. Gestión de Calidad.
Aprobado por: D. Control Escolar/ D. Apoyo al Posg.

Código: DO-SES-FO-19
Actualización: 05
Emisión: 20/04/20

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer al Concejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico brindado durante mi maestría.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el soporte económico y de infraestructura dado a mi proyecto de investigación.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA) por haberme dado la oportunidad de llevar a cabo mis estudios de maestría.

Al Dr. Omar Iván Santana y Dr. Carlos Urbán Häubi Segura, quienes con su dirección y apoyo en mi proyecto de investigación y clases aportaron de gran forma al desarrollo del proyecto y mi formación profesional y personal.

Al Dr. José Antonio Hernández Marín y Dr. José de Jesús Olmos Colmenero por sus comentarios y sugerencias al formar parte de mi comité de evaluación.

De forma especial me gustaría agradecer al MVZ. Jorge Luis Santoyo Rangel y a Rancho Los Arquitos S.P.R. de R.L., por facilitar su infraestructura y su tiempo para llevar a cabo este trabajo.

En general, agradezco a todas las personas que de una u otra forma estuvieron involucradas y que con su apoyo fue posible llevar a buen término este proceso formativo que culminó con este documento.

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de vivir.

A mi madre la Mtra. Raquel Ávila Quezada (†), quien desde el cielo no ha dejado de alentarme y apoyarme en cada decisión que tomo en mi vida; de igual forma, a mi padre el Sr. Francisco Javier Santoyo Rangel quien a su manera me ha transmitido el amor a la tierra y a valorar actividades tan nobles como la agricultura y la ganadería, además de apoyarme siempre y tenerme la paciencia necesaria para lograr mis objetivos.

A mis hermanas Cecilia, Leslie y Grace; que encuentren motivación y entusiasmo para lograr sus metas y mantengan siempre un espíritu de superación.

A mis abuelos el Sr. Rubén Santoyo Delgado y la Sra. Ma. Del Carmen Rangel Delgado; que gracias a su trabajo y tesón al formar la familia de la que soy parte, establecieron los cimientos que hoy me permiten a mi llegar a cumplir esta meta académica; gracias por su esfuerzo que hoy trasciende.

A mi esposa Diana; gracias por tu apoyo, dedicación y devoción a nuestro matrimonio que es la base de nuestra familia y el cimiento que estamos construyendo a quienes nos seguirán.
TE AMO.

A mis hijos, Elizabeth y Alonso; que este trabajo sirva de inspiración para su superación como personas y profesionistas futuros; para que sean personas de bien y con valores fuertes.
LOS AMO.

ÍNDICE GENERAL

	Página
ÍNDICE GENERAL	1
ÍNDICE DE CUADROS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ACRÓNIMOS	7
RESUMEN	9
ABSTRACT.....	12
I. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1. JUSTIFICACIÓN	18
1.2. HIPÓTESIS.....	19
1.2.1. Pregunta científica.....	19
1.2.2. Hipótesis General.....	19
1.2.3. Hipótesis Específicas	19
1.3. OBJETIVOS	20
1.3.1. Objetivo General.....	20
1.3.2. Objetivos Específicos.....	20
II. MARCO TEÓRICO	21
2.1. EL CULTIVO DE MAÍZ Y SU IMPORTANCIA COMO FORRAJE	21
2.1.1. Importancia del maíz en el Mundo, México y Aguascalientes.	21
2.1.2. Descripción del cultivo de maíz.....	25
2.1.3. El uso del maíz como forraje.	27
2.2. LA PRODUCCIÓN LECHERA Y SU IMPORTANCIA EN LA ALIMENTACIÓN HUMANA.....	31
2.2.1. Importancia de la producción lechera en el Mundo, México y Aguascalientes.	31
2.2.2. Sistemas de producción lechera	35
2.2.3. Principales razas productoras de leche.....	36
2.3. LA ALIMENTACIÓN DEL GANADO LECHERO	38

2.3.1.	Morfofisiología del sistema digestivo en la vaca lechera.	38
2.3.2.	Consumo de Materia Seca.....	40
2.3.3.	Carbohidratos en la dieta del ganado lechero.	43
2.3.4.	Proteína en la dieta del ganado lechero.....	46
2.4.	EL ESTIERCOL Y EL RESIDUO DE COSECHA, LOS BENEFICIOS AL SUELO.	48
2.4.1.	Consideraciones básicas de los residuos de cosecha en el suelo.	48
2.4.2.	Consideraciones básicas de los estiércoles en el suelo.	50
III.	ESTUDIOS.....	52
3.1.	METODOLOGÍA GENERAL.....	52
3.1.1.	Ubicación	52
3.1.2.	Material biológico vegetal.....	52
3.1.3.	Material biológico animal	52
3.1.4.	Instalaciones y equipo agrícola	52
3.1.5.	Instalaciones y equipo pecuario	53
3.1.6.	Instalaciones y equipo de laboratorio.....	53
3.1.7.	Resumen de las etapas metodológicas	54
3.2.	ESTUDIO 1. ENSILADO DE MAÍZ COSECHADO A DIFERENTES ALTURAS DE CORTE. Rendimiento, composición bromatológica, digestibilidad y perfil de fermentación.	56
3.2.1.	Introducción.	56
3.2.2.	Materiales y Métodos.....	57
3.2.3.	Resultados y Discusiones.....	61
3.2.4.	Conclusiones.	67
3.3.	ESTUDIO 2. PRODUCCIÓN DE LECHE. Ensilado de maíz cosechado a diferentes alturas de corte y su efecto en vacas lecheras alimentadas con dos BPM.	68
3.3.1.	Introducción.	68
3.3.2.	Materiales y Métodos.....	69
3.3.3.	Resultados y Discusiones.....	75
3.3.4.	Conclusiones.	78

3.4.	ESTUDIO 3. MANEJO DEL SUELO AGRÍCOLA. Ensilado de maíz cosechado a diferentes alturas de corte. Uso del estiércol de vaca y su interacción con los residuos de la cosecha anterior.	79
3.4.1.	Introducción.	79
3.4.2.	Materiales y Métodos.	80
3.4.3.	Resultados y Discusiones.	84
3.4.4.	Conclusiones.	86
3.5.	IMPLICACIONES ECONÓMICAS. Análisis del impacto económico de elevar la altura de corte en el ensilado de maíz para la alimentación del ganado lechero.	87
3.5.1.	Introducción.	87
3.5.2.	Materiales y Métodos.	88
3.5.3.	Resultados y Discusiones.	90
3.5.4.	Conclusiones.	92
IV.	DISCUSIÓN GENERAL	93
V.	CONCLUSIÓN GENERAL	95
VI.	BIBLIOGRAFÍA	96

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 2-1. Principales microorganismos presentes en el rumen, sustrato y productos que se obtienen de sus procesos metabólicos.....	39
Cuadro 3-2. Concentración y rendimiento de MS de planta completa y tallo remanente, en respuesta a la altura de corte en cosecha.....	62
Cuadro 3-3. Composición química y rendimiento de nutrientes del ensilado de planta completa y tallo remanente del maíz cosechado a tres alturas de corte.....	63
Cuadro 3-4. Digestibilidad de la MS y FDN de la planta completa y tallo remanente del ensilado de maíz cosechado a diferentes alturas de corte.....	65
Cuadro 3-5. Perfil de fermentación de la planta completa y tallo remanente del ensilado de maíz cosechado a tres alturas de corte.....	67
Cuadro 3-6. Matriz de distribución de las dietas por corral y período experimental.....	70
Cuadro 3-7. Ingredientes y composición química de las dietas usadas en el Estudio 2.....	71
Cuadro 3-8. Composición nutrimental de los forrajes usados en las dietas del Estudio 2.....	72
Cuadro 3-9. Efectos de la interacción de dos ensilados de maíz con dos BPM en el consumo, la producción y composición de leche a nivel corral.....	76
Cuadro 3-10. Digestibilidad aparente y balance de nitrógeno de las dietas del Experimento 2.....	77
Cuadro 3-11. Rendimiento y composición química de la planta de maíz trabajada con diferentes niveles de residuo de cosecha y estiércol.....	84
Cuadro 3-12. Efectos del residuo de cosecha y el estiércol sobre el suelo.....	86
Cuadro 3-13. Costos de la producción de la MS del E1.....	88
Cuadro 3-14. Costos de alimentación de las vacas utilizadas en el E2, precio de insumos ajustados con la ecuación de Petersen (St-Pierre, 2000).....	90
Cuadro 3-15. Análisis económico de la producción del E1.....	91
Cuadro 3-16. Análisis económico de la producción del E2 en base a MS y el valor nutrimental del ensilado de maíz (St-Pierre, 2000).....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2-1. Superficie y rendimiento cosechado a nivel mundial del cultivo de maíz en los últimos 20 años (FAO, 2024).....	21
Figura 2-2. Producción mundial de los principales cereales para el año 2022 (FAO, 2024).	22
Figura 2-3. Principales países productores de maíz del 2020 al 2023 y su rendimiento promedio de grano (FAO, 2024).....	23
Figura 2-4. Evolución en los últimos 20 años de la superficie de riego en hectáreas cosechadas de maíz forrajero y alfalfa para la cuenca lechera de Aguascalientes, comprendiendo el DDR Aguascalientes, Lagos de Moreno y Ojocaliente (SIAP, 2024).	24
Figura 2-5. Rendimiento promedio por lactancia y producción media anual de leche fluida de los 14 principales productores a nivel mundial, promedios del 2021 – 2023 (Elaboración propia. FAO, 2024).....	32
Figura 2-6. Producción media anual en los principales estados productores de leche de vaca en México, del 2021 al 2023.....	33
Figura 2-7. Producción de leche para el año 2023 de las principales cuencas lecheras del país.	34
Figura 2-8. Esquema energético del ganado lechero.	41
Figura 2-9. Fracciones de los carbohidratos presenten en los alimentos.....	45
Figura 2-10. Flujo del N utilizado por los rumiantes.....	47
Figura 2-11. Proceso de la producción de nitratos en el suelo por la acción de microorganismos.....	49
Figura 3-12. Diagrama de flujo de las etapas metodológicas.....	55
Figura 3-13. Datos climáticos registrados durante el periodo experimental (26 de mayo al 22 de octubre del 2022).....	57
Figura 3-14. Comportamiento diario y acumulado de las Unidades Calor ($UC=(T_{max} + T_{min})/2 - T_{base}$)durante el periodo experimental (26 de mayo al 22 de octubre del 2022).	59

Figura 3-15. Esquema de corte de planta completa y tallo remanente en cada uno de los tratamientos del E1.60

Figura 3-16. Curva de degradabilidad de la MS de los tres tratamientos del E1.....66

Figura 3-17. Datos climáticos registrados durante el periodo experimental (25 de mayo al 12 de octubre del 2023).....81

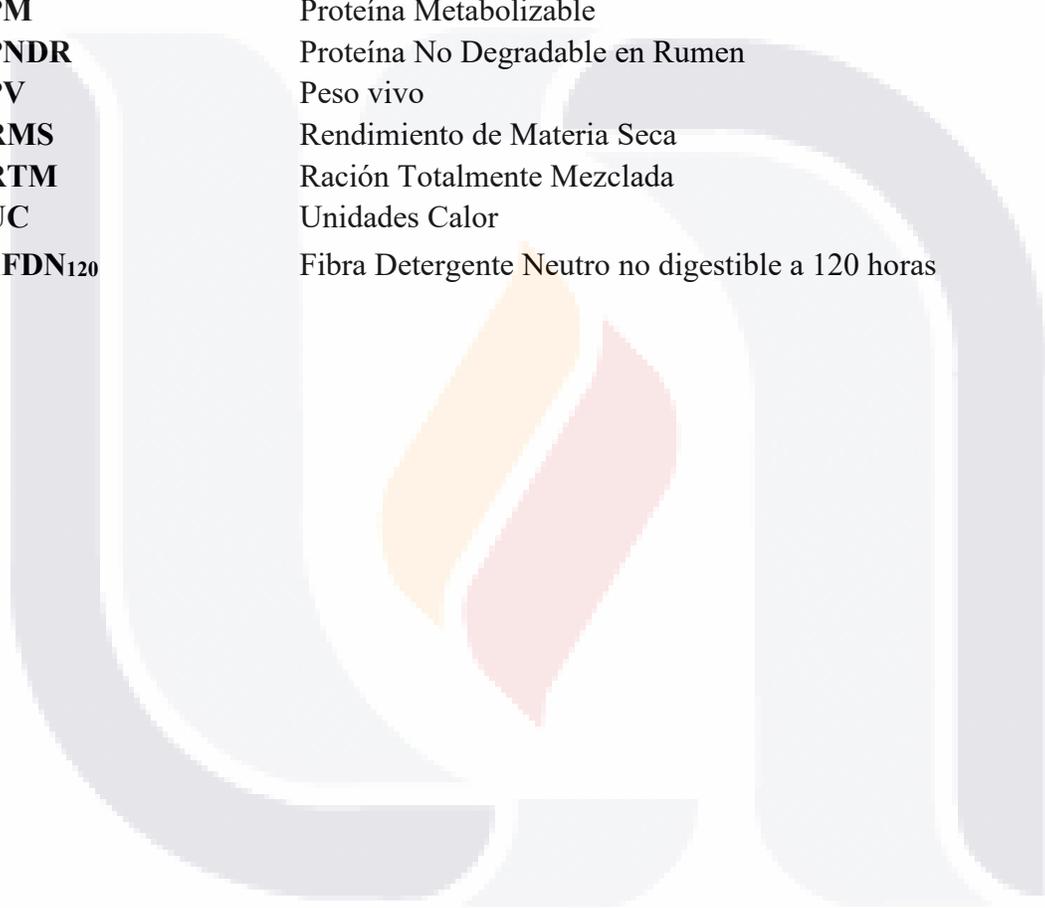
Figura 3-18. Comportamiento diario y acumulado de las Unidades Calor $UC = ((T_{max} + T_{min})/2) - T_{base}$ durante el período experimental (25 de mayo al 12 de octubre del 2023).83



ACRÓNIMOS

AA	Aminoácidos
AG	Ácidos Grasos
AGV	Ácidos Grasos Volátiles
BAA	Bacterias Acido Acéticas
BAL	Bacterias Acido Lácticas
BMR	Nervadura Café (Brown Mid-Rib)
BN	Balance de Nitrógeno
C	Carbono
CMS	Consumo de Materia Seca
CNF	Carbohidratos No Fibrosos
CO₂	Dióxido de Carbono
DATT	Digestibilidad aparente del tracto total
DDR	Distrito de desarrollo rural
DDS	Días después de la siembra
DFDN	Digestibilidad de la Fibra Detergente Neutro
EB	Energía Bruta
ED	Energía Digestible
EM	Energía Metabolizable
EN	Energía Neta
EN_L	Energía Neta de Lactancia
Et₀	Evapotranspiración
FDN	Fibra Detergente Neutro
FDN_{fe}	Fibra Detergente Neutro físicamente efectiva
FDN_i	Fibra detergente neutro indigerible
FDNSA	Fibra Detergente Neutro Soluble en Agua
H₂SO₄	Ácido Sulfúrico
HCL	Ácido Clorhídrico
IC	Incremento Calórico
K⁺	Potasio
LDA	Lignina Detergente Ácido
MAP	Fosfato monoamónico (Monoammonium Phosphate)
MS	Materia Seca
msnm	metros sobre el nivel del mar
N	Nitrógeno
NH₃	Amoniaco
NH₄	Amonio
NNP	Nitrógeno no proteico

O₂	Oxígeno
P	Fósforo
P₂O₅	Pentóxido de fósforo
PC	Proteína
PC	Proteína Cruda
PCM	Proteína Cruda Microbiana
PDR	Proteína degradable en rumen
pH	potencial de Hidrógeno
PM	Proteína Metabolizable
PNDR	Proteína No Degradable en Rumen
PV	Peso vivo
RMS	Rendimiento de Materia Seca
RTM	Ración Totalmente Mezclada
UC	Unidades Calor
uFDN₁₂₀	Fibra Detergente Neutro no digestible a 120 horas



RESUMEN

Este trabajo consta de tres estudios para evaluar el efecto de elevar la altura de corte en el ensilado de maíz a nivel parcela y establo. El primer estudio se centró en el rendimiento, calidad nutricional, perfil fermentativo y digestibilidad de ensilados de maíz cosechados a alturas de corte de 20, 30 y 40 cm. Para el segundo estudio se evaluó el efecto de alimentar al ganado lechero con ensilados de maíz cosechados a alturas de corte de 18 cm y 35 cm y su interacción con niveles de PM de 2,830 vs 2,680 g d⁻¹; con esto se determinó el impacto en la producción y calidad de leche, así como el balance de N y la digestibilidad aparente. En el tercer estudio se hizo una exploración preliminar sobre el efecto de los estiércoles de las vacas alimentadas con ensilados cosechados a 18 cm y 35 cm, así como su interacción con los residuos de cosecha de estos ensilados. Finalmente se realizó un estudio económico para determinar el impacto que tiene elevar la altura de corte a cosecha del ensilado de maíz en un sistema intensivo lechero.

Estudio 1. El objetivo para el primer estudio fue evaluar el ensilado de maíz cosechado a 20, 30 y 40 cm alturas de corte en su rendimiento, calidad forrajera, digestibilidad y perfil de fermentación. Se planteó la hipótesis de que la calidad nutricional y degradabilidad ruminal del ensilado de maíz incrementa al elevar la altura de corte a cosecha. No hubo diferencias en el RMS con un promedio de 14.4 ± 2.9 t ha⁻¹; sin embargo, el contenido de MS tendió a incrementar cuando se elevó la altura de corte con un promedio de $31.7 \pm 2.8\%$. En el análisis bromatológico no hubo diferencias en PC con $7.4 \pm 0.7\%$ y ENL con un promedio de $24,227 \pm 2,752$ Mcal ha⁻¹; sin embargo, la FDN disminuyó 4.8 % al aumentar la altura de corte a 30 cm, la FDA disminuyó 3.3 % al elevar la altura de corte a 40 cm y la lignina tendió a disminuir 0.2 % al elevar la altura de corte a 40 cm, los CNF aumentaron 5.3 % al elevar la altura a 30 cm y las cenizas disminuyeron en 1.3 % al elevar la altura de corte de 30 a 40 cm, el contenido de energía aumentó 0.10 Mcal kg⁻¹. La DMS aumentó a 24, 48 y 120 horas 2.8, 2.9 y 1.2 % respectivamente, de igual forma la DFDN aumentó a las 24 y 48 horas 0.9 y 1.7 % respectivamente, sin tener diferencias en la FDNND con un promedio de $28.3 \pm 3.36\%$ respecto a la FDN. En el perfil de fermentación no hubo diferencias en pH ni en N-NH₃ con

un promedio de 4 ± 0.2 y 0.3 ± 0.08 % respectivamente. El análisis de estos datos sugirió que elevar la altura de corte en el ensilado de maíz es viable hasta los 30 cm.

Estudio 2. El objetivo en el segundo estudio fue evaluar el efecto en producción, composición de la leche, digestibilidad aparente y BN de alimentar vacas con ensilado de maíz cosechado a 18 y 35 cm y su interacción con dos niveles de PM (2,830 vs 2,680 g d⁻¹). Para este estudio se planteó la hipótesis de que al utilizar ensilado de maíz cosechado a mayor altura de corte en la dieta del ganado lechero se incrementa el aprovechamiento de la proteína en la dieta, la producción de leche y su composición. No se detectaron diferencias en el CMS, CMO, CFDN y CPC con un promedio de 24.7 ± 1.9 kg vaca-d⁻¹, 23.35 ± 1.8 kg vaca-d⁻¹, 6.84 ± 0.55 kg vaca-d⁻¹, 4.14 ± 0.31 kg vaca-d⁻¹, respectivamente. En la producción de leche se encontró un aumento de 1 kg vaca-d⁻¹ en las dietas donde se utilizó ensilado de maíz cosechado a mayor altura de corte, y se mantuvo una tendencia al hacer la corrección en energía sin tener una diferencia en la ECA con promedio de 1.56 ± 0.13 . La concentración de grasa fue mayor con 0.06 % al utilizar dietas con menor PM. La digestibilidad aparente de la FDN fue mayor por 2 unidades al alimentar a las vacas con dietas que contenían ensilado de maíz cosechado a 35 cm sobre el suelo. En el BN no hubo diferencias entre tratamientos, pero se detectó una partición de N en leche con 182 ± 51.2 g d⁻¹, en heces con 251 ± 83.7 g d⁻¹ y en orina con 188 ± 102.2 g d⁻¹. Por lo analizado en estos datos se observó que utilizar ensilado de maíz cosechados a mayor altura de corte en la dieta de las vacas incrementa la producción sin tener efectos sobre su composición.

Estudio 3. En el estudio tres se planteó como objetivo evaluar el efecto productivo del estiércol de vaca en su interacción con los residuos de cosecha al elevar la altura de corte del ensilado de maíz. Se estableció la hipótesis de que al aplicar estiércol en un suelo agrícola con mayor cantidad de residuos de cosecha se incrementa su productividad. El RMS tendió a incrementarse en un 14 % en los tratamientos donde se dejó el residuo de cosecha AC35, sin que esto modificara la MS entre tratamientos con una media de 30.1 ± 3.27 %. En la composición química del forraje se observó un aumento de 0.4 unidades de PC donde se aplicó estiércol, la FDN disminuyó 4.6 unidades en donde hubo residuos de cosecha del maíz cortado a 35 cm, sin afectar al contenido de FDA, lignina y cenizas con un promedio de 19.2

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

$\pm 3.4 \%$, $2.8 \pm 0.6 \%$ y $5.1 \pm 1.1 \%$ respectivamente, en respuesta a la disminución de FDN los CNF aumentaron 4.3 unidades en las parcelas donde hubo residuos de cosecha del maíz cortado a 35 cm, manteniendo la tendencia a aumentar la energía con un promedio de 2,591 Mcal ha⁻¹. En el suelo solo se detectaron diferencias en la concentración de P con un aumento de hasta 30.7 ppm donde se aplicó estiércol, mientras que no hubo diferencias en DA, pH, CE y MO con promedio de $1.45 \pm 0.04 \text{ g cm}^3$, 8.4 ± 0.12 , $4.4 \pm 0.72 \text{ dS m}^{-1}$ y $2.86 \pm 0.55 \%$ respectivamente. Según lo analizado en este trabajo, los residuos de cosecha tienen mayor efecto en la productividad del suelo que los estiércoles.

Estudio 4. El objetivo para el último estudio fue determinar el impacto económico en el establo y la producción agrícola del uso de cuatro dietas usando dos niveles de proteína metabolizable (2,830 y 2,680 g d⁻¹) y ensilados de maíz cosechados a dos alturas de corte (18 y 35 cm). Se planteó la hipótesis de que al elevar la altura de corte en el ensilado de maíz se incrementa la rentabilidad en los sistemas intensivos lecheros que producen sus propias pasturas. Se obtuvo un ROI mayor en AC30 con 56.5 % contra AC20 con 51.5 % al calcular con la ecuación de Petersen los costos de producción y valor de los ingresos. Mientras que en la dieta B con ensilado de maíz AC35 y PM-B se tuvo el mayor ISCA con \$160.3 contra el control que fue la dieta C con \$151.0 con un diferencial de 6.2% más de ingreso en la dieta B. Debido a lo que se observó se puede decir que elevar la altura de corte en el ensilado de maíz es una práctica económicamente viable.

ABSTRACT

This work consists of three studies to evaluate the effect of raising the cutting height of corn silage at the plot and barn level. The first study focused on the yield, nutritional quality, fermentation profile and digestibility of corn silage harvested at cutting heights of 20, 30 and 40 cm. For the second study, the effect of feeding dairy cattle with corn silage harvested at cutting heights of 18 cm and 35 cm and its interaction with MP levels of 2,830 vs 2,680 g d⁻¹ was evaluated; with this, the impact on milk production and quality, as well as N balance and apparent digestibility, was determined. In the third study, a preliminary exploration was made on the effect of manure from cows fed with silage harvested at 18 cm and 35 cm, as well as its interaction with the harvest residues of these silages. Finally, an economic study was conducted to determine the impact of raising the cutting height at harvest of corn silage in an intensive dairy system.

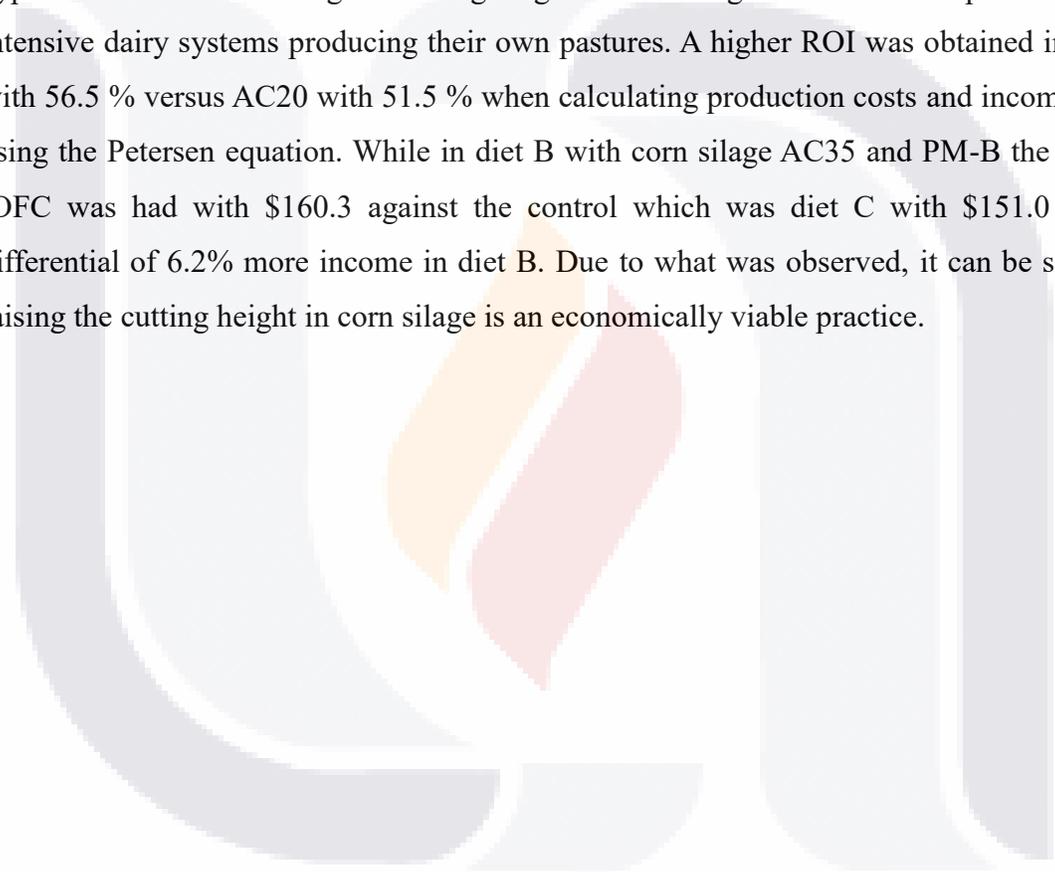
Study 1. The objective of the first study was to evaluate corn silage harvested at 20, 30, and 40 cm cutting heights for yield, forage quality, digestibility, and fermentation profile. It was hypothesized that the nutritional quality and ruminal degradability of corn silage would increase with increasing cutting height at harvest. There were no differences in DMY with an average of 14.4 ± 2.9 t ha⁻¹; however, DM content tended to increase with increasing cutting height with an average of 31.7 ± 2.8 %. In the bromatological analysis there were no differences in PC with 7.4 ± 0.7 % and NEL with an average of $24,227 \pm 2,752$ Mcal ha⁻¹; However, the NDF decreased 4.8 % when increasing the cutting height to 30 cm, the ADF decreased 3.3 % when raising the cutting height to 40 cm and the lignin tended to decrease 0.2 % when raising the cutting height to 40 cm, the NFC increased 5.3 % when raising the height to 30 cm and the ash decreased by 1.3 % when raising the cutting height from 30 to 40 cm, the energy content increased 0.10 Mcal kg⁻¹. The DMS increased at 24, 48 and 120 hours 2.8, 2.9 and 1.2 % respectively, likewise the DNDF increased at 24 and 48 hours 0.9 and 1.7 % respectively, without differences in the NDNDF with an average of 28.3 ± 3.36 % with respect to the NDF. In the fermentation profile there were no differences in pH or N-NH₃ with an average of 4 ± 0.2 and 0.3 ± 0.08 % respectively. The analysis of these data suggested that increasing the cutting height in corn silage is feasible up to 30 cm.

Study 2. The objective of the second study was to evaluate the effect on production, milk composition, apparent digestibility, and NB of feeding cows corn silage harvested at 18 and 35 cm and its interaction with two levels of MP (2,830 vs 2,680 g d⁻¹). For this study, it was hypothesized that using corn silage harvested at a higher cutting height in the diet of dairy cattle increases dietary protein utilization, milk production, and milk composition. No differences were detected in DMI, MOC, NDFC, and CPC with an average of 24.7 ± 1.9 kg cow-d⁻¹, 23.35 ± 1.8 kg cow-d⁻¹, 6.84 ± 0.55 kg cow-d⁻¹, and 4.14 ± 0.31 kg cow-d⁻¹, respectively. In milk production, an increase of 1 kg cow-d⁻¹ was found in diets where corn silage harvested at a higher cutting height was used, and a trend was maintained when correcting for energy without having a difference in the FCE with an average of 1.56 ± 0.13. The fat concentration was higher with 0.06 % when using diets with lower MP. The apparent digestibility of the NDF was higher by 2 units when feeding cows with diets containing corn silage harvested at 35 cm above ground. In the NB there were no differences between treatments, but a partition of N was detected in milk with 182 ± 51.2 g d⁻¹, in feces with 251 ± 83.7 g d⁻¹ and in urine with 188 ± 102.2 g d⁻¹. Based on the analysis of these data, it was observed that using corn silage harvested at a higher cutting height in the diet of cows increases production without having any effect on its composition.

Study 3. In study three, the objective was to evaluate the productive effect of cow manure in its interaction with crop residues by raising the cutting height of corn silage. The hypothesis was established that applying manure to agricultural soil with a greater amount of crop residue increases its productivity. The DMY tended to increase by 14 % in the treatments where the AC35 crop residue was left, without this modifying the DM between treatments with an average of 30.1 ± 3.27 %. In the chemical composition of the forage, an increase of 0.4 CP units was observed where manure was applied, the NDF decreased 4.6 units where there were crop residues from corn cut at 35 cm, without affecting the content of ADF, lignin and ash with an average of 19.2 ± 3.4 %, 2.8 ± 0.6 % and 5.1 ± 1.1 % respectively, in response to the decrease in NDF, the NFC increased 4.3 units in the plots where there were crop residues from corn cut at 35 cm, maintaining the tendency to increase energy with an average of 2,591 Mcal ha⁻¹. In the soil, differences were only detected in the concentration of P with an increase of up to 30.7 ppm where manure was applied, while there were no differences in

AD, pH, CE and OM with an average of $1.45 \pm 0.04 \text{ g cm}^3$, 8.4 ± 0.12 , $4.4 \pm 0.72 \text{ dS m}^{-1}$ and $2.86 \pm 0.55 \%$ respectively. As analyzed in this work, crop residues have a greater effect on soil productivity than manure.

Study 4. The objective of the final study was to determine the economic impact on farm and cattle production of using four diets using two levels of metabolizable protein (2,830 and 2,680 g d^{-1}) and corn silage harvested at two cutting heights (18 and 35 cm). It was hypothesized that increasing the cutting height of corn silage would increase profitability in intensive dairy systems producing their own pastures. A higher ROI was obtained in AC30 with 56.5 % versus AC20 with 51.5 % when calculating production costs and income value using the Petersen equation. While in diet B with corn silage AC35 and PM-B the highest IOFC was had with \$160.3 against the control which was diet C with \$151.0 with a differential of 6.2% more income in diet B. Due to what was observed, it can be said that raising the cutting height in corn silage is an economically viable practice.



I. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es un cultivo originario de América Central con una gran adaptabilidad a diferentes ambientes que van desde las costas hasta más de los dos mil metros sobre el nivel del mar; esto lo convierte en el grano de mayor importancia en términos de producción en todo el mundo (Steduto *et al.*, 2012). Al ser una planta C4, garantiza una alta producción de biomasa con buena eficiencia en el uso del agua y aprovechamiento de la radiación, además de aportar grandes beneficios al suelo al aumentar su relación de carbono (C) y nitrógeno (N), lo que lo hace un cultivo con mayor importancia en zonas semiáridas (Otegui *et al.*, 2021). El aumento en el rendimiento de este cultivo desde las últimas dos décadas del siglo XX a la fecha se debe al trabajo realizado en su mejoramiento genético y amplia investigación en las prácticas de manejo. Los principales países consumidores de este cultivo, entre los que se encuentra México, destinan más del 63% para el consumo animal; teniendo un crecimiento en su demanda a una tasa media anual del 1.5% en los últimos cinco años (FIRA, 2024).

Con el paso del tiempo el manejo del cultivo de maíz ha ido evolucionando hasta convertirse en uno de los monocultivos de mayor extensión en el mundo, esto junto a las diferentes prácticas de labranza, ha configurado las condiciones del suelo. En el caso de México, con la llegada de los españoles su cultivo se incrementó, ya que con la introducción del arado se logró trabajar terrenos arcillosos que antes eran imposibles para la coa, instrumento parecido a la pala, pero más estrecho, que se usaba para abrir pequeños hoyos y poder sembrar (Kato *et al.*, 2009), afectando con esto la fertilidad natural de los suelos. La calidad del suelo está dada por diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuales en conjunto deben dotarlo de la capacidad de captar, mantener y liberar nutrientes y agua a las plantas, recargar el manto freático y en general mantener la actividad biológica sobre él (Navarro & Navarro, 2013); debido a las prácticas utilizadas en la agricultura y ganadería intensiva es indispensable suministrar nutrientes para mantener una fertilidad adquirida. Uno de los principales indicadores de calidad y fertilidad en el suelo son los compuestos orgánicos; específicamente la materia orgánica, que es esencialmente la descomposición de plantas y animales en el suelo donde se recircula el N en forma amoniacal y después se oxida a nitrato, mientras el C es asimilado dentro del tejido microbiano del suelo y otra parte se descompone

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

hasta convertirse en humus, estos componentes provienen principalmente de lignina y polisacáridos como la celulosa y hemicelulosa (Weil & Magdoff, 2004).

Además de las prácticas agrícolas, la conquista de América trajo consigo la ganadería que, si bien llegó por las costas del golfo de México, se distribuyó en todo el territorio por los diferentes marquesados. Esencialmente se habla del ganado cimarrón (*Bos taurus ibericus*), considerando como orígenes del ganado americano las tierras altas de las Islas Británicas, el oeste de la península Ibérica y las estepas subsaharianas del occidente africano (Barrera, 1996). Para el siglo XVII se identificaban tres variedades: el ganado chichigua que era lechero y estabulado, el ganado rodeano que se criaba en un sistema de semi pastoreo y el ganado montaraz que se mantenía en estado salvaje (Laborde & Sánchez-Ríos, 2004); la finalidad de importar este ganado fue aprovechar los recursos a veces tan diversos y en ocasiones tan limitados que ofrecía el basto nuevo mundo, este ganado debía aprovechar desde grandes pastizales, cactáceas y algunos arbustos que al ramonear pudieran obtener alimento en épocas de malas condiciones en los potreros.

Estas circunstancias en la ganadería nacional se mantuvieron hasta principios del siglo XX, cuando debido al crecimiento de los centros urbanos, la llegada de nuevas tecnologías que permitieron refrigerar y conservar productos de demanda creciente como la leche y carne, y la importación de razas lecheras; principalmente de EE. UU., siendo la raza Holstein – Friesian la más importante (Holstein de México, 2024), se consolidó a partir del año 1940 la lechería comercial en México. Esta raza originaria del norte de los Países Bajos fue importada a América a mediados del siglo XVIII por Winthrop Chenery y de inmediato se diseminó por Massachusetts y sus alrededores debido a su alta producción y adaptabilidad a los climas templados e incluso áridos (Elicher, 2014).

Su buen desarrollo en clima templado y templado semiseco provocó que su adaptación en zonas del semiárido mexicano fuera inmediata, su alta producción y fácil manejo son características que la han posicionado como la principal raza productora de leche en México (Gasque & Blanco, 2001). Sin embargo, al no estar su explotación en zonas con abundante precipitación y buenos pastizales obliga a mantenerlas principalmente en sistemas de producción intensivo o semi intensivo, donde el aporte de granos y forrajes juega un papel

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

fundamental para su producción y rentabilidad (CEA, 2001). Bajo estos sistemas el suministro del ensilado de maíz se ha vuelto tan importante que representa por lo menos un 40% de la dieta del ganado lechero en producción (Adesogan *et al.*, 2019) impactando de forma directa en el costo de alimentación, y de forma indirecta en el aprovechamiento de otros insumos como las fuentes de proteína que también representan grandes porcentajes del costo alimenticio, ya que puede modificar su degradación como parte de la ración totalmente mezclada (RTM) al disminuir la velocidad de paso por su contenido de fibras y tamaño de partícula (Orskov, 1988).

Si bien la producción de maíz es buena en donde se han establecido las principales zonas de explotación lechera como La Laguna, Chihuahua, la región de Aguascalientes y El Bajío, y sus condiciones lo propicia como la mejor opción de cultivo forrajero en estos sistemas, debemos considerar sus limitantes. Al ser una gramínea, el contenido de fibras y la digestibilidad de éstas es un factor que se debe tomar en cuenta para su máximo aprovechamiento como cultivo forrajero (Van Soest, 1994). Específicamente la lignina es el componente de la Fibra Detergente Neutro (FDN) considerado como el principal obstáculo para la digestibilidad de las fibras ya que disminuye la accesibilidad de ciertas enzimas requeridas para la hidrólisis (Bansal *et al.*, 2009). Esto se puede considerar un problema ya que las fibras y su digestibilidad pueden ser limitante para el consumo de materia seca y por lo tanto afectar directamente la producción del ganado lechero (Oba & Allen, 1999), además de limitar el aprovechamiento de otros componentes como la proteína en la dieta y la producción de Proteína Cruda Metabolizable (PCM) en el rumen (Firkins *et al.*, 1998).

1.1. JUSTIFICACIÓN

Como una proyección de la ganadería a futuro, lo que respecta a la alimentación del ganado lechero se deben enfocar los esfuerzos en aumentar la digestibilidad de la ración y producir forrajes manteniendo una visión de mejoramiento de la fertilidad del suelo (Britt *et al.*, 2018). Las principales estrategias en las que se ha trabajado para mejorar la digestibilidad del maíz forrajero van desde aspectos genéticos como el maíz de nervadura café (BMR, por sus siglas en inglés), químico-biológicos como el uso de levaduras y enzimas, o mecánicos como el tamaño de partícula de los ensilajes (Adesogan *et al.*, 2019). Por otra parte, es importante considerar la altura de corte al momento de la cosecha como una herramienta que puede aportar mayor digestibilidad de la FDN y nutrientes al ganado lechero (Ferraretto *et al.*, 2018), además de contribuir al manejo de la fertilidad de los suelos agrícolas, ya que junto a diferentes estrategias en el manejo del cultivo como el buen uso de los estiércoles, rotación de cultivos y cultivos de cobertura pueden aportar a la mejora de ciertas propiedades del suelo mitigando la pérdida de biomasa al dejar en el suelo una fracción mayor de la planta total al momento de su ensilaje (Jokela *et al.*, 2009), todo esto sin descuidar el aspecto económico de la producción. Es por esto, que evaluar los efectos de elevar la altura de corte a cosecha en el ensilaje de maíz, puede tener un impacto positivo en los sistemas productivos de leche, sin requerir de grandes inversiones o sofisticadas herramientas.

1.2. HIPÓTESIS

1.2.1. *Pregunta científica*

¿Se puede aumentar la productividad de la vaca lechera al alimentarla con ensilado de maíz cosechado a mayor altura de corte?

¿La productividad del suelo agrícola aumenta al incrementar el residuo de cosecha utilizado como abono orgánico dentro de los sistemas lecheros?

¿Es económicamente viable reducir un porcentaje de rendimiento en la producción de ensilado de maíz para beneficiar el incremento nutrimental del mismo y las condiciones productivas del suelo?

1.2.2. *Hipótesis General*

La productividad de los sistemas intensivos lecheros se incrementa al elevar la altura de corte en la cosecha del ensilado de maíz.

1.2.3. *Hipótesis Específicas*

H1. La calidad nutrimental y degradabilidad ruminal del ensilado de maíz se incrementa al elevar la altura de corte a cosecha.

H2. Al utilizar ensilados de maíz cosechado a mayor altura de corte en la dieta del ganado lechero se incrementa el aprovechamiento de la proteína en la dieta, la producción de leche y la composición de sólidos lácteos.

H3. Al aplicar estiércol de ganado lechero en un suelo agrícola con mayor cantidad de residuos de la cosecha anterior se incrementa la productividad del suelo.

H4. Al elevar la altura de corte en el ensilado de maíz se incrementa la rentabilidad en los sistemas intensivos de producción de ganado lechero que producen sus propias pasturas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. *Objetivo General*

Evaluar en el ganado lechero y el suelo agrícola el efecto de elevar la altura de corte en la planta de maíz forrajero para su ensilado y sus repercusiones económicas.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

OE1. Evaluar en el rendimiento, la calidad forrajera, la digestibilidad y el perfil de fermentación del ensilado de maíz cosechado a tres alturas de corte.

OE2. Evaluar el efecto en la producción y composición de leche en ganado bovino al alimentar con dietas modificando el balance de proteína metabolizable e incluyendo ensilado de maíz cosechado a dos alturas de corte.

OE3. Evaluar el efecto productivo del uso de estiércol de vacas lecheras alimentadas con ensilado de maíz a dos alturas de corte incorporado en suelos agrícolas con los residuos de la producción de esos ensilados.

OE4. Determinar el impacto económico en el establo y producción agrícola del uso de cuatro dietas usando dos niveles de proteína metabolizable y ensilados de maíz cosechados a dos alturas de corte.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. EL CULTIVO DE MAÍZ Y SU IMPORTANCIA COMO FORRAJE

2.1.1. *Importancia del maíz en el Mundo, México y Aguascalientes.*

Se considera a México y Centro América como origen de la planta del maíz, donde se domesticó y comenzó a adquirir gran importancia desde épocas precolombinas (Kato *et al.*, 2009), convirtiéndose en uno de los principales granos para la alimentación. A nivel mundial, como se muestra en la Fig. 2-1 la producción ha aumentado en superficie a una razón de cuatro millones de hectáreas por año del 2006 a la fecha, pero su rendimiento en grano solo ha aumentado a razón de 66 kg ha⁻¹ cada año desde 1961 (Otegui *et al.*, 2021). Ocupa el primer puesto como cultivo de mayor importancia en cuanto al total de producción de granos (Fig. 2-2), cuyo uso principal es para consumo humano y como parte del pienso en la alimentación del ganado (Steduto *et al.*, 2012).

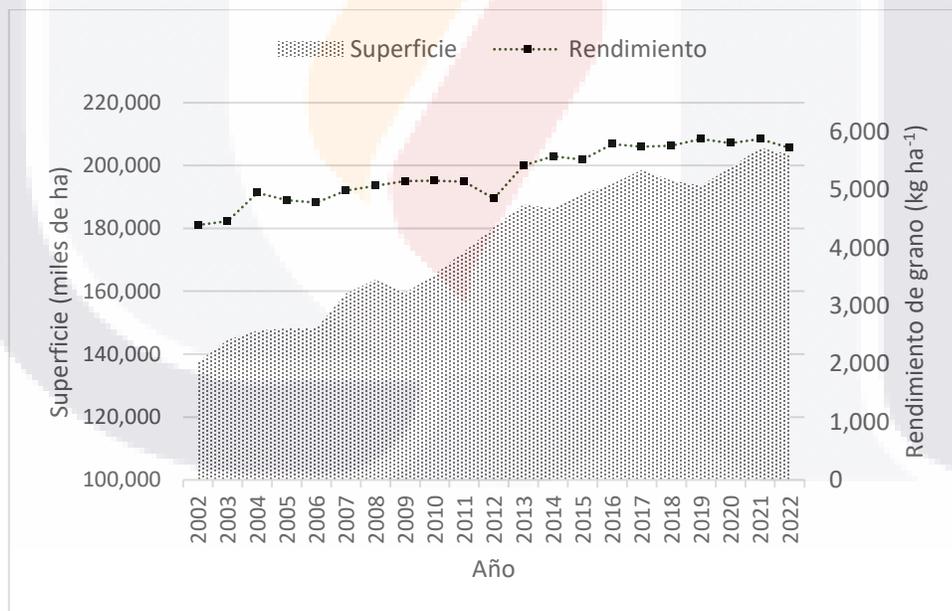


Figura 2-1. Superficie y rendimiento cosechado a nivel mundial del cultivo de maíz en los últimos 20 años (FAO, 2024).

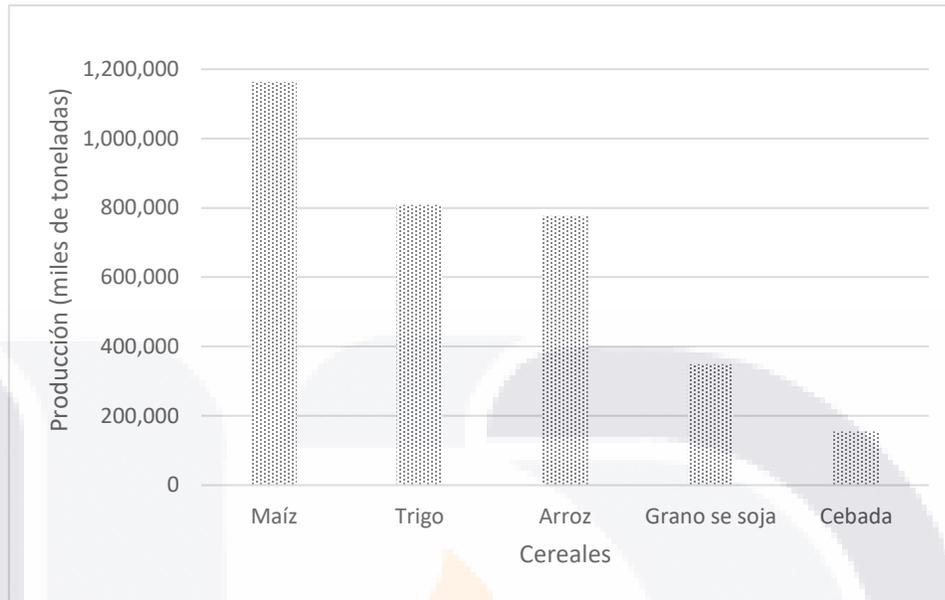


Figura 2-2. Producción mundial de los principales cereales para el año 2022 (FAO, 2024).

Dentro del panorama mundial, México se encuentra entre los 10 principales productores de maíz con un promedio de 27.18 millones de toneladas de grano anuales del año 2020 al 2022, pero esto se debe al aumento en la superficie cosechada ya que como se observa en la Fig. 2-3, el rendimiento de grano por superficie de México en este mismo periodo fue de 3.87 t ha⁻¹, teniendo una brecha de poco más del doble comparado con otros países del mismo grupo como EE. UU. (FIRA, 2024).

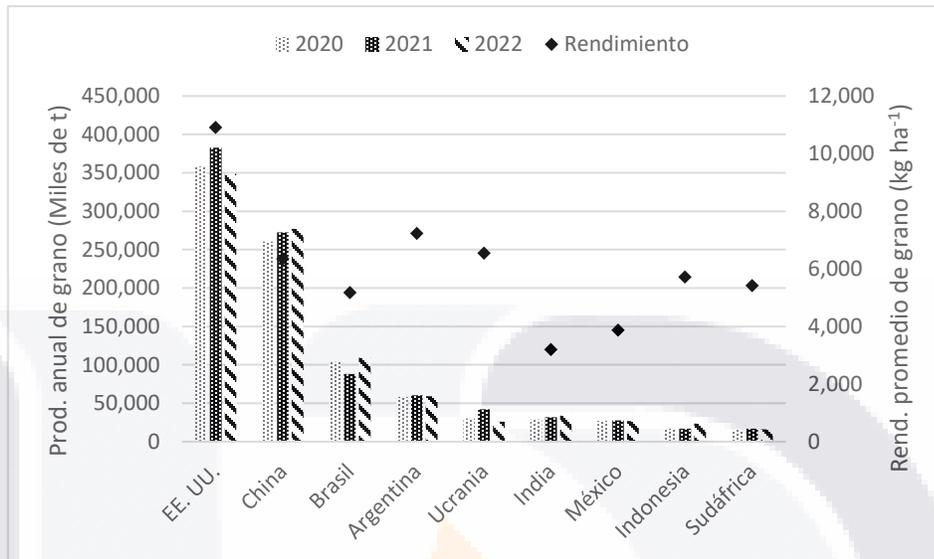


Figura 2-3. Principales países productores de maíz del 2020 al 2023 y su rendimiento promedio de grano (FAO, 2024)

Si bien la tendencia a nivel mundial para la producción de este grano se pronostica al alza, no pasa lo mismo para el caso de la producción de maíz como forraje verde (FIRA, 2024). A nivel mundial, desde hace 20 años la superficie de maíz cosechada como forraje no ha variado en gran medida, manteniéndose en un promedio de 1'105,000 ha anuales (FAO, 2024); aunque para el caso de México el cultivo ha aumentado más del 45% la superficie cosechada en 20 años, pasando de poco más de 326,000 ha en el 2003 a cosechar más de 459,000 ha en el 2023 contemplando sistemas de riego y de temporal (SIAP, 2024). Específicamente para la zona de Aguascalientes entendiéndola como una cuenca lechera que además abarca diferentes Distritos de Desarrollo Rural (DDR) como son Lagos de Moreno en Jalisco y Ojocaliente en Zacatecas, la producción de maíz es destinada casi en su totalidad a la alimentación del ganado como forraje verde (González *et al.*, 2007), teniendo un incremento en el rendimiento logrando hasta 70 t ha⁻¹ en producciones comerciales bajo sistemas de riego (Santana y Peña, 2024), razón por la cual se ha destinado una mayor superficie para su cosecha desplazando a otros cultivos forrajeros de calidad como es la alfalfa (Fig. 2-4).

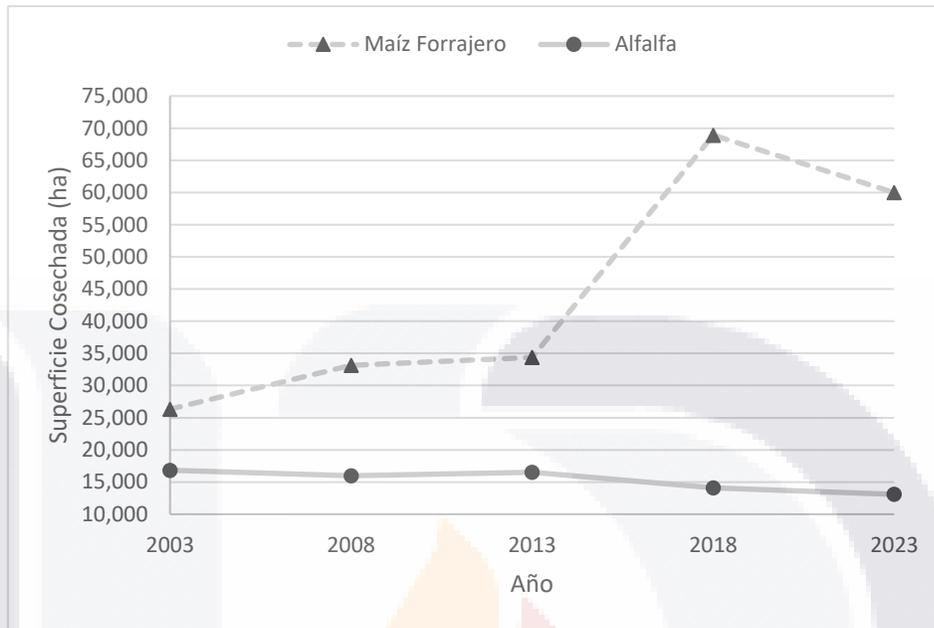


Figura 2-4. Evolución en los últimos 20 años de la superficie de riego en hectáreas cosechadas de maíz forrajero y alfalfa para la cuenca lechera de Aguascalientes, comprendiendo el DDR Aguascalientes, Lagos de Moreno y Ojocaliente (SIAP, 2024).

Si bien se considera el maíz como un cultivo eficiente en su uso del agua y su demanda es creciente, en escenarios futuros se prevé que perderá idoneidad climática en América Latina y el África Subsahariana. En Norte América se estima que hay una brecha del 22% del potencial total del rendimiento debido a la disponibilidad del agua, lo que se conoce como Potencial Hídrico; mientras que en Sudamérica esta brecha se estima en un 45% (Ratalino-Edreira *et al.*, 2018), específicamente en México se visualiza que habrá una reducción del 11% en la producción total de maíz para el año 2050 y una pérdida de hasta el 45% de la superficie sembrada para el 2100 debido al estrés por sequía y calor (Ramírez-Cabral *et al.*, 2017).

2.1.2. Descripción del cultivo de maíz.

El maíz es originario de América Central, pero con una gran adaptabilidad que le permite establecerse desde el nivel del mar hasta más de los 2,000 metros sobre el nivel del mar (msnm) (Steduto *et al.*, 2012); a pesar de tener un germoplasma diverso, la mejora genética y selección para aumentar su rendimiento han generado un cultivo altamente determinado (Otegui *et al.*, 2021). Es un cultivo perteneciente a la familia Poaceae, del tipo C4 por su mecanismo para fijar el Dióxido de Carbono (CO₂) de la atmósfera mediante ácidos de cuatro C como el oxalacetato y el malato que después en el haz vascular se descomponen y liberan una molécula de CO₂ para convertirla en azúcares dentro del ciclo de Calvin (Edwards *et al.*, 2004) lo que le permite tener una mayor tasa fotosintética que muchos cultivos C3 como la alfalfa; el rango de fotosíntesis efectiva del maíz oscila entre un 30 y 40 % más que el de cualquiera de las especies C3 (Hesketh, 1963).

Se describe como un pasto monoico anual de tallo central que se desarrolla según su raza o híbrido hasta alcanzar desde 15 a 25 hojas en base a las temperaturas durante el desarrollo del cultivo (Padilla & Otegui, 2005; Steduto *et al.*, 2012). Como toda gramínea, cuenta con un sistema radicular de corona o raíces nodulares que surgen de los nudos basales de la planta y puede desarrollar raíces adventicias que le ayudan a la absorción de nutrientes, agua y al anclaje (Gregory, 2006); el transporte de estos nutrientes se realiza mediante vasos que se encuentran en xilema, los cuales maduran entre los 15 y 40 cm de desarrollo de la planta (McCully, 1999). De forma complementaria, para el maíz al tener este tipo de raíces, los pelos radiculares son de vital importancia para cumplir las funciones antes mencionadas y su vida útil va desde algunos pocos días hasta 3 semanas (Fusseder, 1987), este desarrollo radicular lo mantiene desde la siembra hasta su etapa reproductiva R2 siguiendo un patrón sigmoide (McCully, 1999), siendo la densidad aparente del suelo uno de los factores que puede limitar en mayor medida su desarrollo, ya que a mayor densidad se tendrá un menor desarrollo radicular. Estas raíces pueden atravesar capas densas de suelo cuando están mojados y desarrollar hasta 2.25 m de profundidad a un ritmo de crecimiento de 2.5 cm por día (Hsiao *et al.*, 1976); sin embargo, solo se detecta absorción de agua y nutrientes hasta los 1.65 m de profundidad (Dardanelli, 2004); teniendo una gran capacidad desde los 20 cm.

Las temperaturas óptimas de desarrollo para el maíz son de entre 8 y 10 °C como mínimas y hasta 30 y 35 °C como máximas (Cicchino *et al.*, 2010), alcanzando el área foliar máxima del dosel al mantener una temperatura media diaria de 21 °C (Hardacre & Turnbull, 1986). Su fotoperiodo tiene dos fases, la primera es su Fase Juvenil donde es insensible al y la segunda que es la Fase Inducible donde se detecta cierta sensibilidad (Kiniry *et al.*, 1983), esta fase va entre cuatro a ocho días antes del inicio de la floración, por lo que es importante considerar este factor sobre todo para el buen llenado del grano.

Otra característica importante en el cultivo de maíz es su relación entre la cantidad de agua transpirada y la cantidad de radiación solar interceptada; estas condiciones dependen de una buena diferenciación en las hojas y su expansión (McNaughton, 1991). La cantidad de hojas y las temperaturas en el desarrollo del cultivo tienen relación en la evapotranspiración (ET_o); en este caso para el cultivo del maíz se tiene una reducción de 17.7 kg ha⁻¹ por cada mm de ET_o menos durante el cultivo (Otegui *et al.*, 1995), y puede aumentar esta diferencia entre 55 y 68 kg ha⁻¹ de merma cuando las condiciones son de riego total (Kresović *et al.*, 2016), encontrando un punto de equilibrio entre rendimiento y el uso eficiente del agua de riego cuando se suministra solo el 75% del total requerido; dicha eficiencia en el uso del agua no aumenta para el caso del maíz cuando se implementan rotaciones de cultivo (Hussain *et al.*, 2019).

Uno de los nutrientes de mayor demanda para el cultivo de maíz es el N, que según el material y la densidad de siembra el requerimiento máximo va desde 240 hasta los 320 kg ha⁻¹ (Otegui *et al.*, 2021) teniendo un máximo de acumulación diaria de 2.7 a 3.7 kg ha⁻¹. Entre el 60 y 74% del N se asimila en la planta durante la floración, por lo que es fundamental en esta etapa del cultivo para una mayor acumulación de biomasa a pesar de que los genotipos de los últimos años han mostrado una mayor tolerancia al estrés por deficiencia de N (Ciampitti y Vyn, 2012). Ya durante el llenado del grano el cultivo puede movilizar hasta 100 kg ha⁻¹ de N (Uhart y Andrade, 1995a), quedando contenido en el grano entre el 1.3 a 1.8 % (Steduto *et al.*, 2012).

Este nutriente es fundamental para el buen llenado del grano, pero tiene un alto impacto en la producción de biomasa (Ciampitti y Vyn, 2013), ya que, si bien la restricción del N no

afecta al número de hojas en la planta, si retrasa su desarrollo fenológico al afectar el brote de nuevas hojas, su tasa de expansión foliar y su duración (Uhart y Andrade, 1995b). Al tener afectaciones en el desarrollo foliar, se impacta en el rendimiento del grano reduciendo hasta un 23% de materia seca (MS) en la mazorca y aumentando por relación hasta un 60% del rendimiento de la biomasa sin que esto afecte la digestibilidad de la MS y el total de proteína cosechada en el forraje (Dalla Valle, 2008), pero sí su concentración de almidón y por lo tanto su contenido energético.

2.1.3. El uso del maíz como forraje.

El maíz es aprovechado como cereal para la alimentación humana y también tiene gran importancia en la alimentación del ganado (Otegui *et al.*, 2021), donde además de aprovechar el grano en el pienso, se utiliza la planta completa como forraje en diferentes formas, siendo el rastrojo (residuo de la cosecha del grano) una opción común (Flores-Ancira *et al.*, 2018); sin embargo, el ensilaje de maíz en el centro de México y otras cuencas lecheras ha adquirido gran relevancia por su alta producción de MS (González-Castañeda *et al.*, 2007). En los últimos 25 años el ensilado de maíz ha tenido una gran aceptación en las zonas productoras de leche como Aguascalientes, La Laguna y Querétaro donde puede representar el 40% de la dieta desplazando otros forrajes importantes como la alfalfa (Santana, 2018), ya que aporta energía y fibra necesarias para mantener la salud ruminal y producción lechera (Ferraretto *et al.*, 2018). Además de su alta producción de MS, el maíz se caracteriza por tener un uso eficiente del agua en comparación con otros cultivos forrajeros (Reta-Sánchez *et al.*, 2017), específicamente en comparación con la alfalfa que es un cultivo de gran importancia en las cuencas lecheras del país (SIAP, 2024) teniendo una eficiencia del uso del agua mayor, ya que se requieren 215 L para producir 1 kg de biomasa de alfalfa contra 175 L requeridos para 1 kg de maíz (Pedroza-Sandoval *et al.*, 2014).

El ensilado de maíz es una forma de almacenar el forraje que permite una cosecha rápida de biomasa, logrando conservar grandes cantidades y teniéndolas en fácil disposición (Granados, 2023). Este método es muy efectivo, ya que mediante la fermentación se convierten azúcares y proteínas de la planta en ácidos orgánicos, etanol, y compuestos nitrogenados solubles como amoníaco (NH₃) y aminas (Allen *et al.*, 2003), conservando sus

características nutrimentales y organolépticas por largos periodos de tiempo. Al ser un proceso anaeróbico las prácticas post cosecha para un buen sellado que favorezca la fermentación es fundamental, por lo que el uso de inoculantes como estimuladores de la fermentación, inhibidores de la fermentación, inhibidores del deterioro aeróbico, nutrientes y absorbentes (Yitbarek y Tamir, 2014), así como plásticos idóneos se vuelven factores críticos al momento de compactar y evitar la exposición y deterioro aeróbico (Bernarde *et al.*, 2018), ya que un mal proceso en esta etapa puede afectar el perfil de fermentación influyendo en el consumo de materia seca (CMS) ya que modifica las principales variables de valor nutrimental como son la Digestibilidad de la Fibra Detergente Neutro (DFDN) y el contenido de almidones (Huhtanen *et al.*, 2007).

El proceso de fermentación del ensilaje fue dividido en cuatro fases principales por Barnett (1954). 1) Fase aeróbica: de forma natural al momento de la cosecha la planta tiene en su superficie microorganismos que requieren oxígeno (O₂) para vivir, además la planta se mantiene activa por algunas horas más (González-Castañeda *et al.*, 2007), este proceso inicia con un potencial de hidrógeno (pH) de 6 y produce calor, agua y un incremento en la temperatura interna, dando condiciones que favorecen la actividad de algunas enzimas como las proteasas y carbohidrasas (Pahlow *et al.*, 2003), además de bacterias como bacillus, enterobacterias y bacterias ácido-lácticas (Santos *et al.*, 2013). También hay presencia de mohos y levaduras como parte de los microorganismos epífitos (Weinberg *et al.*, 2004) por lo que una buena compactación con un mínimo de 705 kg por m³ en capas menores a los 15 cm ayudarán a terminar con el O₂ de forma rápido y finalizar con esta primera fase no deseada (Holmes, 2009).

2) Fase anaeróbica: a partir del momento en que el suministro de O₂ se agota comienzan actividad las bacterias anaeróbicas, principalmente las bacterias ácido-acéticas (BAA) que consumen los carbohidratos hidrosolubles produciendo ácido acético reduciendo el pH hasta 5 en las primeras 24 a 72 horas (González-Castañeda *et al.*, 2007), propiciando con ese aumento en la acidez su inactividad y dando paso a las bacterias ácido-lácticas (BAL) siendo las principales lactobacillus, pediococcus, leuconostoc, enterococcus, lactococcus y streptococcus (Jones *et al.*, 2023; Pahlow *et al.*, 2003). Las BAL al producir ácido láctico en

concentraciones de entre el 2 y el 4 % aceleran el descenso del pH a rangos de 3.7 – 4, esto dependiendo el material y madurez al momento de la cosecha (Kung *et al.*, 2018). Cuando el forraje tiene altas concentraciones de azúcares puede producirse etanol en mayor volumen, para el caso del maíz los valores más comunes van del 1 al 3 %. Una mala compactación y sellado sigue acarreando consecuencias negativas en esta fase ya que mantiene el crecimiento de mohos y levaduras que degradan almidón y carbohidratos de la pared celular provocando junto con el tipo de cultivo y sus características al momento de la cosecha que esta fase dure desde una semana hasta un mes (Pahlow *et al.*, 2003).

3) Fase de estabilización: En consecuencia de la disminución del pH en la fase anterior la mayoría de los microorganismos mueren o entran en estado de dormancia, solo logran sobrevivir a estas condiciones esporas de algunas bacterias como bacillus, clostridium, levaduras y mohos (Avila y Carvalho, 2020), además de enzimas tolerantes a la acidez provocando una lenta hidrólisis de los carbohidratos estructurales y la proteólisis (Pahlow *et al.*, 2003), descomponiendo proteínas principalmente del grano aumentando la digestibilidad del almidón (Carvalho *et al.*, 2017). Al llegar a esta fase los principales factores que influyen en la producción de ácidos orgánicos son el pH al que se logre bajar el silo y su contenido de MS, entre más maduro el forraje el pH final es mayor y la concentración de ácido láctico y acético disminuye, además de alterar su relación llevándola casi 1 a 1 cuando debería de ser una concentración mayor del ácido láctico sobre el acético (Kung *et al.*, 2018). Al lograr la estabilidad, la actividad fermentativa disminuye considerablemente y la duración de esta fase es determinada por las necesidades de forraje que tenga el establo (Pahlow *et al.*, 2003).

4) Fase de extracción: Esta última fase es cuando se vuelve a exponer el forraje al O₂ ya que al abrir la cubierta se rompe el sello permitiendo el acceso hasta por un metro de la cara aproximadamente, esto es suficiente para reactivar el crecimiento de microorganismos indeseables como levaduras y esporas de mohos, provocando la inestabilidad aeróbica y volviendo a la actividad de la Fase 2 con las BAA aumentando la temperatura y propiciando cambios químicos alterando la calidad nutrimental (Pahlow *et al.*, 2003). El manejo de la extracción es fundamental ya que el área afectada por la inestabilidad aeróbica propiciada por levaduras que asimilan el lactato como *sacharomyces* y *candidia* (Avila y Carvalho,

2020), puede representar pérdidas de hasta el 19% de MS en los primeros 75 cm (Borreani *et al.*, 2018). Esa inestabilidad aeróbica puede depender de muchos factores como la MS, porcentaje de ácidos orgánicos, población microbiana, el tiempo de llenado y sellado del silo, entre otros (Pahlow *et al.*, 2003), pero de forma general la velocidad de extracción para evitar tiempos prolongados de inestabilidad se recomienda con un avance de 1.25 hasta 2 m día⁻¹ según si es zona tropical o templada y la época del año (Pitt y Muck, 1993).

Para lograr una óptima fermentación como se describe anteriormente y obtener un ensilaje de calidad, se deben considerar factores previos a la cosecha que van desde el adecuado manejo agronómico, la selección del híbrido, la madurez a cosecha, picado y procesado del grano (González-Castañeda *et al.*, 2007), toda práctica que afecte al contenido de FDN, MS y almidón tendrán impacto directo en la calidad del ensilaje ya que las fibras y ligninas explican la mayoría de las variaciones en la digestibilidad de la MS estando más relacionada con el almidón bien fragmentado, el tamaño medio de partícula y su concentración de lignina (Ferreira y Mertens, 2005). El manejo agronómico es muy variado dependiendo de las condiciones del suelo, clima, plagas, enfermedades y demás factores que se deben considerar para adecuar un medio propicio para el buen desarrollo del cultivo (Núñez-Hernández *et al.*, 2006). Es importante seleccionar un híbrido en base a su desempeño y características nutrimentales, que para la zona de Aguascalientes es alcanzable rendimientos de 27 t ha⁻¹ de MS, usando materiales con menos del 10% de pudrición del tallo (*Fusarium spp.*), concentraciones de almidón por encima del 25% de la MS y DFDN superior al 40% de la FDN (Santana y Peña, 2014). Reuniendo estas características en nuestros cultivos de maíz, otro factor importante es la madurez al momento de la cosecha; si bien hay resultados donde se tiene buena digestibilidad del forraje cosechando a más del 40% de MS se observa que el almidón digerido en el tracto total puede ser menor (Ferraretto y Shaver, 2012) por lo que es óptimo un 35% de MS a cosecha, lo que según Wiersma *et al.* (1993) corresponde a 2/3 de línea de leche en el grano. Bajo estas condiciones y teniendo una ensiladora con procesador de granos se recomienda una longitud teórica de picado de 20 mm o 15 mm si la cosechadora no cuenta con procesador (González-Castañeda *et al.*, 2007).

Son todos estos factores que han influido en el uso del maíz como un cultivo prioritario en los establos lecheros del mundo y en particular del centro de México; por esto, es que el cultivo de maíz va de la mano de una buena producción lechera en sistemas y climas como el de Aguascalientes y sus alrededores.

2.2. LA PRODUCCIÓN LECHERA Y SU IMPORTANCIA EN LA ALIMENTACIÓN HUMANA.

2.2.1. *Importancia de la producción lechera en el Mundo, México y Aguascalientes.*

A nivel mundial la producción de leche para el año 2022 fue de 658.3 millones de toneladas anuales, de las cuales el 82.7% corresponde a la leche de vaca y el resto es leche de búfala, cabra y camella (FIRA, 2023). Junto a otros productos de origen animal, su importancia para la alimentación humana radica en el aporte de proteína con un amplio rango de aminoácidos (AA), calcio, hierro, zinc, vitaminas A y B12 principalmente (Kourous, 2011), además de ser un alimento barato que requiere menos superficie de tierra para producir 1 g de proteína (Clark y Tilman, 2017); con el incremento poblacional las dietas que incluyen lácteos son una de las más eficientes y mejor evaluadas a futuro (Peters *et al.*, 2016), por lo que se prevé un aumento del 58% en la producción láctea respecto a los niveles actuales (Kourous, 2011).

A nivel mundial la producción de leche fluida ha evolucionado al punto de tener países como Israel y Arabia Saudita con promedios de rendimiento de 13,000 kg vaca⁻¹ en cada lactancia y a pesar de eso no figurar entre los primeros 30 países productores de leche debido al número de vacas en producción que tienen según datos recientes de la FAO (2024); en cambio la India es el país con mayor producción anual con más de 108.3 millones de toneladas, pero con rendimientos menores a los 2,000 kg vaca⁻¹ en cada lactancia (Fig 2-5). Esta brecha en la producción y rendimiento es consecuencia de diferentes factores como clima, geografía, tecnificación y genética (Britt *et al.*, 2018).

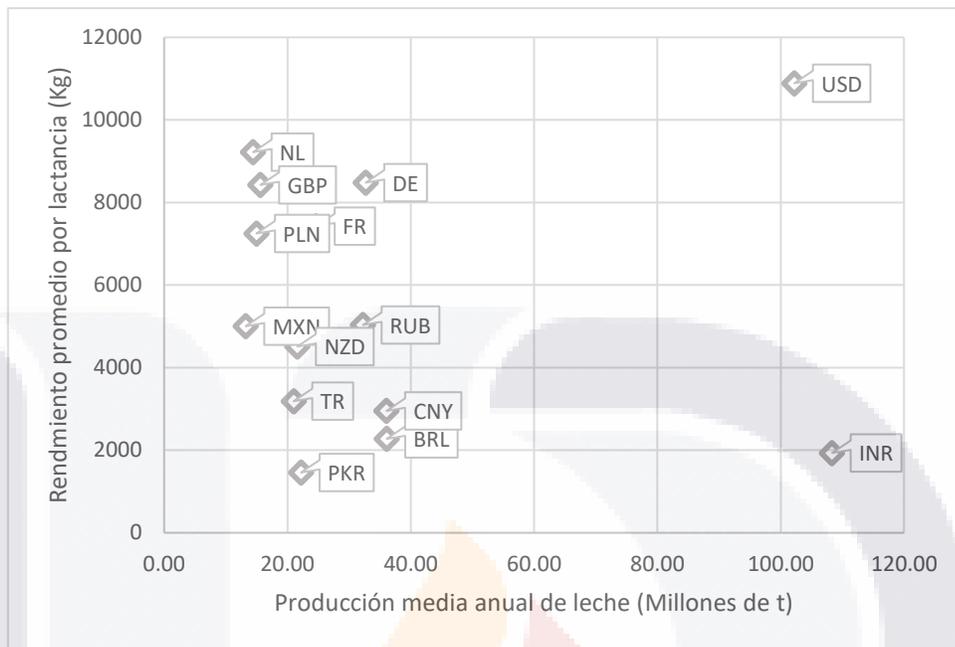


Figura 2-5. Rendimiento promedio por lactancia y producción media anual de leche fluida de los 14 principales productores a nivel mundial, promedios del 2021 – 2023 (Elaboración propia. FAO, 2024).

DE: Alemania, BRL: Brasil, CNY: China, USD: Estados Unidos, RUB: Rusia, FR: Francia, INR: India, MXN: México, NZD: Nueva Zelanda, NL: Países Bajos, PKR: Pakistán, PLN: Polonia, GBP: Gran Bretaña, TR: Turquía (Código de países de <https://www.fao.org/nocs/en/>)

México figura a nivel mundial en la posición número 14 con una producción media anual de 13.23 millones de toneladas de leche fluida, pero con un rendimiento por lactancia de 5,005 kg vaca⁻¹, y esto se debe principalmente a dos factores: 1) como se muestra en la Fig. 2-6 se tiene parte de la producción en zonas de clima tropical como Veracruz y Chiapas (SIAP, 2024), y 2) los sistemas de producción son muy variados en cuanto a tecnificación, tamaño e inversión (Santana, 2018), lo que hace tener una diversidad de circunstancias y retos muy particulares en cada zona del país.

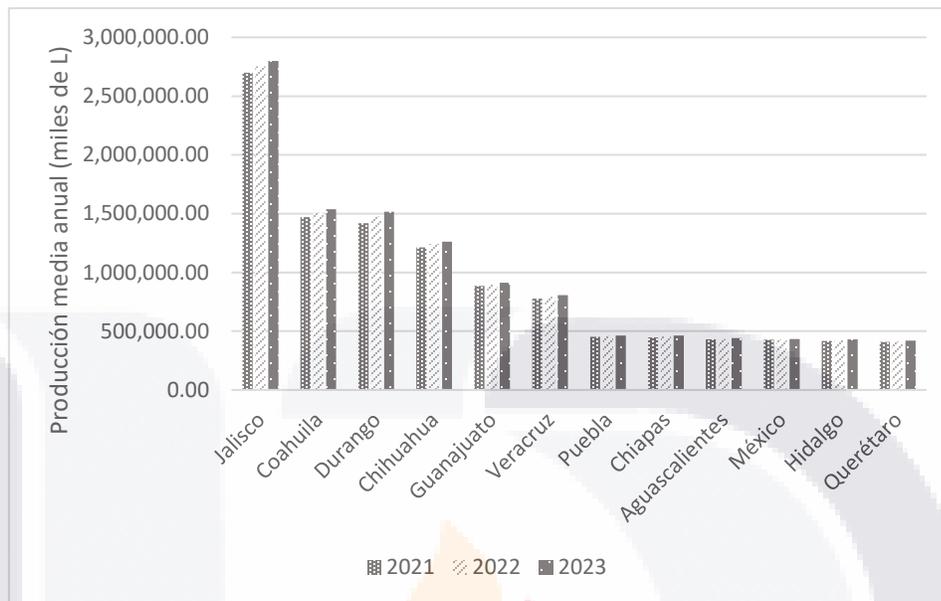


Figura 2-6. Producción media anual en los principales estados productores de leche de vaca en México, del 2021 al 2023.

Aguascalientes se encuentra como el noveno estado en cuanto a la producción media en los últimos 3 años con más de 434 millones de litros anuales y un crecimiento de la producción de 2.5% anual (SIAP, 2024); es decir, ha crecido al mismo ritmo que la media en todo el país (FIRA, 2023). Sin embargo, se debe entender Aguascalientes como una cuenca lechera que abarca la producción de los municipios colindantes con Zacatecas y Jalisco (Santana, 2018). Visto desde el enfoque de cuenca lechera, las principales por su producción y sistemas tecnificados son La Laguna, Delicias, El Bajío y Aguascalientes; donde separando a La Laguna, la cuenca de Aguascalientes es la más productiva para el año 2023 (Fig. 2-7).



Figura 2-7. Producción de leche para el año 2023 de las principales cuencas lecheras del país.

Por sus condiciones altamente percederas y concentración de agua (85 % aprox.) se estima que solo el 7% del volumen es comercializado como leche fluida, por lo que la mayoría del volumen se consume como derivados lácteos (OECD-FAO, 2022) siendo los más comunes queso, mantequilla, leche descremada y entera en polvo. México tuvo un consumo anual de más de 17 millones de litros para el año 2022 incrementando en un 3.5% respecto a años anteriores, lo que rebasa su capacidad de producción en un 23% aproximadamente, obligándolo a volverse importador principalmente de leche descremada en polvo (FIRA, 2023). La brecha productiva de la lechería en México puede entenderse cuando se ve la distribución de la producción en los diferentes sistemas, climas y condiciones demográficas que influyen en esta actividad.

2.2.2. *Sistemas de producción lechera*

En México, debido a aspectos socioeconómico, agroecológicos y de desarrollo tecnológico la producción de leche se realiza en regiones heterogéneas (Camacho-Vera *et al.*, 2017), caracterizadas en función de su intensidad que es el grado de tecnificación y manejo, y estabilidad definida como la capacidad de mantener la producción sin afectaciones por la estacionalidad, ubicando diferentes regiones especializadas en su producción (Santana, 2018). Los principales sistemas de producción son 4, el especializado, semi especializado, familiar y el doble propósito (Robledo-Padilla, 2018).

Doble propósito: representa el 9% de la producción de leche en México y se concentra en zonas tropicales como Veracruz y Chiapas donde la abundancia de pastizales se aprovecha para la producción de carne y leche (Orantes-Zebadua *et al.*, 2014). Las razas de ganado típicas son la cruce de *Bos taurus* x *Bos indicus*, por lo que su producción es baja, pero con buena concentración de grasa en leche (Vilaboa-Arroniz y Díaz-Rivera, 2009), en promedio se produce al día entre 4 y 11 L vaca⁻¹ y destetan a los machos para la venta entre 110 y 140 kg (Granados-Zurita *et al.*, 2011). Por lo general son unidades de producción con baja tecnificación que producen para el abasto local y venta del excedente de producción a empresas y centros de acopio; se caracteriza por no tener un enfoque empresarial (Orantes-Zebadua *et al.*, 2014).

Familiar: también conocido como producción de traspatio, representa el 21% de la producción nacional de leche (SE, 2012). Son unidades de producción que cuentan con un hato de aproximadamente 30 vacas entre lactantes y secas donde las razas predominantes son Holstein y Pardo Suizo (Gallegos-Daniel *et al.*, 2022), tienen un uso intensivo de mano de obra y bajo nivel de tecnificación, la producción está destinada a la autosuficiencia alimentaria mediante leche y producción de queso artesanal (Camacho-Vera *et al.*, 2021), y algo de excedentes se vende a centros de acopio como Liconsa (SE, 2012); prácticamente todo el país cuenta con este tipo de sistemas, pero regiones como los Altos de Jalisco y Aguascalientes al estar en una zona industrializada su producción también se destina al abasto de diferentes empresas (Robledo-Padilla, 2018).

Semi especializado: Este sistema de producción aporta al 20% de la lechería nacional (Robledo-Padilla, 2018), y se caracteriza por tener un nivel medio de tecnificación, el ganado se mantiene completamente estabulado o semi estabulado por lo que la alimentación representa uno de los insumos más altos siendo hasta el 65% del costo de producción (SE, 2012), la mano de obra se basa en la familia con hasta 10 empleados que en menor proporción pueden llegar a ser externos. Las principales razas utilizadas en este tipo de explotaciones son la Holstein y Pardo Suizo (Gallegos-Daniel *et al.*, 2022). Estos sistemas se concentran principalmente en la cuenca lechera del Altiplano Central, compartiendo parte de la producción entre Aguascalientes, Guanajuato y Altos de Jalisco (Romo-Bacco, 2014).

Especializado: Sistema de producción intensivo que aporta el 50% de la producción nacional (SE, 2012). Estos sistemas son 100% estabulados y dependientes de su propia producción de forrajes por lo que la presión que ejercen estos sistemas a los recursos edáficos es alta, registrando una densidad promedio de 3.2 vacas ha⁻¹ de cultivo y hasta 7.72 vacas ha⁻¹ en zonas como la Comarca Lagunera (Figueroa-Viramontes, 2015). Se caracteriza por su alta tecnificación en todo el proceso productivo y el uso de razas especializadas como la Holstein (Gallegos-Daniel *et al.*, 2022). Este sistema se encuentra distribuido en zonas de clima templado, árido y semiárido, distinguiéndose hoy en día por su producción las Cuencas de Delicias, La Laguna, Aguascalientes y Querétaro (SIAP, 2024).

2.2.3. Principales razas productoras de leche en México.

El primer ganado bovino en América llegó importado por los españoles a las costas del golfo de México; sin embargo, no era ganado de especialidad lechera (Laborde & Sánchez-Ríos, 2004). Fue hasta el siglo XVII que inmigrantes trajeron de Europa razas lecheras como Jersey, Ayrshire y Guernsey (USDA, 2024). A mediados del siglo XVIII, Winthrop Chenery importa desde los Países Bajos la primer vaca Holstein diseminándose rápidamente por Massachusetts y sus alrededores debido a su alta producción y adaptabilidad a los climas templados (Elischer, 2014). Hoy en día se consideran como razas lecheras por la American Dairy Association North East (2024), la Holstein, Jersey, Pardo Suizo, Guernsey, Ayrshire y Shorthorn Lechera; sin embargo, en México las principales razas son la Holstein y Pardo Suizo Americano en menor cantidad (SADER, 2015).

Holstein: Esta raza se originó en las provincias de Frisia Occidental y North Holland en los Países Bajos (Elischer, 2014), por su adaptación a climas templados, áridos y semiáridos es la raza más utilizada en las explotaciones intensivas en México (Holstein de México, 2024). Es una vaca que se caracteriza por su pelaje de manchas blancas con negras o rojas, es una raza fuerte, de cuerpo anguloso, cuello largo, con la cruz bien definida, ubre suave y plegable, pezones colocados en cuadro, de condición descarnada y poca acumulación de grasa según la etapa de lactancia (Gasque y Blanco, 2001). Su peso al nacer puede ser de hasta 43 kg y llega a pesar los 630 kg en producción (Bjelland *et al.*, 2011), teniendo rendimientos promedio de hasta 11,490 kg vaca⁻¹ en cada lactancia (USDA, 2023) con componentes que comúnmente pueden llegar al 3.7% de grasa y 3.1% de proteína (Stallings, 1998).

Pardo Suizo: La raza se originó en la parte media oriental de Suiza y en el siglo XIX se importó a Estados Unidos 130 ejemplares donde se fue seleccionando y mejorando para la producción lechera naciendo la Pardo Suiza Americana (AMCGSR, 2024). Es un ganado con un potencial de rendimiento menor que la raza Holstein; sin embargo, en México se utiliza en sistemas doble propósito en regiones del trópico como el Golfo y sureste (Gasque y Blanco, 2001). Su característica principal es su color café claro, de cabeza ancha y moderadamente larga, con cuartos traseros muy carnosos con ubres bien desarrolladas y buenos pezones, puede llegar a pesar hasta los 600 kg (Gasque y Blanco, 2001; AMCGSR, 2024). Se caracteriza por tener una producción media de 10,450 kg vaca⁻¹ en cada lactancia con una composición de 4.2% de grasa y 3.4% de proteína (BSA, 2014); sin embargo, en México por centrarse la producción de esta raza en zonas tropicales la producción media anual es de 2,900 hasta 3,200 kg vaca⁻¹ (Román-Ponce *et al.*, 1978).

En ocasiones se utiliza la raza Jersey para hacer cruzas con Holstein principalmente, ya que permite obtener producción con mayor contenido de sólidos y mejores características reproductivas y de sanidad (Bjelland *et al.*, 2011); sin embargo, no es muy popular por su pérdida de rendimiento. Estas razas si bien se utilizan en diferentes zonas y bajo diferentes enfoques en todo el país, tienen requerimientos nutrimentales similares y es por esto por lo que se seleccionan las razas e individuos que mayor eficiencia alimenticia logran al producir mayor leche con su CMS.

2.3. LA ALIMENTACIÓN DEL GANADO LECHERO

La vaca lechera pertenece a la familia Bovidae, la más abundante de los rumiantes; por lo que tiene características particulares en su proceso alimenticio, ya que la cavidad ruminal en su sistema digestivo le permite realizar una predigestión de los alimentos, lo que los hace diferentes a los monogástricos (Hackmann y Spain, 2010), esta predigestión le permite tener un mayor aprovechamiento de alimentos fibrosos de baja calidad como los pastos, convirtiéndolos en nutrientes de fácil aprovechamiento y calidad para el ser humano (Van Soest, 1994; Clark y Tilman, 2017).

2.3.1. *Morfofisiología del sistema digestivo en la vaca lechera.*

Para entender la alimentación de la vaca lechera, primero se debe entender la morfofisiología de los rumiantes ya que posee un estomago compuesto por el rumen, retículo, omaso y abomaso (Krehbiel, 2014). Ya desde la boca se comienza el proceso digestivo cuando la vaca mastica, insaliva, deglute y rumia, con la ayuda de diferentes glándulas; la producción de saliva ayuda como amortiguador del pH debido a las sales que se forman en ella como Na^+ , Cl^- , K^+ , HCO_3^- , HPO_4^- y NH_4^+ (Cobos-Peralta y Shimada-Miyasaka, 2018).

Mediante el esófago la boca se conecta con el retículo-rumen, dos partes del sistema digestivo que se consideran una sola para fines prácticos y es donde se realizan los principales procesos hidrolíticos y fermentativos de compuestos como fibras, azúcares simples, almidones y proteínas (Vohra *et al.*, 2016; Leng, 1991); estas cavidades tienen una capacidad expansiva tal que pueden retener alrededor de 155 L de líquido ruminal (Cobos-Peralta y Shimada-Miyasaka, 2018), en donde se concentra una población de 10^9 a 10^{11} bacterias, 10^4 a 10^7 protozoarios y 10^3 a 10^5 hongos por cada mililitro (Krehbiel, 2014) dedicadas a metabolizar de forma específica las diferentes fracciones de la alimentación del ganado (Cuadro 2-1), gracias a esta capacidad de distensión la vaca puede tener un consumo de MS de alrededor del 3.5% de su PV (Peso vivo) (NASEM, 2021).

Cuadro 2-1. Principales microorganismos presentes en el rumen, sustrato y productos que se obtienen de sus procesos metabólicos.

Elaboración propia (Adaptado de Cobos-Peralta y Shimada-Miyasaka, 2018; Hobson y Stewart, 1997; Russell & Rychlik, 2001).

Sustrato	Microorganismo	Genero - Especie	PRINCIPALES PRODUCTOS					
			Acetato	Butirato	Propionato	NH ₃	H ₂	CH ₄
Celulosa	Bacterias	<i>Fibrobacter succinogenes</i>	X					
		<i>Ruminococcus flavefaciens</i>	X					
		<i>Ruminococcus albus</i>	X					
		<i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>	X	X				
		<i>Clostridium celulosolvens</i>	X					
	Protozoarios	<i>Eudiplodinium</i>	X	X	X		X	
		<i>Polyplastron</i>						
Hemicelulosa	Bacterias	<i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>	X	X				
		<i>Prevotella ruminicola</i>	X		X		X	
	Protozoarios	<i>Epidina</i>	X		X			
Almidón	Bacterias	<i>Ruminobacter amylophilus</i>	X					
		<i>Prevotella ruminicola</i>	X		X			
		<i>Streptococcus bovis</i>	X					
		<i>Prevotella ruminicola</i>	X		X			
		<i>Succinomonas amylolytica</i>	X		X			
		<i>Selenomonas ruminantium</i>	X	X	X		X	
	Protozoarios	<i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>	X	X				
		<i>Isotrichia</i>	X		X		X	X
		<i>Dasytrichia</i>	X		X		X	X
		<i>Entodinia</i>	X	X	X		X	X
Azúcares	Bacterias	<i>Epidina</i>	X		X		X	X
		<i>Ophryoscolex</i>	X		X		X	X
		<i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>	X	X				
		<i>Streptococcus bovis</i>	X					
		<i>Lachnospira multiparus</i>	X					
		<i>Eubacterium ruminantium</i>	X	X				
	Protozoarios	<i>Selenomonas ruminantium</i>	X	X	X		X	X
		<i>Isotrichia</i>	X		X		X	X
		<i>Dasytrichia</i>	X		X		X	X
		<i>Entodinia</i>	X		X		X	X
Proteína	Bacterias	<i>Prevotella ruminicola</i>	X		X	X		
		<i>Ruminobacter amylophilus</i>	X			X		
		<i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>	X	X		X		
		<i>Streptococcus bovis</i>	X			X		
		<i>Megasphaera elsdenii</i>	X	X	X	X		
Aminoácidos	Bacterias	<i>Peptostreptococcus anaerobius</i>	X			X		
		<i>Clostridium sticklandii</i>	X	X	X	X		
		<i>Prevotella ruminicola</i>	X	X	X	X		
Urea	Bacterias	<i>Butyrivibrio spp.</i>	X	X		X		
		<i>Selenomonas spp.</i>	X	X	X	X		
		<i>Eubacterium limosium</i>	X	X				
Lípidos	Bacterias	<i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>	X	X				
		<i>Eubacterium limosium</i>	X	X				
H ₂ , CO ₂	Bacterias	<i>Methanobrevibacter ruminantium</i>						X

NH₃: Amonio, H₂: Hidrógeno, CH₄: Metano, CO₂: Dióxido de Carbono

El omaso se conecta al retículo por medio del orificio retículo-omasal, dando paso al líquido ruminal con partículas aún sin degradar en rumen ayudando a retener y regresar las de mayor tamaño, haciendo funciones de una bomba de succión y absorción de agua, Ácidos Grasos

Volátiles (AGV), NH_3 , Na^+ , K^+ y CO_2 , así como la digestión del 7 al 9% del tracto total de algunas fibras (Hackman y Spain, 2010). Después, todo el contenido que aún se encuentran en el tracto pasa al abomaso, que es un saco alargado en el suelo abdominal de la vaca (Krehbiel, 2014) y es muy similar en funciones al estómago de los monogástrico; secreta ácido clorhídrico (HCL), pepsina y renina que ayudan con la degradación de proteína microbiana y algo de lo escapado del rumen (Ducharme *et al.*, 2017), para finalmente pasar a los intestinos delgado y grueso donde termina de realizarse la absorción de agua y algunos nutrientes para ser excretado por el recto todo el contenido no aprovechado (Cobos-Peralta y Shimada-Miyasaka, 2018).

Cada parte del tracto va regulando la capacidad del ganado lechero para ingerir más alimento y cubrir primero sus necesidades fisiológicas y luego aumentar su producción de leche, por lo que es indispensable considerar estas funciones para entender de mejor manera sus procesos alimenticios, saber qué es lo que estimula y qué frena el CMS.

2.3.2. Consumo de Materia Seca.

La MS es todo componente que se encuentra en el alimento al separar la humedad que pueda contener, por lo que buenos niveles de consumo están ligados a la energía que tendrá disponible la vaca para la salud, reproducción y producción (NASEM, 2021; Van Saun y Herdt, 2014). En general en la alimentación del ganado se trabaja con el sistema energético de Noblet *et al.* (1994), donde la Energía Bruta (EB) es lo que entra al sistema digestivo del animal del cual se expulsa en heces dependiendo de la degradabilidad del alimento entre 15 y 55% quedando la Energía Digestible (ED), y después se perderá un porcentaje en la producción de gases y orina alrededor del 18%, lo que resta es la Energía Metabolizable (EM), para finalmente perder energía con el Incremento Calórico (IC) que corresponde al aumento del calor derivado de la fermentación en el tracto digestivo, quedando al final lo que se conoce como Energía Neta (EN). Sin embargo, como se muestra en la Fig. 2-8 para el caso específico del ganado lechero se considera una serie de ecuaciones que estiman la digestibilidad de los diferentes componentes de los alimentos como la FDN, almidón y proteína (NRC, 2001), así como el peso vivo (PV) de la vaca y su CMS como el principal factor de digestibilidad de la FDN y el almidón, (NASEM, 2021).

El CMS de una vaca está determinado por factores como el número de lactancias, su peso, el estado reproductivo, su genética y el medio en el que se encuentra (Boston *et al.*, 2002). La selección genética ha jugado un papel fundamental, ya que se ha logrado aumentar el pico de rendimiento de leche hasta un 250% respecto a sus ancestros naturales y dicha selección se ha basado en el aumento del CMS (Hackman y Spain, 2010), registrando ingestas de hasta 28 kg de MS al día en vacas altas productoras (Knight, 2001).

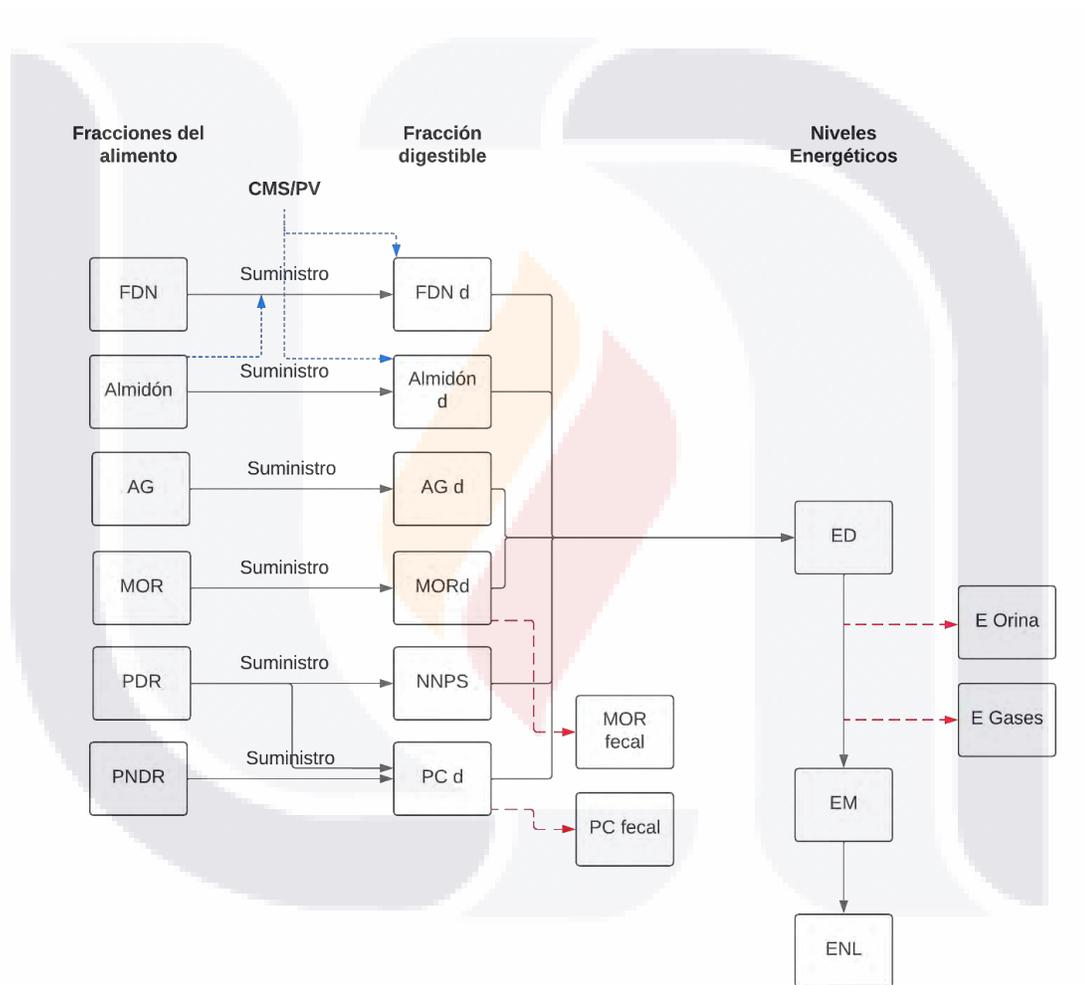


Figura 2-8. Esquema energético del ganado lechero.

(Elaboración propia. Adaptado de NASEM, 2021). FDN: Fibra Detergente Neutro, AG: Ácidos Grasos, MOR: Materia Orgánica Residual, PDR: Proteína Degradable en Rumen, PNDR: Proteína No Degradable en Rumen, d: digestible, NNPS: Nitrógeno No Proteico Suplementario, PC: Proteína Cruda, ED: Energía Digestible, EM: Energía Metabolizable, ENL: Energía Neta de Lactancia.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Las limitaciones del CMS se atribuyen normalmente a aspectos físicos que ocurren en el rumen, ya que el consumo alto de fibra en la dieta y su tiempo de digestibilidad puede provocar una distensión prolongada del retículo-rumen (Campling, 1970), este efecto se ve influenciado por el volumen y peso de la ingesta (Schettini *et al.*, 1999), lo que activa la transmisión de señales de tensión de los receptores localizados en el retículo y saco craneal hacia el cerebro (Leek, 1986; NASEM, 2021); sin embargo, Allen (1996) demostró que manteniendo un suministro similar de Energía Neta de Lactancia (EN_L), el volumen en el rumen no afectaba el CMS, por lo que el efecto físico de la dieta parece estar acompañado también de una respuesta a estímulos provocados por la absorción de nutrientes.

Si bien un uso mayor de forrajes en la dieta provoca una disminución del CMS por su concentración de fibras, usar una mayor cantidad de concentrado para aumentar su densidad energética puede provocar una disminución de la ingesta debido a un pH más bajo en rumen (Allen, 2000). La FDN en la dieta es fundamental ya que influye en factores como la velocidad de la digestibilidad y flujo del alimento regulados por el tamaño de partícula, motilidad del rumen, características funcionales del orificio retículo-omasal y la tasa de vaciado del abomaso (NASEM, 2021), afectando el grado de fermentación del alimento y provocando la estimulación de los receptores epiteliales ruminales por los AGV y electrolitos, además de los receptores hepáticos con el propionato (Allen, 2000), ya que al aumentar el flujo de este al hígado puede detonar en una señal de saciedad (Benson *et al.*, 2002).

Esencialmente, se debe tener un equilibrio entre carbohidratos fibrosos y concentrados dentro de la alimentación de la vaca lechera para beneficiar el aumento del CMS, procurando que este consumo tenga una buena densidad energética, proveyendo de nutrientes como carbohidratos, proteínas, grasas, minerales y vitaminas (Cobos-Peralta y Shimada-Miyasaka, 2018), siendo los carbohidratos y proteínas los que mayor porcentaje representan en la dieta. Se debe considerar el uso de Carbohidratos No Fibrosos (CNF) provenientes de fuentes preferentemente fermentables en el rumen (Oba y Allen, 2003), mientras que el efecto de la proteína parece tener menos impacto que los carbohidratos en el CMS (NASEM, 2021). Es debido a esto que dentro de la nutrición del ganado los factores más importantes que alteran

la composición de la dieta y en los que se basa la mayoría de los cambios es en los carbohidratos y proteínas.

2.3.3. Carbohidratos en la dieta del ganado lechero.

Los carbohidratos representan la mayor fuente de energía en la dieta del ganado lechero, entre el 60 al 70% del total de la ración (NASEM, 2021), son esenciales para el crecimiento de la biota ruminal al ser el sustrato de diferentes bacterias y protozoarios presentes en el rumen (Krehbiel, 2014). De forma general se clasifican según su estructura y solubilidad en diferentes medios como agua y detergentes neutros y ácidos (Fig. 2-9); los carbohidratos estructurales son los que aportan una mayor producción de acetato y butirato (Van Soest, 1994). Mediante algunas enzimas, el ganado lechero tiene la capacidad de digerir principalmente almidón y lactosa (Kreikemeier et al., 1990), mientras que las demás fracciones deben ser degradados por la biota de forma específica para poder ser aprovechados por la vaca.

La forma más común de cuantificar el contenido de fibra en los alimentos es con el método de Van Soest (1994), ya que recupera todos los componentes estructurales como hemicelulosa, celulosa y lignina, la cual es indispensable su medición. La lignina forma una red de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos, como el alcohol p-cumarílico, coniferílico y sinapílico, la cual cubre las estructuras de celulosa y hemicelulosa impidiendo la actividad enzimática de hongos y bacterias (Smith et al., 1972; Bansal et al, 2009). Los CNF como monosacáridos, disacáridos y algunos oligosacáridos, están presentes en diferentes cereales y derivados como la melaza (NASEM, 2021) y por su solubilidad son rápidamente disponibles para el aprovechamiento de los diferentes microorganismos presentes en el rumen.

El rumen tiene la capacidad de digerir casi en absoluto los CNF, a excepción del almidón que junto a la FDN dependerá de su fuente y procesamiento (NASEM, 2021). De las principales fuentes de almidón que existen, los cereales como el trigo y la cebada son los que tienen mayor digestibilidad en rumen con más del 70%, por encima del grano de maíz con un 54%,

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

aunque no presentan diferencias en su digestibilidad en el tracto total con un 94% (Ferraretto *et al.*, 2013); esto se debe al pericarpio más grueso del maíz y que los gránulos de almidón están rodeados por una capa de proteína, lo que ralentiza su disponibilidad para los diferentes microorganismos (McAllister *et al.*, 1994; Kotarski *et al.*, 1992). Cuando se trabaja con ensilajes de maíz, la fermentación aumenta la digestibilidad en rumen del almidón hasta un 64% (Ferraretto *et al.*, 2014). El almidón es uno de los carbohidratos que pueden tener un buen aprovechamiento tanto en rumen como de forma post ruminal, ya que entre un 5 y 10% se digiere hasta el intestino grueso (Gressley *et al.*, 2011), aunque este último no tenga efectos claros en la producción de leche o su composición; sin embargo, la digestibilidad en rumen de estas estructuras es importante porque de ello dependerá la disponibilidad de energía (ATP) para la síntesis de proteína por parte de los microorganismos (Nocek y Tamminga, 1991).

La DFDN y la disponibilidad de almidón están inversamente relacionadas, ya que la primera disminuye cuando se incrementa la inclusión de granos en la dieta (Oba y Allen, 2003; Ferraretto *et al.*, 2013). De forma intrínseca a la FDN, características como la proporción de lignina, celulosa y hemicelulosa, afectan su digestibilidad en rumen, así como la capacidad de CMS del animal, tamaño de partícula, etc., (NASEM, 2021).

Al mismo tiempo la FDN puede estar relacionada con la proteína metabolizable (PM), ya que forrajes con menor cantidad de Lignina (LDA) y mayor DFDN ayudan a aumentar la producción de Proteína Cruda Microbiana (PCM), atribuido a una mayor tasa de pasaje de partículas del rumen lo que aumenta el flujo de proteína disminuyendo su reciclaje por depredación de protozoarios en el rumen y aumentando su eficiencia incrementando con esto la PM (Oba y Allen, 2000; Allen, 2003). Es de esta forma como los carbohidratos y fibras se relacionan con el aprovechamiento y economía de otros componentes en la dieta como la proteína y por esto la importancia de estudiar de la mano estos dos componentes en la dieta del ganado lechero.

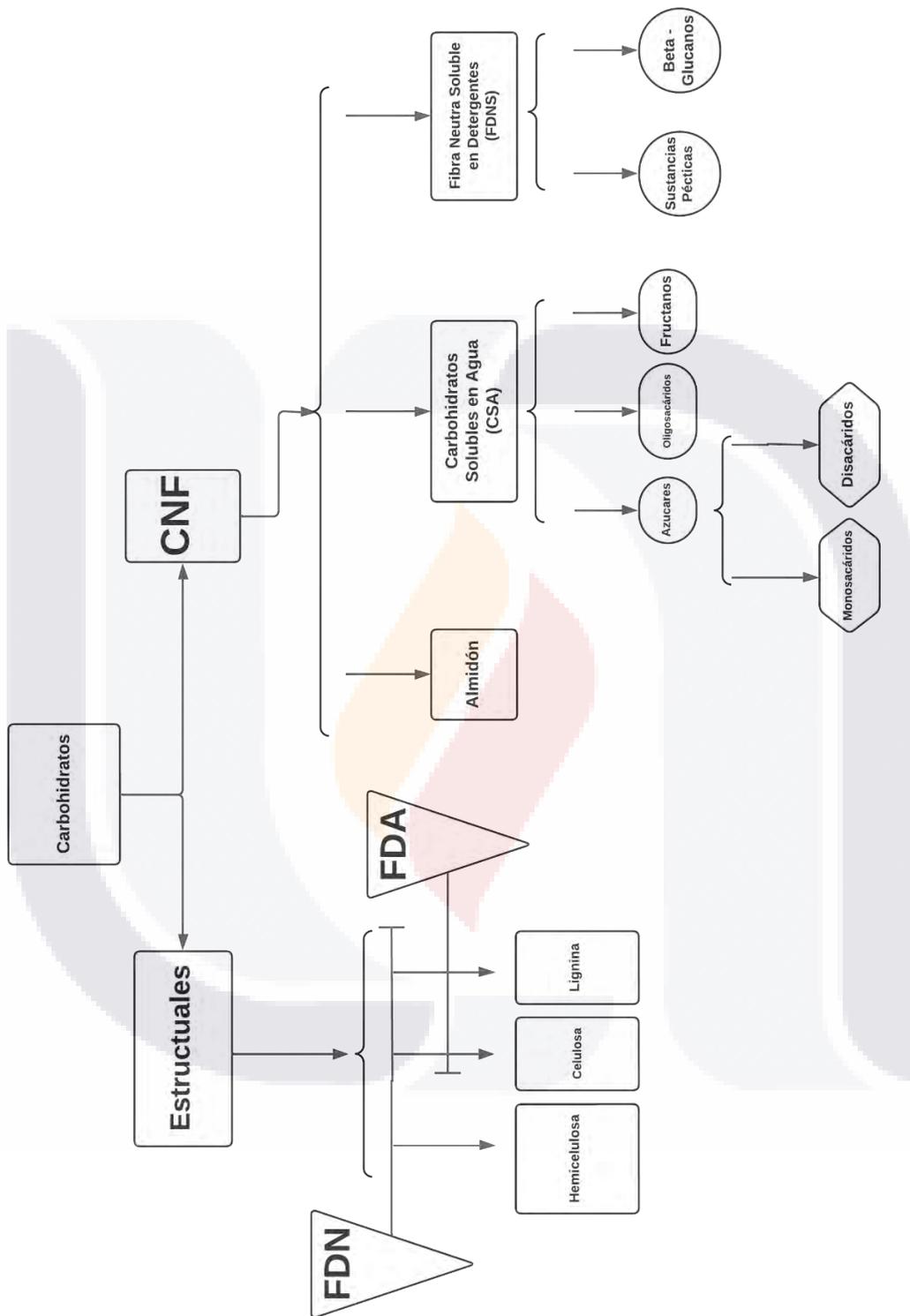


Figura 2-9. Fracciones de los carbohidratos presentes en los alimentos.

Elaboración propia (Adaptado de NASEM, 2021)

2.3.4. *Proteína en la dieta del ganado lechero.*

Para la proteína cruda (PC) se considera que todo el N en el alimento es proteína verdadera incluyendo al Nitrógeno No Proteico (NNP); además se asume que toda la proteína contiene en promedio 16% de N, y para calcular la PC se multiplica el porcentaje de N por 6.25 (NASEM, 2021). La vaca adquiere proteína básicamente de dos fuentes, la dietética y la microbiana, siendo ésta última fundamental ya que los microorganismos que habitan el rumen están compuestos entre 3 y 10 % de proteína en base húmeda que puede ser aprovechada por el organismo (Pérez-Barbería, 2020), dentro de las fuentes dietéticas se considera el nitrógeno proteico que proviene de los AA y péptidos, y el NNP como la urea dietética y de reciclaje mediante las glándulas salivales (NRC, 1985). En los sistemas de modelos energéticos como NASEM y CNCPS más recientes para estimar el uso de N en las dietas, se considera fundamental el suministro de PM, caracterizando la proteína de los alimentos en la fracción de Proteína Degradable en Rumen (PDR) y Proteína No Degradable en Rumen (PNDR).

La PDR contiene a la fracción de NNP como la urea y proteínas de estructura primaria y secundaria (p. ej. AA, oligopéptidos) que son inmediatamente aprovechados por la microflora del rumen para sintetizar proteína microbiana (Fig. 2-10). El N degradable en rumen termina en la producción de NH_3 que será tomado por los microbios en un proceso dependiente de energía en el rumen para sintetizar la proteína microbiana (Arriola *et al.*, 2014; Hristov y Broderick, 1994). La síntesis de PCM se relaciona con una adecuada fermentación de los carbohidratos como fuente de energía (Russell *et al.*, 1992). A mayor formación de PCM la fermentación de la MO y la degradación de la FDN aumentan, ayudando a tener una mayor tasa de paso hacia el abomaso (Fanchone *et al.*, 2013). Parte de esta PCM puede ser excretada en las heces en menor o mayor medida, según todos los factores antes mencionados (Eriksson *et al.*, 2004).

Toda la PNDR y una pequeña parte de la PCM pasa al abomaso e intestino delgado donde puede terminar su degradación y absorción como AA en la mucosa intestinal, para ser estos transportados por la vena porta hacia el hígado y finalmente ser enviados a los diferentes tejidos para el mantenimiento, crecimiento, reproducción y producción de leche (Martínez-

Montaño *et al.*, 2018). Los principales tejidos donde la proteína ayuda a la formación de masa es el tejido muscular donde se almacena alrededor del 50 % y la piel donde contribuye con el 20 %, mientras que el intestino y las glándulas mamarias son las zonas donde mayor síntesis de proteína se tiene con hasta 45 % en cada una (Lobley *et al.*, 2003).

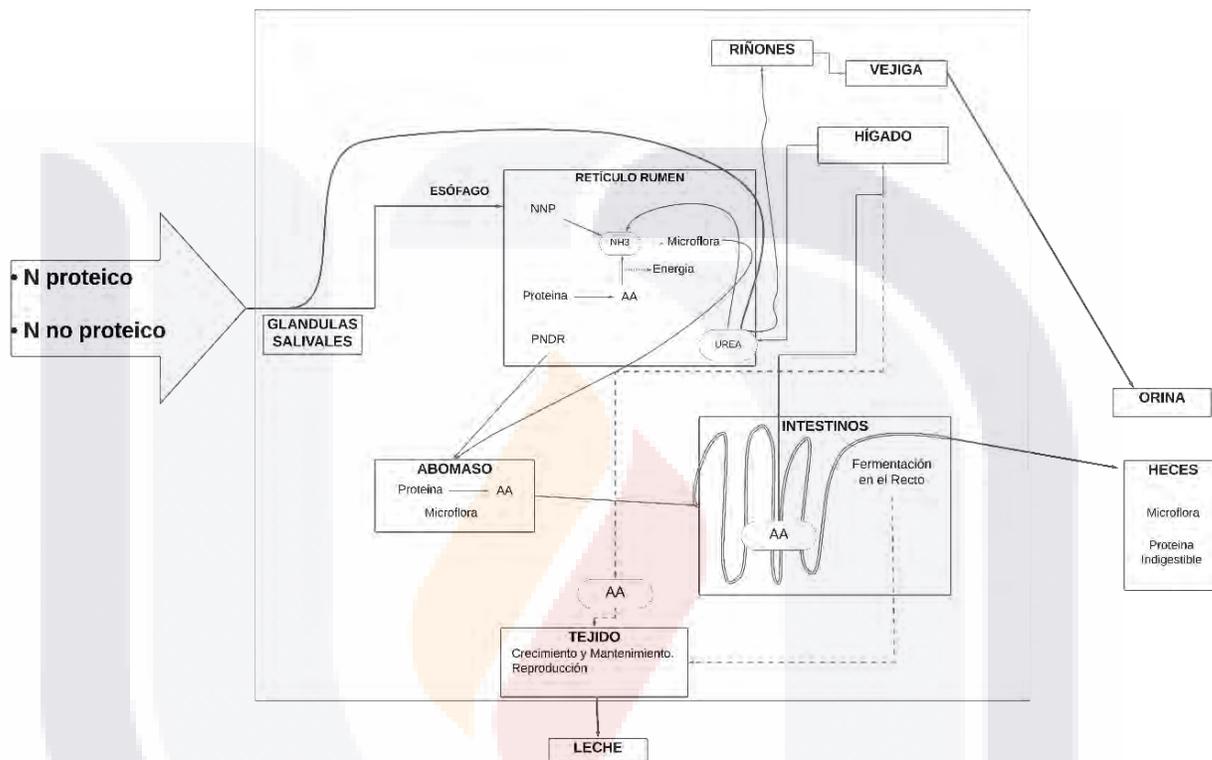


Figura 2-10. Flujo del N utilizado por los rumiantes.

Elaboración propia (Adaptado de NASEM, 2021; Cobos-Peralta y Shimada-Miyasaka, 2018)

La urea forma parte del NNP y al ser soluble en agua, tiene una alta velocidad de difusión en los fluidos corporales incluida la leche (Spek *et al.*, 2013). Esta difusión le permite a la urea ser fácilmente reutilizada; entre el 40 y el 80 % de lo que se sintetiza en el hígado regresa al rumen donde es aprovechada en la síntesis de PCM (Lapierre y Lobley, 2001). Dentro del rumen otra ruta de reciclaje de la urea es mediante la saliva que puede representar entre el 15 y el 50% del reciclaje total (Owens y Zinn 1988), dependiendo esto de las concentraciones de NH_3 en el rumen. Parte de la urea será dirigida a los riñones donde se excretará en la orina; sin embargo, esta fuente de N es muy soluble y fácilmente se perderá en el ambiente, por lo

que el N excretado en las heces, normalmente es el que se aprovecha en las actividades agrícolas como fertilizante.

2.4. EL ESTIERCOL Y EL RESIDUO DE COSECHA, LOS BENEFICIOS AL SUELO.

La calidad del suelo está en función de su potencial para sustentar la productividad vegetal, mantener y mejorar la calidad del agua y el aire, así como la salud animal y humana (SSSA, 2001). El suelo tiene características físicas, químicas y biológicas que le permite ser clasificado para su estudio. Física y estructuralmente, el suelo es ordenado por su contenido de arcilla, limo y arena, su color, profundidad y cantidad de capas de suelo conocidas como horizontes (USDA, 2014; FAO, 2015). Debido a las prácticas utilizadas en la agricultura y ganadería es indispensable suministrar nutrientes para mantener la fertilidad de los suelos (Navarro y Navarro, 2013). Uno de los principales indicadores de calidad y fertilidad en el suelo son los compuestos orgánicos; específicamente la MO, que en esencia es la descomposición de plantas y animales en el suelo donde se recircula el N en forma amoniacal y después se oxida a nitrato, en tanto que el C es asimilado dentro del tejido microbiano del suelo y otra parte se descompone hasta convertirse en humus, estos componentes provienen principalmente de lignina y polisacáridos como la celulosa y hemicelulosa (Weil & Magdoff, 2004).

2.4.1. Consideraciones básicas de los residuos de cosecha en el suelo.

Las proyecciones que se tienen a la fecha indican que la intensificación de la agricultura debido a la mayor producción de biomasa por superficie provocará un incremento en el secuestro de C en el suelo, lo que permitirá disminuir el aporte de CO₂ a la atmósfera ya que la principal contribución del sector agropecuario es por medio de la conversión de pastizales y bosques (Flach *et al.*, 1997). Las diversas fuentes de C presentes en los tejidos vegetales y animales como azúcares simples y polisacáridos, aportan energía disponible que ayuda a aumentar el aprovechamiento de elementos como el N (Strong y Fillery, 2002), mientras que la lignina reincorporada al suelo ayuda al almacenamiento de C a mediano y largo plazo (Paustian *et al.*, 2019); es en esto donde se encuentran las principales ventajas del uso de los residuos de cosecha como parte del manejo de la producción agrícola.

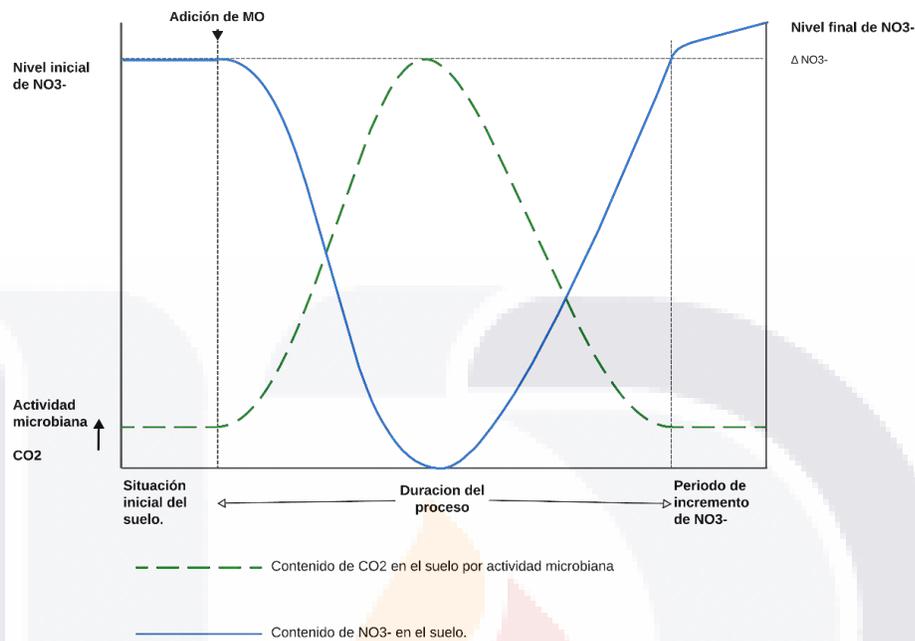


Figura 2-11. Proceso de la producción de nitratos en el suelo por la acción de microorganismos.

Elaboración propia (Adaptado de Navarro y Navarro, 2013).

En las gramíneas, la estructura de anclaje al suelo formada mayormente por raíces y la parte inferior del tallo, se componen de hemicelulosa: 25 – 30 %, celulosa: 25 – 30 % y lignina: 15 – 20 %, proteínas: 5 – 10 % y grasas: 5 – 12 %, mientras la parte aérea conocida como paja mantiene una relación C/N de 90:1 (Navarro y Navarro, 2013). Esto es un aporte importante al suelo ya que influye en la densidad y diversidad microbiana y la inmovilización del N al aumentar el C fácilmente disponible (Rasmussen y Rohde, 1988), lo cual ayudará al proceso de nitrificación (Fig. 2-11), teniendo como resultado una mayor concentración de nitrato. De forma ideal se considera una relación C/N de 25:1 para que se dé una tasa de descomposición alta; sin embargo, en el semiárido esta relación pudiera ser ligeramente menor debido a las condiciones de humedad y temperatura que se tienen (Hoyle *et al.*, 2006).

2.4.2. Consideraciones básicas de los estiércoles en el suelo.

La producción de forrajes para la alimentación del ganado lechero es solo una parte de un sistema integrado, que también incluye la gestión y el almacenamiento del estiércol (Rotz, 2004). Estos cultivos son una oportunidad de unir eslabones en la cadena de producción al proporcionar una salida a través de la aplicación en la tierra como fertilizante (Butler et al., 2008). Sin embargo, hace falta más información sobre parámetros ambientales, ya que en los sistemas de producción de forrajes la aplicación de estiércoles aumenta tanto la MO como el fósforo (P) de forma sustancial, pero puede acarrear otras consecuencias (O'Brien y Hatfield, 2019), principalmente puede aumentar la conductividad eléctrica (CE) y provocar la alcalinización del suelo (Trejo-Escareño *et al.*, 2013).

Los cultivos pueden recibir aportes de N en forma de: fertilizantes como la urea y el sulfato de amonio, abonos orgánicos y como resultado de la mineralización del N orgánico del suelo (Mikha *et al.*, 2006). La mineralización de N produce amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) que son absorbidos por las plantas (Ali *et al.*, 2021); por esto, es que el estiércol puede sustituir el uso de los fertilizantes químicos, ya que aporta N y P aprovechable (Figuroa-Viramontes *et al.*, 2009). Sin embargo, deben considerarse las limitaciones de uso del estiércol ya que su mal manejo puede causar el riesgo de lixiviación de nitratos a las fuentes de agua subterránea (Martínez-Rodríguez *et al.*, 2006). Otros trabajos también destacan el incremento de nitratos en aguas superficiales donde se aplicaron estiércoles; sin embargo, es posible que este incremento se deba a la adición de N mediante fuentes comerciales (Streeter *et al.*, 2023).

Entre los productores lecheros en México, la aplicación de estiércol se realiza sin un tratamiento previo y puede ser usado tanto en fresco como en seco, con aplicaciones que alcanzan las 150 t ha^{-1} en peso húmedo (Acevedo-Peralta *et al.*, 2017). La aplicación de estiércol basado únicamente en N normalmente da como resultado un exceso de P. Una forma de hacer un mejor manejo del estiércol es aplicándolo al suelo limitando su uso a los requerimientos de P y después complementar el requerimiento de N con fertilizantes químicos (Newton *et al.*, 2003).

Dentro de la gestión de los estiércoles, las estimaciones precisas de la producción podrían mejorar la planificación de los sistemas y el cálculo de los balances de nutrientes en los

establos lecheros; Wilkerson *et al.* (1997) presentó una serie de ecuaciones para el ganado lechero lactante y no lactante, donde de forma general menciona que un establo estará produciendo alrededor de 9 kg de estiércol en base seca por vaca al día que contiene alrededor de 230 g de N. Esto nos pudiera aportar información importante para un mejor uso de los recursos en la explotación lechera y tener una mayor eficiencia en la producción.



III. ESTUDIOS

3.1. METODOLOGÍA GENERAL

3.1.1. Ubicación

El presente trabajo se realizó entre el año 2022 y 2023 en el predio Los Arquitos al norte del municipio de Lagos de Moreno, Jalisco; en la llanura Lagos - Aguascalientes. El rancho se ubica en las coordenadas 21.761404 LN y 102.001161 LO a una altitud de 1900 msnm. El tipo de clima es semiárido templado (Ruiz-Corral et al., 2021; García, 2004) con temperatura y precipitación media anual de 16 °C y 450 mm respectivamente, concentrando la época de lluvias en los meses de junio a septiembre (CONAGUA, 2024). La clasificación del suelo a la que pertenece esta zona es del tipo Calcisol Háplico, que corresponde al tipo de suelo calcáreo constituido por materiales ricos en bases como potasio (K⁺) y sodio (Na⁺), lo cual es su principal limitante para el uso agrícola (SEMARNAT, 2023).

3.1.2. Material biológico vegetal

En los estudios 1 y 3 se utilizó una variedad de maíz de grano blanco semidentado; el híbrido seleccionado fue Supremo (ASPROS®, Toluca, México). Este híbrido se seleccionó por ser una de los mejor evaluados en el INIFAP CEPAB en calidad forrajera, rendimiento y sanidad (Santana y Peña, 2021 y 2022).

3.1.3. Material biológico animal

Para el desarrollo del estudio 2 se utilizaron 128 vacas de la raza Holstein. El trabajo se inició con una producción media de 39 kg vaca d⁻¹, y corrales balanceados en 120 días en leche y dos partos promedio entre primíparas y multíparas. Además, en el estudio 3 se utilizó el estiércol de los corrales utilizados en el estudio 2.

3.1.4. Instalaciones y equipo agrícola

El trabajo se realizó en un pivote central de 6 torres serie 7000 (VALLEY®, Valley, NE). Para la preparación del terreno se utilizó un tractor 6125E (JOHN DEERE®, Moline, IL) con un subsuelo de 9 timones ASB-F119 (AMSSA®, Aguascalientes, México) y una rastra de 32

discos MX425 (JOHN DEERE®, Moline, IL), en el resto de las labores agrícolas se utilizó un tractor 5090-E (JOHN DEERE®, Moline, IL); el establecimiento de los cultivos se realizó con una sembradora de cuatro hileras MaxEmerge 1750 (JOHN DEERE®, Moline, IL), las labores culturales como escardas y aplicación de fertilizantes al suelo se realizaron con una cultivadora de 5 timones CPA-F35 (FENIX®, Aguascalientes, México), para la aplicación de agroquímicos se utilizó una aspersora 890009 (SWISSMEX®, Jalisco, México). El ensilado de maíz se realizó con una cosechadora autopropulsada Big X 630 (KRONE®, Spelle, Alemania) y el apisonado del silo con un tractor 9300 (JOHN DEERE®, Moline, IL).

3.1.5. Instalaciones y equipo pecuario

Para la evaluación en vacas se utilizaron cuatro corrales tipo Free Stall. En el ordeño y toma de datos se usó una ordeñadora de salida rápida doble dieciséis EnDurance acompañado de su software DelPro FarmManager 5.5 (DeLaval®, Tumba, Suecia). Para la alimentación del ganado se utilizó un carro mezclador Labrador 120 (STORTI®, Verona, Italia) acompañado del software FarmLink4 (PERIN WEIGHMASTER®, Codogno, Italia) para la gestión y trazabilidad de la alimentación del ganado.

3.1.6. Instalaciones y equipo de laboratorio.

Todas las pruebas realizadas de química proximal para el ensilado de los estudios 1 y 3; así como raciones, rechazos, heces y determinación de nitrógeno en sangre, leche y orina del experimento 2 se utilizaron los procedimientos de la AOAC (2016). Para determinar MS, cenizas, FDN, FDA, lignina y PC, así como nitrógeno en sangre, leche y orina se utilizaron las instalaciones del INIFAP-CEPAB, mientras que la determinación de grasa se realizó en el Laboratorio de Bromatología de FOGASA, Aguascalientes. Para las pruebas de digestibilidad *in situ* se usaron vacas rumen-fistuladas de la Escuela Nacional de Lechería Sustentable en Zapotlanejo, Jalisco.

En el estudio 1 y 3 fue necesario realizar diferentes análisis para determinar las propiedades fisicoquímicas del suelo, por lo que en base a la NOM-021-SEMARNAT-2000 se enviaron las muestras de suelo para su posterior análisis al Laboratorio de Suelos del INIFAP-CEZAC en Calera, Zacatecas.

3.1.7. Resumen de las etapas metodológicas

Este trabajo se dividió en tres etapas presentadas como Estudios (Fig. 3-12), de manera escalonada cada estudio fue complementario a los demás, de forma que cerró el círculo de producción lechero típico del sistema de la región (Robledo-Padilla, 2018).

En el Estudio 1 (E1), se estableció el cultivo de maíz para la producción de ensilado. Aquí mediante un muestreo se estimó la producción, perfil nutrimental, fermentativo y digestibilidad del maíz cosechado a tres alturas de corte (AC20, AC30 y AC40) y el tallo remanente de los tratamientos AC30 y AC40, después se dividió la parcela en dos para realizar la cosecha total del predio con dos alturas de corte (AC18 y AC35) almacenando en silos diferentes lo correspondiente a cada altura de corte.

En el Estudio 2 (E2), se usaron los silos del E1 (AC18 y AC35) con los que se elaboraron cuatro dietas usando dos Balances de Proteína Metabolizable (BPM) con una base de 2,528 g d⁻¹ (PM+302 y PM+152). Con estas dietas se alimentaron 128 vacas divididas en cuatro corrales y se estimó el CMS, balance de N, se midió la producción y composición de leche. De cada dieta donde se utilizó silo AC18 y AC35 se recolectó el estiércol haciendo dos pilas para un proceso de semi compostaje, una por cada tipo de silo usado en la dieta.

Finalmente, en el Estudio 3 (E3), se usaron los dos estiércoles del E2 para ver su interacción con los residuos de cosecha del E1 y evaluar la parcela en cuanto a su capacidad de producción de forrajes. Se estimó la producción y perfil nutrimental del forraje, y algunas condiciones físicas y químicas del suelo.

De esta forma se pudo observar los efectos que se tiene en las diferentes etapas productivas de un rancho lechero de la región, elevar la altura de corte a cosecha del ensilaje de maíz.

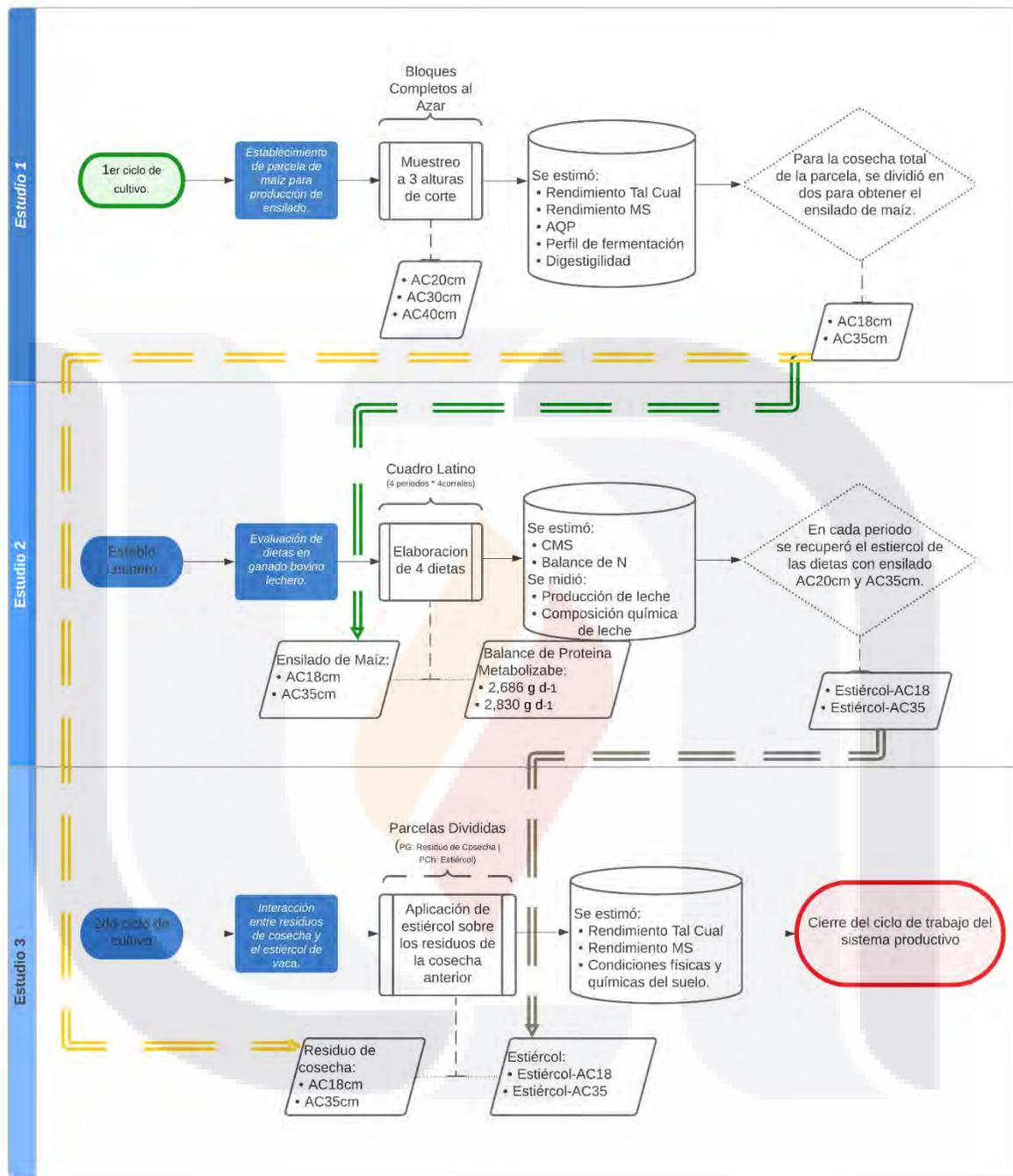


Figura 3-12. Diagrama de flujo de las etapas metodológicas.

3.2. ESTUDIO 1.

ENSILADO DE MAÍZ COSECHADO A DIFERENTES ALTURAS DE CORTE.

Rendimiento, composición bromatológica, digestibilidad y perfil de fermentación.

3.2.1. *Introducción.*

A nivel mundial, se destina alrededor del 63% de la producción de maíz para el consumo animal (FIRA, 2024). Dentro de los sistemas intensivos lecheros en México, la producción de forrajes es fundamental para bajar costos en la alimentación del ganado y es el maíz forrajero el cultivo mayormente utilizado (Figueroa-Viramontes, 2015). El ensilado de maíz ha tenido una gran aceptación en las zonas productoras de leche como Aguascalientes, La Laguna y Querétaro que, junto con la inclusión de la pasta de soya en la RTM, ha desplazado otros forrajes importantes como la alfalfa (Santana, 2018). La inclusión de ensilado de maíz puede llegar a representar alrededor de un 40% de la dieta del ganado lechero en producción (Adesogan *et al.*, 2019), teniendo un impacto directo en los costos de alimentación ya que es una fuente barata de energía y fibra.

Si bien el cultivo de maíz tiene un uso preferente sobre otros como la alfalfa debido a su eficiencia en el uso de agua durante el cultivo (Pedroza-Sandoval *et al.*, 2014) y al aporte de fibra de mayor calidad, debemos considerar sus limitaciones (Ferraretto *et al.*, 2018). La FDN y su digestibilidad son factores para tomar en cuenta (Van Soest, 1994), ya que pudiera convertirse en un factor que restrinja el CMS (Oba & Allen, 1990); específicamente la lignina puede ser la principal limitante, ya que debido a su acomodo entrelazado en la pared celular disminuye la accesibilidad de enzimas para la hidrólisis de la hemicelulosa y celulosa (Bansal, *et al.*, 2009).

El mejoramiento en la alimentación del ganado lechero se debe enfocar en el aumento de la digestibilidad de la ración y una producción de cultivos forrajeros que en su manejo aporten a la fertilidad de los suelos (Britt *et al.*, 2018). Es por esto, que elevar la altura de corte del maíz a la cosecha para su ensilaje es una estrategia que nos puede ayudar a incrementar la digestibilidad del forraje (Ferraretto *et al.*, 2018), modificando su contenido de FDN, MS y almidón, y con esto la digestibilidad del forraje (Ferreira y Mertens, 2005). Buscando responder a la hipótesis H1, en este estudio se trabajó con tres alturas de corte a la cosecha

del maíz para evaluar el impacto en diferentes parámetros productivos y de calidad forrajera según lo planteado en el objetivo OE1.

3.2.2. *Materiales y Métodos.*

Área de estudio. El primer experimento se estableció en el ciclo primavera verano del 2022 en la planicie Lagos-Aguascalientes dentro del predio Los Arquitos en la localidad de Betulia al norte del municipio de Lagos de Moreno, Jalisco. El cultivo de maíz se estableció en un cuarto de pivote central de 6 torres correspondiente a 9.6 ha y se desarrolló bajo condiciones climáticas regulares (Fig. 3-13), se tuvo una precipitación acumulada de 357.5 mm efectivos durante el cultivo y un rango óptimo de temperaturas en gran parte del ciclo según lo referido por la FAO (Steduto *et al.*, 2012) que van de 10°C hasta los 30°C para el buen desarrollo del cultivo de maíz.

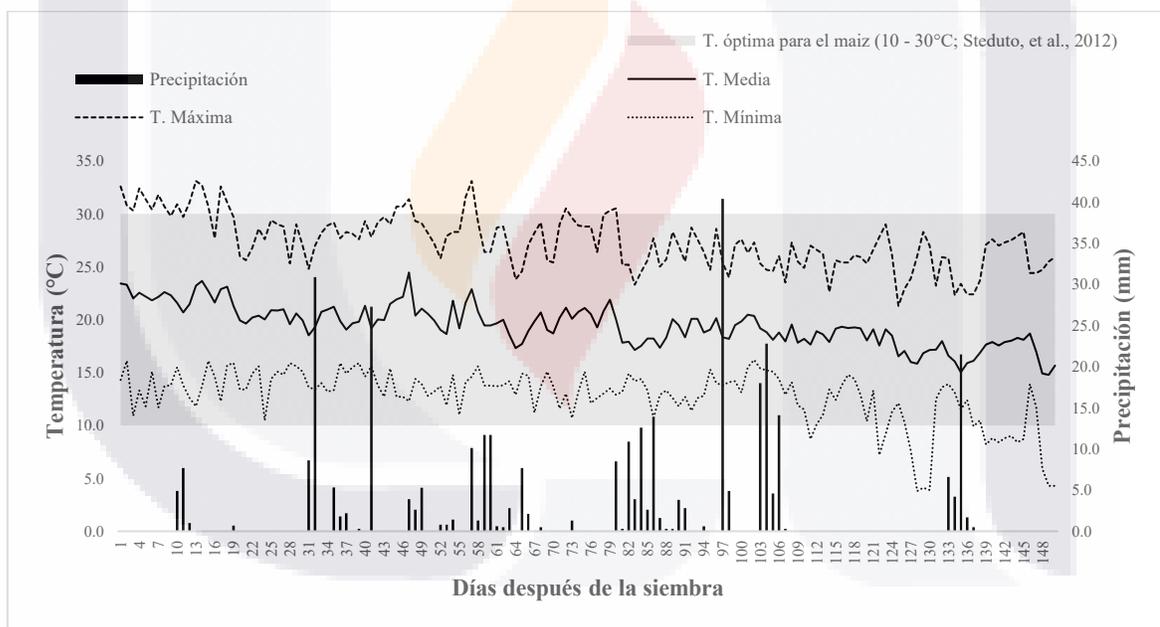


Figura 3-13. Datos climáticos registrados durante el periodo experimental (26 de mayo al 22 de octubre del 2022).

Manejo agronómico. Se sembró en suelo húmedo el 26 de mayo del 2022 utilizando el híbrido Supremo (ASPROS®, Toluca, México) a una densidad de 96,000 semillas ha⁻¹. El manejo de la nutrición se hizo en base al análisis de suelo aplicando 280 kg ha⁻¹ de N, 26 kg ha⁻¹ de Pentóxido de Fósforo (P₂O₅) y una mezcla de micronutrientes. La aplicación del fertilizante fue el total de P y micronutrientes en la siembra, mientras que el N se fraccionó usando el

20% en la siembra, 50% en la escarda previo al riego de los 40 días después de la siembra (DDS) y 30% vía foliar mediante el uso del riego previo a la aparición de la espiga a los 75 DDS. Las fuentes utilizadas fueron Fosfato Monoamónico (MAP), Sulfato de amonio, Micromix II (MEZFER®, Celaya, México), Yara Bela Nitromag (YARA®, Oslo, Noruega) y UAN-32 (ISAOSA®, Zapopan, México). Se aplicaron 3 riegos de presiembra y 6 riegos de auxilio a los 20, 28, 45, 75, 115 y 130 DDS. Para el manejo de plagas y enfermedades se aplicó para gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) a los 15 DDS spinoteram, Exalt (CORTEVA®, Indianápolis, IN.) y a los 30 DDS se aplicó lambdacihalotrina + clorantraniliprol, Ampligo (SYNGENTA®, BS, Suiza); por último a los 115 DDS se aplicó de forma preventiva un fungicida azoxystrobin + propiconazol, Quilt (SYNGENTA®, BS, Suiza). En cuanto al control de malezas se usó de forma preemergente acetoclor + clopiralid-olamina + flumetsulam, Surestar (CORTEVA®, Indianápolis, IN.) y de forma post emergente a los 70 DDS se usó dicamba + atrazina, Marvel (SYNGENTA®, BS, Suiza), además del control mecánico en la escarda a los 40 DDS.

Diseño experimental. Se consideró un diseño en bloques completos al azar en el que las dos torres centrales del pivote fueron cada una un bloque; se tuvieron tres tratamientos de altura de corte 20, 30 y 40 cm sobre la base del suelo (AC20, AC30 y AC40, respectivamente) y en cada tratamiento se seleccionaron tres parcelas experimentales (n=18) de un surco de 0.76 m de ancho y 5.8 m de largo. Las variables que se determinaron fueron rendimiento de forraje en base seca, composición nutrimental, digestibilidad y perfil de fermentación del ensilado de maíz forrajero en planta completa y en tallo remanente.

Toma de muestras y registro de datos. La toma de muestras se realizó el 22 de octubre al acumular 1,527 unidades calor (UC) (Fig. 3-14), la madurez del grano estuvo en etapa R4 (3/4 avance línea de leche) y se tuvo un tamaño de planta promedio de 2.5 m de alto. En cada parcela se contó y cortó el total de plantas a 20, 30 y 40 cm sobre el nivel del suelo y se registró el peso fresco de cada muestra de planta completa; a la vez, se cortó el residuo del tallo remanente de los 20 cm hasta la altura donde se hizo el corte de planta completa, es decir en AC20: 0 cm, AC30: 10 cm y AC40: 20 cm y se registró el peso fresco de cada muestra (Fig. 3-15).

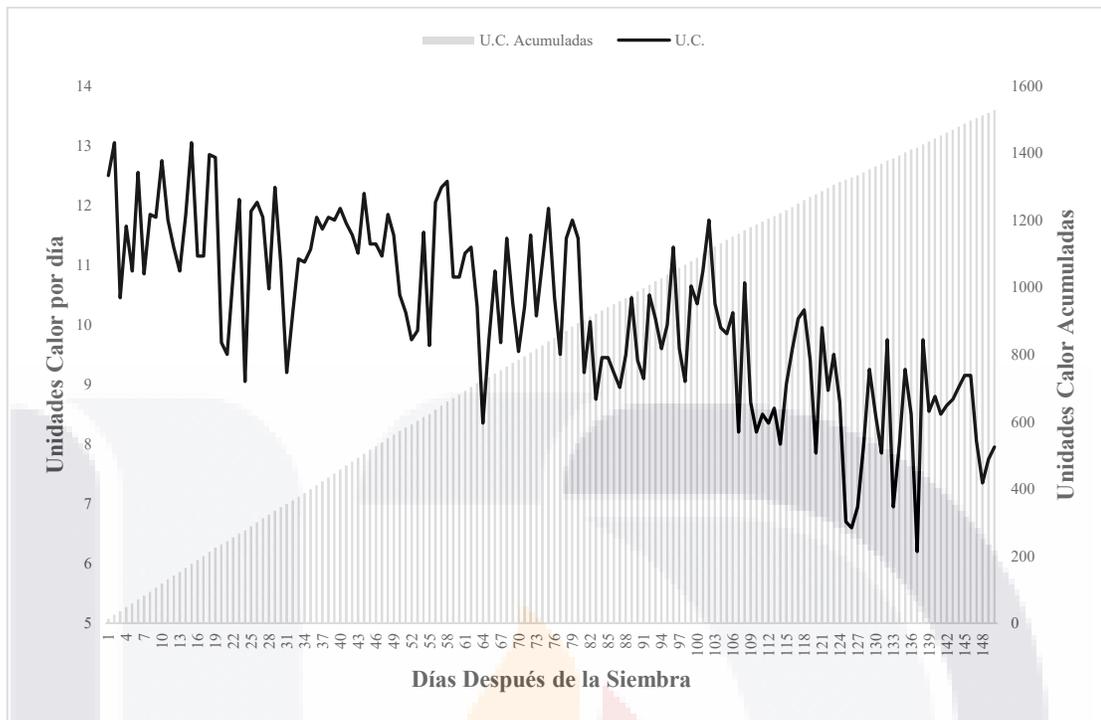


Figura 3-14. Comportamiento diario y acumulado de las Unidades Calor ($UC=(T_{max} + T_{min})/2 - T_{base}$) durante el periodo experimental (26 de mayo al 22 de octubre del 2022).

En las muestras de planta completa fueron tomadas al azar 5 plantas para ser molidas con una picadora 30-P (JF®, São Paulo, Brasil) y en las muestras del tallo remanente se molieron el total de la muestra a un tamaño de particula de ~20 mm, se tomó una muestra de ~200 g para secar a 55 °C hasta peso constante y determinar materia seca (MS) y otra muestra de ~200 g fue introducida en bolsa gofrada y se extrajo el aire para hacer mini silos al alto vacío.

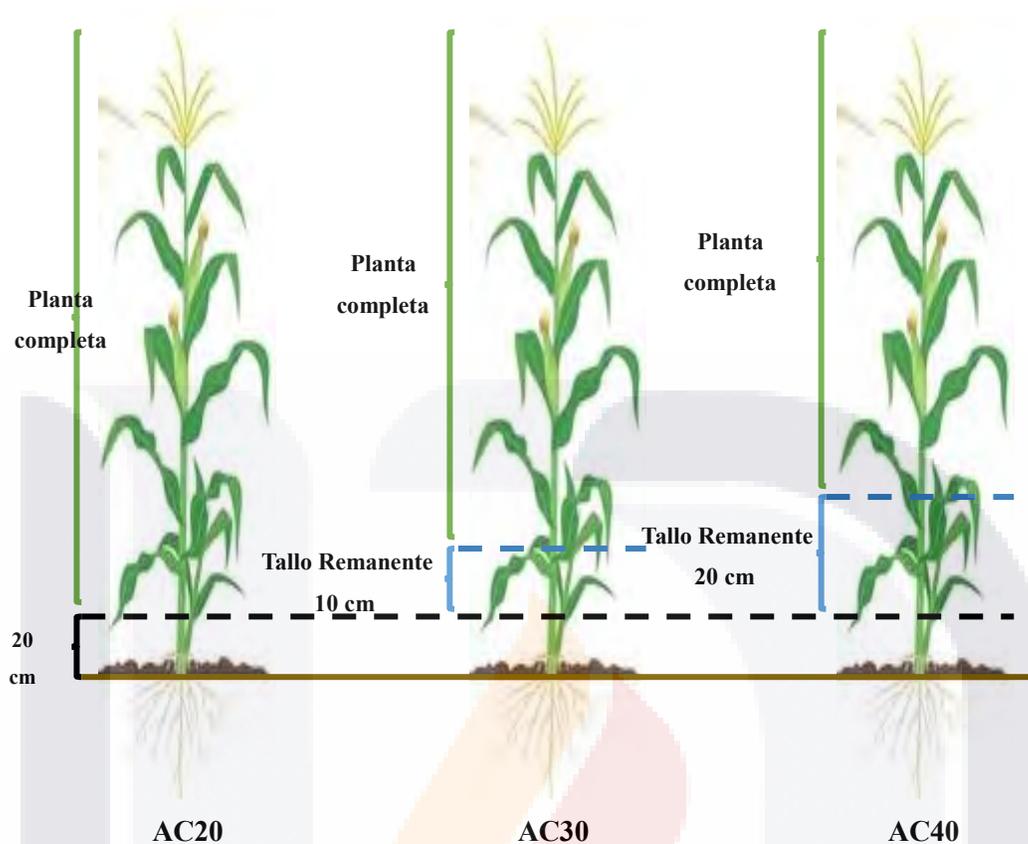


Figura 3-15. Esquema de corte de planta completa y tallo remanente en cada uno de los tratamientos del E1.

Análisis químico y digestibilidad. Los análisis se realizaron en el laboratorio de forrajes del INIFAP – CEPAB utilizando los procedimientos de la AOAC. Todos los mini silos fueron abiertos a los sesenta y cinco días de fermentación, se tomó una muestra de 20 g y se licuó por 30 seg en 200 mL de agua destilada, el extracto se filtró a través de una capa doble de malla quesera e inmediatamente se determinó el pH con un potenciómetro Orion Star A214 (Thermo Sci. ®, Waltham, MA). Del extracto filtrado, se tomaron 40 mL y se le agregaron 0.4 mL de H₂SO₄ (Ácido Sulfúrico) al 50%, la muestra se centrifugó a 7,000 xg durante 15 minutos y se tomaron 4 mL del sobrenadante para determinar N-NH₃ (Nitrógeno amoniacal) utilizando el procedimiento de Noel y Hambleton (Ferrareto et al., 2018). El mini silo

remanente se pesó y seco a 55 °C hasta peso constante, la muestra se molió en criba de 1 mm en un molino Wiley Modelo 4 (Thomas Sci. ®, Delaware, PA) para análisis bromatológico y digestibilidad. El contenido de cenizas se determinó al incinerar la muestra a 550 °C por 6 horas en una mufla Fisher Isotemp 338F (Thermo Sci. ®, Waltham, MA). La determinación de FDN y FDA se hizo de manera secuencial en bolsas F-57® en el analizador de fibras A200 (ANKOM Technologies®, Macedon, NY), enseguida la determinación de lignina sumergiendo las bolsas en una solución de H₂SO₄ al 72%. El N total se determinó utilizando el procedimiento de Kjeldahl semi automatizado, y la PC se calculó como N total x 6.25. El extracto etéreo se analizó en un laboratorio externo (FOGASA, Aguascalientes). La digestibilidad de la MS y FDN se determinó al incubar muestras en duplicado en bolsas de dacrón R1020 (ANKOM Technologies®, Macedon, NY) en el saco ventral de dos vacas rumen-fistuladas por 24, 48 y 120 horas.

Análisis estadístico. Todos los datos fueron analizados en el programa RStudio (POSIT®, Boston, MA) utilizando el siguiente modelo estadístico:

$$Y = \mu + B_i + T_j + E_{ij}$$

Donde Y es la variable respuesta, μ es la media general, B es el efecto aleatorio de bloque ($n=2$), T es el efecto fijo en la altura de corte ($n=3$), E es el error experimental. Además, en los datos de digestibilidad se incluyó el efecto aleatorio de vaca ($n=2$) dentro del modelo antes descrito. La significancia estadística se declaró a $P < 0.05$ y la tendencia a $0.5 \leq P < 0.10$. Las medias que se presentan en los cuadros son medias de mínimos cuadrados (LSMeans) que se obtuvieron utilizando la instrucción del paquete *emmeans* del programa estadístico antes mencionado.

3.2.3. Resultados y Discusiones.

Agronómicos. Los resultados agronómicos tanto para planta completa como para el tallo remanente en el caso de las alturas de corte AC30 y AC40 se muestran en el Cuadro 3-2. El contenido de MS fue de $31.7 \pm 2.8\%$ y tendió a incrementar al elevar la altura de corte ($P =$

0.10), lo cual es similar a lo reportado por Santana *et al.* (2021). El contenido de MS en el tallo remanente para los tratamientos AC30 y AC40 fueron similares con un promedio de 19.4%. Por otro lado, en el RMS (Rendimiento de Materia Seca) no se encontró diferencia significativa entre tratamientos ($P = 0.34$), sin embargo, su rendimiento promedio de $14.4 \pm 2.9 \text{ t ha}^{-1}$ en base seca fue por debajo del rendimiento de otros trabajos reportados con 26 t ha^{-1} utilizando el mismo híbrido (Santana *et al.*, 2021); esto pudo deberse a las condiciones de clima, suelo y manejo del riego. Otros trabajos encontraron diferencias de rendimiento entre las alturas de corte de hasta 2.9 t ha^{-1} al elevar de 15 hasta 45 cm (González *et al.*, 2005) que coincide con una reducción de hasta el 7% del RMS al elevar la altura de corte de 13 a 46 cm (Neylon y Kung, 2003); estas diferencias pueden ser por los días a cosecha y los híbridos utilizados ya que son diferentes entre los trabajos, la acumulación de MS y por lo tanto su rendimientos tiene más relación entre el híbrido y la madurez de la planta (Ramírez-Gutiérrez *et al.*, 2024).

Cuadro 3-2. Concentración y rendimiento de MS de planta completa y tallo remanente, en respuesta a la altura de corte en cosecha.

	Tratamiento ¹			EEM	Valor ² P
	AC20	AC30	AC40		
Planta completa					
MS, %	30.4	32.4	32.2	0.67	0.10
Rendimiento MS, t ha^{-1}	15.0	14.3	14.0	0.69	0.34
Tallo remanente					
MS, %	-	19.6	19.3	-	-
Rendimiento MS, t ha^{-1}	-	0.4	0.7	-	-

¹AC20: 20 cm de altura de corte, AC30: 30 cm de altura de corte, AC40: 20 cm de altura de corte (sobre el nivel del suelo).

²Significancia estadística.

MS: materia seca, t: toneladas, ha: hectárea.

Análisis bromatológico. En el Cuadro 3-3 se presentan los datos de composición química de los diferentes tratamientos, así como valores obtenidos para el tallo remanente. Para el caso de PC no se observaron diferencias significativas entre tratamientos teniendo un promedio de $7.4 \pm 0.7 \%$, este valor es similar a lo reportado en otros trabajos que van de 7.6% (Santana *et al.*, 2021, 2022) hasta 8.06% (Bernard *et al.*, 2004), aunque hay trabajos que reportan incrementos de hasta el 2% al elevar la altura de corte (Wu y Roth, 2023) realmente no son diferencias significativas para este parámetro.

Cuadro 3-3. Composición química y rendimiento de nutrientes del ensilado de planta completa y tallo remanente del maíz cosechado a tres alturas de corte.

	Tratamiento ¹			EEM	Valor ² P
	AC20	AC30	AC40		
Planta completa					
PC, % MS	7.6	7.5	7.1	0.16	0.11
FDN, % MS	38.8 ^a	34.0 ^b	35.6 ^b	0.96	<0.01
FDA, % MS	20.4 ^a	18.8 ^{ab}	17.1 ^b	0.75	<0.01
Lignina, % MS	1.8	1.7	1.6	0.08	0.05
Cenizas, % MS	4.6 ^a	3.9 ^{ab}	3.3 ^b	0.26	<0.01
CNF, % MS	46.2 ^b	51.8 ^a	51.2 ^a	0.37	<0.01
ENL, Mcal kg ⁻¹	1.61 ^b	1.71 ^a	1.72 ^a	0.02	<0.01
ENL, Mcal ha ⁻¹	24,150	24,453	24,080	688	0.95
Tallo remanente³					
PC, % MS	-	6.1	5.7	-	-
FDN, % MS	-	64.7	69.8	-	-
FDA, % MS	-	37.9	40.7	-	-
Lignina, % MS	-	5.8	4.7	-	-
Cenizas, % MS	-	8.7	8.3	-	-
CNF, % MS	-	17.6	13.4	-	-
ENL, Mcal kg ⁻¹	-	0.5	0.3	-	-
ENL, Mcal ha ⁻¹	-	187.8	244.8	-	-

¹AC20 = 20 cm de altura de corte, AC30 = 30 cm de altura de corte, AC40 = 20 cm de altura de corte (sobre el nivel del suelo).

²Significancia estadística.

³Tallo remanente en campo que corresponde a los tratamientos AC30 y AC40.

MS = materia seca, PC = proteína cruda, FDN = fibra detergente neutro, FDA = fibra detergente ácido, CNF = carbohidratos no fibrosos calculados (100 - % FDN - % PC - % Cenizas - 2.8 % grasa), ENL = energía neta de lactancia estimada con la ecuación 2-11 del NRC (2001), kg = kilogramos, ha = hectárea.

En el contenido de FDN se detectó una diferencia de 4.8 % al aumentar la altura de corte de AC20 a AC30 ($P < 0.01$). Al respecto, en otros trabajos se reportan disminuciones de hasta 7.4 % de la FDN (Kruczynska *et al.*, 2001; Wu y Roth, 2023); no obstante, a lo anterior se debe considerar el germoplasma utilizado en cada uno de ellos. Ahora bien, comparando el resultado en el presente estudio con el mismo híbrido se reporta una diferencia de 4.3 unidades porcentuales menos de FDN al elevar la altura de corte de 15 a 40 cm (Santana *et al.*, 2021). Para el caso de la FDA se tuvo diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) entre tratamientos solo al elevar la altura de corte de AC20 hasta AC40 al disminuir de 20.4 a 17.1 % en base a MS,

similar a la diferencia de 2.4% y 3.74% reportado en otros trabajos (Caetano et al., 2011; Wu y Roth, 2023); aunque no de forma significativa, se observa una tendencia en las concentraciones de lignina al disminuir 0.2 % al elevar la altura de corte de AC20 hasta AC40 ($P = 0.05$), resultados similares a los observados en otros trabajos donde la lignina disminuye entre 0.4 % y 0.5 % de lignina (Kung et al, 2008; Diepersloot et al., 2022).

En el caso de las cenizas se obtuvieron valores promedio de 3.9 ± 0.26 %, lo cual está por debajo de lo reportado en otros trabajos con el mismo híbrido (Santana et al., 2021, 2022). En el presente trabajo, al elevar la altura de corte de AC30 a AC40 se disminuyó el contenido de cenizas en 1.3 % ($P < 0.01$), aunque en otros trabajos se reportan incrementos de hasta 1.8 unidades (Wu y Roth, 2023; Bernard et al., 2004; Kung et al., 2008). Existe una diferencia significativa ($P < 0.01$) de 5.3 % de CNF al elevar la altura de corte de AC20 hasta AC30 sin tener diferencias con AC40, comportamiento que coincide a lo observado en otros trabajos donde se reporta un aumento de 6.6% (Santana et al., 2021, 2022); sin embargo, en este trabajo se observó mayor concentración total con 49.73 ± 1.1 % de CNF, difiriendo con lo reportado en los otros trabajos con no más del 39.3 %, las discrepancias en el incremento entre trabajos puede deberse a una diferencia de altura total de la planta, ya que el grano se diluye en menor cantidad de planta total. La concentración de energía incrementó al elevar la altura de corte de AC20 hasta AC30 con una diferencia de 0.10 Mcal kg^{-1} ($P < 0.01$) pero no así de AC30 a AC40, logrando una concentración energética de 1.71 Mcal kg^{-1} superior a lo reportado en otros trabajos similares de 1.27 Mcal kg^{-1} con el mismo híbrido (Santana et al., 2021); sin embargo, se tiene una concentración similar de $\text{EN}_L \text{ ha}^{-1}$ promediando $24,227 \pm 2,752$ Mcal ha^{-1} .

Resultados de digestibilidad. Los resultados obtenidos de digestibilidad de MS y FDN se encuentran en el Cuadro 3-4. La digestibilidad de la MS incrementó al elevar la altura de corte de 20 a 30 cm, pero no incrementó de 30 a 40 cm tanto a 24 horas como a 48 horas; al pasar a 120 horas la digestibilidad de la MS no tuvo diferencias significativas. Los componentes de la planta afectan la digestibilidad de la materia seca por lo que al aumentar la altura de corte se tiene un mayor porcentaje de digestibilidad a las 48 horas (Caetano et al., 2011) de forma similar a lo observado en el presente estudio al aumentar la digestibilidad in situ hasta en 2.9%. La digestibilidad de la FDN a 24 h difirió entre AC20 y AC40, mientras AC30 fue similar a las otras

dos alturas de corte; en tanto que la digestibilidad de la FDN a 48 h fue superior en AC30 y AC40 comparado con AC20 (ambos $P < 0.05$). Contrario a lo esperado, la fracción de FDNND₁₂₀ (Fibra Detergente Neutro no digestible a 120 horas) no difirió entre tratamientos y se tuvo un promedio de 28.3 ± 3.36 % en base de la FDN; coincidiendo con lo reportado en otros trabajos en donde la FDNND no tiene diferencias significativas entre tratamientos (Santana *et al.*, 2021).

Cuadro 3-4. Digestibilidad de la MS y FDN de la planta completa y tallo remanente del ensilado de maíz cosechado a diferentes alturas de corte.

	Tratamiento ¹			EEM	Valor ² P
	AC20	AC30	AC40		
Planta completa					
DMS ₂₄ , % MS	68.5 ^b	71.3 ^a	71.4 ^a	0.713	<0.05
DMS ₄₈ , % MS	75.7 ^b	78.6 ^a	78.4 ^a	0.36	<0.01
DMS ₁₂₀ , % MS	86.0 ^b	87.2 ^a	87.4 ^a	0.31	<0.05
DFDN ₂₄ , % FDN	31.6 ^b	32.5 ^{ab}	33.3 ^a	0.88	<0.05
DFDN ₄₈ , % FDN	48.0 ^b	49.7 ^a	49.8 ^a	0.28	<0.05
FDNND ₁₂₀ , % FDN	29.0	27.9	28.1	0.56	0.28
Tallo remanente					
DMS ₂₄ , % MS	-	38.9	46.9	-	-
DMS ₄₈ , % MS	-	44.0	52.4	-	-
DMS ₁₂₀ , % MS	-	59.7	64.0	-	-
DFDN ₂₄ , % FDN	-	25.0	29.3	-	-
DFDN ₄₈ , % FDN	-	31.7	37.3	-	-
FDNND ₁₂₀ , % FDN	-	50.8	53.2	-	-

¹AC20: 20 cm de altura de corte, AC30: 30 cm de altura de corte, AC40: 20 cm de altura de corte (sobre el nivel del suelo).

²Significancia estadística.

MS: materia seca, FDN: fibra detergente neutro, DMS: digestibilidad de la materia seca, DFDN: digestibilidad de la fibra detergente neutra, FDNND: fibra detergente neutra no digestible.

Digestibilidad *in situ* a 24, 28 y 120 horas

De forma complementaria, en la Fig. 3-16 se presenta un modelo de la degradabilidad de la MS utilizando la ecuación Orskov & McDonald (1979).

$$DMS(t) = A + B*(1 - \exp(-kd * t))$$

Donde A es la fracción soluble, B es la fracción lenatamente degradable, kd es la constante de degradación por hora (%/d), y t es el tiempo de degradación en el rumen (horas). Se observa que en el tiempo cero (Fracción A - soluble) se presenta el mismo porcentaje desaparición de MS en los tratamientos AC20 y AC30, mientras el AC40 tiene un porcentaje mayor de 45.4 %. Sin embargo, a partir de las 24 horas los tratamientos AC30 y AC40 mantienen el mismo porcentaje de degradabilidad (Fracción B), mientras que el AC20 pierde degradabilidad hasta de 3.42 %. La constante de degradabilidad (kd, %/h) es mayor en el AC30, que en AC20, debido a una mayor proporción de CNF.

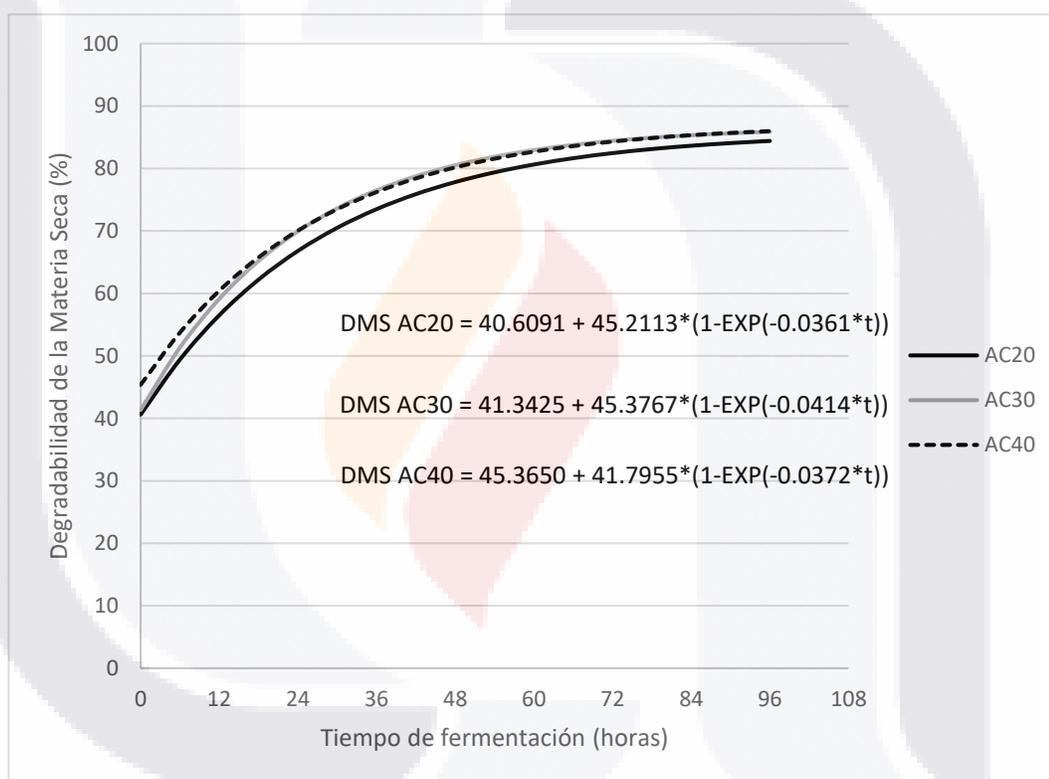


Figura 3-16. Curva de degradabilidad de la MS de los tres tratamientos del E1.

Perfil de fermentación. No se detectaron diferencias en el pH del ensilado de planta completa entre las diferentes alturas de corte, lo anterior también aplica para el pH del ensilado del tallo remanente de AC30 y AC40 (Cuadro 3-5). De acuerdo con Diepersloot *et al.* (2022) el pH del ensilado no difiere al elevar la altura de corte, aunque se pueden observar diferencias en ésta y

otras variables como el tiempo de almacenamiento. En el presente estudio, el N-NH₃ promedió 0.3 ± 0.08 % en base a MS, lo cual es similar a los reportados por Filya (2003). El comportamiento del perfil de fermentación en el tallo remanente se puede considerar similar a los micro silos de planta completa.

Cuadro 3-5. Perfil de fermentación de la planta completa y tallo remanente del ensilado de maíz cosechado a tres alturas de corte.

	Tratamiento ¹			EEM	Valor ² P
	AC20	AC30	AC40		
Planta completa					
pH	4.0	4.1	3.9	0.04	0.19
N-NH ₃ , % MS	0.27	0.30	0.34	0.02	0.11
Tallo remanente					
pH	-	3.77	4.1	-	-
N-NH ₃ , % MS	-	0.09	0.38	-	-

¹AC20 = 20 cm de altura de corte, AC30 = 30 cm de altura de corte, AC40 = 20 cm de altura de corte (sobre el nivel del suelo).

²Significancia estadística.

pH = potencial de hidrógeno, N-NH₃ = nitrógeno amoniacal, MS = materia seca.

3.2.4. Conclusiones.

Los resultados obtenidos en el primer estudio indican que elevar la altura de corte a cosecha en el maíz forrajero si es una práctica viable para aumentar la calidad nutricional del ensilado, ya que se incrementa la degradabilidad de la FDN y aumenta la concentración de los CNF. Sin embargo, lo anterior es cierto hasta elevar la altura de corte solo hasta los 30 cm, lo cual corresponde al 12% de la altura de planta total para este estudio.

3.3. ESTUDIO 2. PRODUCCIÓN DE LECHE.

Ensilado de maíz cosechado a diferentes alturas de corte y su efecto en vacas lecheras alimentadas con dos BPM.

3.3.1. *Introducción.*

En México se producen al año más de 13 millones de toneladas de leche fresca de vaca, siendo el décimo sexto productor a nivel mundial (FAO, 2024). Las cuencas más importantes son La Lagunera, Aguascalientes, Delicias y El Bajío; después de La Laguna con más de 2,800 millones de toneladas anuales, le sigue la cuenca de Aguascalientes con una producción de poco más de 740 millones de toneladas al año (SIAP, 2024). El consumo de productos lácteos en México rebasa su capacidad de producción en un 23 %, lo que lo convierte en importador principalmente de leche descremada en polvo (FIRA, 2023).

La brecha entre la producción y la demanda en México es explicada por la heterogeneidad de los sistemas productivos que existen (Camacho-Vera *et al.*, 2017). El sistema de producción intensivo en México aporta alrededor del 50% de la producción nacional (SE, 2012); este sistema se caracteriza por su alto nivel de tecnificación e inversión, así como la capacidad de producir sus propias pasturas como henos y ensilajes de maíz principalmente (Gallegos-Daniel *et al.*, 2022).

En sistemas intensivos como los que se encuentran en la cuenca de Aguascalientes, el ensilaje de maíz puede corresponder hasta un 40% de la dieta en base a MS de una vaca en producción (Santana 2018), aportando energía y fibras necesarias para la salud ruminal y buena producción lechera (Ferraretto *et al.* 2018). Al utilizar ensilados de maíz en la dieta, se debe considerar una mayor DFDN ya que esto podrá limitar el CMS (Campling, 1970), y disminuir la eficiencia del aprovechamiento de la PM (Firkins *et al.*, 1998; Allen, 2003).

Si bien la proteína representa alrededor del 16% de la RTM en base a MS (NASEM, 2021), los costos de producción y traslado de los ingredientes que aportan a la PC influyen para que estos insumos sean de los más costosos dentro de la dieta (SNIIM, 2024). La eficiencia en el aprovechamiento de la PC es fundamental y para determinarla es común hacer la estimación del Balance de Nitrógeno (BN) (Owen, 1967). También se debe contemplar si la proporción

del suministro de la proteína es mediante PDR o PNDR ya que esto afecta directamente a la producción de PCM y el flujo de N y AA (Santos *et al.*, 1998), alterando de esta forma la PM (NASEM, 2021).

En este estudio se busca responder la hipótesis H2 al evaluar el comportamiento en ganado lechero de cuatro dietas con dos ensilados de maíz cosechados a diferente altura de corte y dos BPM, determinando su producción, composición de sólidos en leche, digestibilidad aparente y su BN según lo planteado en el objetivo OE2.

3.3.2. *Materiales y Métodos.*

Área de estudio. Este estudio es continuación de los trabajos realizados en el E1, por lo que se realizó de enero a abril del 2023 en el establo perteneciente al predio Los Arquitos, ubicado en la localidad de Betulia al norte del municipio de Lagos de Moreno, Jalisco. Se utilizaron cuatro corrales tipo Free-Stall y una ordeñadora de salida rápida doble dieciséis EnDurance (DeLaval®, Tumba, Suecia).

Manejo de corrales. Se repartieron ciento veintiocho vacas de la raza Holstein en cuatro corrales. De tal forma que cada corral quedó con treinta y dos vacas multíparas y balanceado en ciento veinte días en leche con una producción media de 39 kg vaca-día⁻¹ al inicio del estudio. La alimentación se sirvió dos veces al día como una RTM ofrecida al 50 % en cada servida a las 4:15 y 16:15 horas, se permitió un rechazo de no más del 5 % siendo recogido antes de la segunda servida. Las vacas tuvieron acceso libre a agua y alimento todo el tiempo y fueron ordeñadas todos los días a las 4:00 y 16:00 horas.

Diseño experimental. Se utilizó un diseño experimental en Cuadro Latino 4 × 4 para los corrales y períodos con un arreglo factorial 2 × 2 en las dietas para evaluar el ensilaje de maíz cosechado a dos alturas de corte (AC18 y AC35: Altura de corte de 18 cm y 35 cm sobre el nivel del suelo, respectivamente) y su interacción con dos concentraciones de PM (PM-C y PM-B: de 2,830 g d⁻¹ y 2,680 g d⁻¹, respectivamente) como se muestra en el Cuadro 3-6. Cada corral se consideró como una unidad experimental para los parámetros de CMS y producción de leche, mientras que para estimar el BN, digestibilidad aparente y composición de la leche se tomaron 5 vacas al azar correspondiente al 10 % + 1 de la población en cada corral

(Tempelman, 2009; Bello et al., 2016). Cada período experimental fue de veintiún días, de los cuales catorce días fueron de adaptación a la dieta y siete días se usaron para el muestreo y la recopilación de datos.

Cuadro 3-6. Matriz de distribución de las dietas por corral y período experimental.

Corral	Período			
	P-1	P-2	P-3	P-4
C-1	Dieta A	Dieta B	Dieta D	Dieta C
C-2	Dieta B	Dieta A	Dieta C	Dieta D
C-3	Dieta C	Dieta D	Dieta B	Dieta A
C-4	Dieta D	Dieta C	Dieta A	Dieta B

Dieta A: AC35PM+302, Dieta B: AC35PM+152, Dieta C: AC18PM+302, Dieta D: AC18PM+152

Como se muestra en el Cuadro 3-7, la dieta se compuso de 41.4 % de ensilado de maíz, 4.3 % heno de avena-triticale, 27.5 % y 26.7 % de grano de maíz molido para las dietas con AC18 y AC35 respectivamente, 24.4 % y 25.2 % de núcleo proteico para las dietas con AC18 y AC35 respectivamente y 2.4 % de premezcla mineral. El BPM se alteró desplazando soya de sobrepaso y pasta de canola del núcleo y adicionando 50 g de urea vaca-d⁻¹. Las dietas fueron iso-energéticas (1.60 Mcal kg⁻¹) e iso-proteicas (16.4 % de PC). La diferencia de la PM se predijo en base a un requerimiento de 2,528 g d⁻¹ para las características de las vacas utilizadas en este estudio (NRC, 2001), siendo el tratamiento de PM de 2,830 g d⁻¹ el control (PM-C) como normalmente se utiliza en el establo y 2,680 g d⁻¹ el tratamiento con PM baja (PM-B) como se modificó al sustituir la soya de sobrepaso canola del núcleo original con urea; el tratamiento control fue la Dieta C ya que es como se maneja normalmente donde se realizó el trabajo.

Cuadro 3-7. Ingredientes y composición química de las dietas usadas en el Estudio 2.

	AC18		AC35	
	PM-C	PM-B	PM-C	PM-B
<i>Ingrediente, % de la MS</i>				
Ensilado de maíz AC20	41.4	41.4	-	-
Ensilado de maíz AC35	-	-	41.4	41.4
Heno de triticale	4.3	4.3	4.3	4.3
Rastrojo de maíz (molido)	-	0.4	-	0.4
Grano de maíz molido	27.5	27.5	26.7	26.7
Núcleo PM +302	24.4	-	25.2	-
Núcleo PM +152	-	24.0	-	24.8
Premezcla mineral	2.4	2.4	2.4	2.4
Forraje:Concentrado	45:55	45:55	45:55	45:55
<i>Composición, % de la MS</i>				
PC	16.8	16.4	16.8	16.4
PDR	10.0	9.9	10.0	10.0
PNDR	6.8	6.5	6.8	6.4
BPM, g d ⁻¹	+352	+150	+349	+167
FDN	28.0	28.0	27.7	27.6
FDNfe	20.3	20.3	20.0	19.8
FDA	16.2	16.8	15.6	15.4
CNF	45.3	45.6	45.8	45.8
EE	4.1	4.1	4.1	4.1
Cenizas	5.8	5.9	5.6	6.1
ENL, Mcal kg ⁻¹	1.61	1.60	1.61	1.60

PC: Proteína cruda. PDR: Proteína degradable en rumen. PNDR: Proteína no degradable en rumen. BPM: Balance de proteína metabolizable (Requerimiento base: 2,528 g d⁻¹). FDN: Fibra detergente neutra. FDNfe: Fibra detergente neutra físicamente efectiva. FDA: Fibra Detergente Neutra. CNF: Carbohidratos no fibrosos. EE: Extracto etéreo. ENL: Energía neta de lactancia

La composición de los forrajes utilizados en las dietas se presenta en el Cuadro 3-8. Encontrando diferencias importantes entre los ensilados de maíz. Tal como se observó en el E1, los ensilados cosechados a mayor altura contienen una menor concentración de FDN con mayor DFDN y mayor concentración de CNF, lo cual se tuvo que considerar en las dietas

para balancear la RTM. La altura de corte se determinó como AC18 (18 cm sobre el nivel del suelo) conforme a la forma en que habitualmente cosechan en el predio donde se llevó a cabo el trabajo y AC35 (35 cm sobre el nivel del suelo) como un promedio de los tratamientos AC30 y AC40 del E1, que fue donde se encontraron las mejores cualidades nutrimentales.

Cuadro 3-8. Composición nutrimental de los forrajes usados en las dietas del Estudio 2.

	SM (AC18)	SM (AC35)	HT	RM ¹
MS	37.8	39.9	90.9	93.6
PC	8.4	8.6	8.9	5.5
FDN	43.7	41.3	54.1	72.5
FDA	25.2	23.4	32.8	37.6
CNF	38.9	41.2	23.5	12.8
EE	3.1	3.2	2.0	1.4
Cenizas	6.0	5.7	8.6	7.8
DFDN ₄₈ , % FDN	48.0	49.7	47.0	-
NDFDN, % MS	11.2	9.9	-	-
NDFDN, % FDN	25.6	24.0	-	-

SM: Ensilado de maíz. HT:Heno de triticales. RM:Rastrojo de maíz molido

¹ Valores de DairyOne.

DFDN₄₈: Fibra detergente neutro digestible a 48 h. NDFDN: Fibra detergente neutro no digestible.

Registro de datos y toma de muestras. De forma semanal se estuvo monitoreando la MS de los ensilados de maíz utilizando una freidora de aire RC-106 (RCA®, New York City, NY). En la tercera semana de cada período experimental, por tres días consecutivos se registraron los kg de RTM servidos y se pesó el rechazo de alimento en 24 h. Una muestra de éstos fue secada a 55 °C hasta peso constante para determinar MS y el análisis de química proximal se realizó en el INIFAP siguiendo el procedimiento del E1. El consumo de MS se calculó a nivel corral como la diferencia entre el alimento servido y rechazado en base a MS, dividido entre 32 vacas.

La producción de leche se registró durante siete días de forma individual y por corral en el software del equipo de ordeño DelPro FarmManager 5.5 (DeLaval®, Tumba, Suecia) y se obtuvo el promedio diario por corral y por dieta. En cada corral se seleccionaron al azar cinco vacas para determinar su peso corporal y obtener muestras de leche por cuatro ordeños consecutivos, iniciando en el ordeño p.m. del primer día que se registró consumo de MS. Las muestras se mantuvieron a 4 °C hasta obtener la del ordeño a.m del día siguiente y ser

enviadas al LPDSA (GILSA®, Aguascalientes, México), en donde se analizó lactosa, grasa y proteína con Milk Analyzer (Lactoscan®, Sliven, Bulgaria) y otra parte de la muestra se usó para determinar Nitrógeno Ureico en Leche. Usando estas mismas vacas se recolectó muestras de orina y heces para la digestibilidad y determinación de Nitrógeno Ureico en Orina y Heces, así como muestras de sangre para determinar mediante el suero la concentración de Nitrógeno Ureico en Sangre.

Las muestras de orina y heces se colectaron cuatro horas antes y cuatro horas después de cada servida de alimento; es decir, a las 00:00, 08:00, 12:00 y 20:00 horas. En cada uno de estos muestreos se recolectaron alrededor de 100 g de heces del recto de cada vaca almacenando en un recipiente de plástico sellado y se mantuvo a 4 °C durante los días de muestreo y se congeló al final de cada período a -20 °C para su posterior análisis en laboratorio. La orina se tomó del chorro medio después de la estimulación manual en la zona próxima a la vulva, se tomaron 5 mL que se pasaron a un envase provisional donde se agregó 25 mL de H₂SO₄ al 0.072N; después de ser homogenizada la muestra se transfirieron 10mL a un envase que se mantuvo a 4 °C durante el período de muestreo y se congeló al final de cada período a -20 °C para su posterior análisis en laboratorio.

Al final de cada período experimental se tomó una muestra de sangre de la vena o arteria coccígea 4 horas después de la servida de alimento matutina, se utilizaron tubos de tapa roja 368175 (BD Vacutainer®, Sumter, SC); la muestra fue centrifugada a 5,000 × g por 15 minutos y finalmente se transfirió únicamente el suero a un micro vial de 1.5 mL, después se conservaron a -20 °C para su posterior análisis en laboratorio.

El primero y último día de cada semana de muestreo se determinó el peso corporal de las vacas muestreadas utilizando una cinta para estimar el peso de ganado lechero Holstein (COBURN®, Whitewater, WI), método con una variación aleatoria muy pequeña que le permite ser utilizado para la estimación del peso de las vacas (Heinrichs *et al.*, 2007).

Para la digestibilidad aparente, se secaron las muestras de heces y RTM y se molieron para determinar cenizas, PC y FDN utilizado los procedimientos de química proximal antes mencionados. Se introdujo una muestra de ~0.5 g de heces y RTM en bolsas F57 (ANKOM

Technologies®, Macedon, NY) y se incubaron en el saco ventral de 2 vacas rumen-fistuladas durante 240 h para determinar la FDN no digerible (FDNi) como marcador interno para calcular la producción de heces mediante la ingesta de FDNi en la RTM dividida por la concentración de FDNi en las heces (Cochran et al., 1986; Huhtanen et al., 1994). Al final se corrieron las muestras para cenizas, PC y FDN y determinar la digestibilidad aparente (DATT) a nivel corral, tomando como referencia los valores obtenidos de las 5 vacas muestreadas.

Para la partición de N, las muestras de orina se diluyeron 1:50 en agua destilada para determinar la concentración de N-ureico urinario utilizando el procedimiento enzimático en el que se convierte la urea en NH₃ por medio de la acción de la enzima ureasa a una concentración de 4,000 UI (Fawcett y Scott, 1960). La concentración de creatinina se analizó en las mismas muestras diluidas de orina, se asumió una excreción diaria de 29 mg kg⁻¹ de peso corporal de creatinina (Valadares *et al.*, 1999), para lo cual se utilizó un kit comercial (Spinreact®, Girona, España) en donde se añade 1 mL de picrato de sodio y la reacción colorimétrica se lee a los 30 y 90 segundos a una absorbancia a 492 nm en un espectrofotómetro Genesys 10S (Thermo Sci. ®, Waltham, MA).

Análisis estadístico. Todos los datos fueron analizados en el programa RStudio® (POSIT, Boston, MA) utilizando el siguiente modelo estadístico:

$$Y = \mu + A_i + P_j + (A \times P)_{ij} + R_k + E_{ijk}.$$

Donde Y es la variable respuesta, μ es la media general, A es el efecto fijo de altura de corte del ensilado de maíz, P es el efecto fijo del balance de proteína metabolizable, $A \times P$ es la interacción entre la altura de corte del ensilado y el balance de proteína metabolizable, R es el efecto fijo del período experimental, E es el error experimental. Para los datos de CMS y producción de leche se consideraron los corrales (n=4) y las dietas (n=4) teniendo una n=16 para estas variables; mientras que para los datos obtenidos de las 5 vacas muestreadas se consideraron las vacas (n=5), las dietas (n=4) y los períodos (n=4) teniendo una n=80 para estas variables. Las diferencias significativas fueron declaradas a $P \leq 0.05$ y las tendencias

se declararon a $0.10 \geq P > 0.05$; las medias fueron separadas utilizando la diferencia mínima significativa (LSD, por sus siglas en inglés).

3.3.3. *Resultados y Discusiones.*

Consumo y Producción. El desempeño productivo se presenta en el Cuadro 3-9. Al igual que lo reportado en otros trabajos no se detectaron diferencias en el CMS y la media fue de 24.7 ± 1.9 kg vaca-d⁻¹ (Wu *et al.*, 2001; Kung *et al.*, 2008); sin embargo, Bernard *et al.* (2004) si encontró diferencias de CMS en la interacción entre el uso de ensilados de maíz con diferente altura de corte y el híbrido utilizado, pudiéndose explicar más por las características del híbrido y su madurez al momento de la cosecha (Ramírez-Gutiérrez *et al.*, 2024). De igual forma, se mantuvo el mismo consumo de MO, FDN y PC con promedio de 23.35 ± 1.8 kg vaca-d⁻¹, 6.84 ± 0.55 kg vaca-d⁻¹ correspondiente a 1.06 ± 0.10 % del PV y 4.14 ± 0.31 kg vaca-d⁻¹, respectivamente.

Se encontraron diferencias en la producción de leche de hasta 1 kg vaca-d⁻¹ en las dietas donde se utilizó ensilado de maíz cosechado a mayor altura tal como se reporta en otros trabajos (Wu *et al.*, 2001; Neylon y Kung, 2003); pero a diferencia de estos, en el presente estudio al calcular la LCE si se mantiene el incremento en la producción de 1 kg vaca-d⁻¹ pero solo como una tendencia. La ECA no tuvo diferencias entre las dietas con una media de 1.56 ± 0.13 , similar a lo reportado por Kung *et al.* (2008); sin embargo, otros trabajos reportan que se tiene una tendencia a aumentar la ECA en hasta 0.05 cuando se suministra ensilado de maíz cosechado a mayor altura de corte, pero dependiendo del híbrido que se utilice para la alimentación del ganado (Neylon y Kung, 2003; Bernard *et al.*, 2004).

Según lo reportado por Allen (2000) y M'hamed *et al.* (2001) el incremento de la proteína en la dieta debería afectar el CMS y con esto tener efectos positivos en la digestibilidad del rumen modificando la producción y composición de la leche; sin embargo, lo observado en este trabajo la PM no tuvieron efecto en la producción y solo se observó en la composición de la leche una tendencia en la concentración de grasa en leche aumentando hasta 0.06% al disminuir la PM en la dieta, sin que esto marcara una diferencia en la producción total de grasa entre tratamientos con una media de $1.28 \pm .38$ kg vaca-d⁻¹. Esto pudiera ser debido a

los efectos de la PDR en la digestibilidad de los alimentos (Allen, 2000) y las diferencias en producción de ácidos grasos (AG) aumentando la concentración de AG C:18 y disminuyendo los C:16 (Alstrup *et al.*, 214). El NUL no fue afectado ni por el tipo de ensilado utilizado ni por la concentración de PM tal como lo reporta Kung *et al.* (2008) y Flis y Wattiaux (2005) respectivamente, se tuvo una media de 10.9 ± 4.1 mg dL⁻¹.

Cuadro 3-9. Efectos de la interacción de dos ensilados de maíz con dos BPM en el consumo, la producción y composición de leche a nivel corral.

	C		D		A		B		EEM	S.E. ¹
	AC18				AC35					
	PM-C	PM-B	PM-C	PM-B	PM-C	PM-B	PM-C	PM-B		
PV, kg	633	641	641	655						
<i>Consumo, kg d⁻¹</i>										
MS	24.4	24.8	25.3	24.7	0.55	NS				
MO	23.0	23.3	23.9	23.2	0.52	NS				
FDN	6.76	6.85	6.95	6.82	0.16	NS				
FDN, % PV	1.07	1.07	1.09	1.04	0.03	NS				
PC	4.14	4.10	4.25	4.08	0.09	NS				
<i>Producción</i>										
Leche, kg d ⁻¹	38.4	38.1	39.5	39.0	0.46	AC**				
ECA	1.58	1.55	1.56	1.58	0.04	NS				
LCE, kg d ⁻¹	37.2	37.3	38.4	38.1	0.72	AC*				
<i>Componentes</i>										
Grasa, %	3.30	3.35	3.30	3.37	0.04	PM*				
Grasa, kg d ⁻¹	1.26	1.28	1.30	1.29	0.05	NS				
Proteína, %	2.98	3.02	2.98	3.04	0.03	NS				
Proteína, kg d ⁻¹	1.14	1.15	1.18	1.16	0.04	NS				
Lactosa, %	5.06	5.17	5.11	5.22	0.08	NS				
Lactosa, kg d ⁻¹	1.94	1.97	2.02	1.99	0.07	NS				
NUL, mg dL ⁻¹	10.7	10.9	11.3	10.5	0.53	NS				

AC18: ensilaje de maíz cosechado a 18 cm sobre nivel del suelo. AC35= ensilaje de maíz cosechado a 35 cm sobre el nivel del suelo. PM-C: PM 2,830 g d⁻¹. PM-B: PM 2,680 g d⁻¹.

PV: Peso Vivo. MS: Materia Seca. MO: Materia Orgánica. FDN: Fibra Detergente Neutro. PC: Proteína Cruda. ECA: Eficiencia de Conversión Alimenticia calculada como ECA = Leche kg d⁻¹ / CMS. LCE: Leche corregida en energía calculada como LCE = (12.82 x kg grasa) + (7.13 x kg Proteína) + (0.323 x kg Leche). NUL: Nitrógeno ureico en leche.

¹Efecto de tratamiento. NS: no significativo, AC: altura de corte, PM: proteína metabolizable denotados por ** $P < 0.05$, * $0.10 \geq P > 0.05$.

Digestibilidad aparente. Los resultados de digestibilidad se presentan en el Cuadro 3-10. La DATT de la FDN fue 2 unidades mayor en las vacas alimentadas con ensilado AC35 que aquellas con AC18 (31.4 vs. 29.4%, respectivamente). Lo anterior es similar a lo reportado en otros trabajos, en los que, al haber menor fibra lignificada en las pasturas se puede aumentar la DATT de la FDN (Neylon y Kung, 2003; Santana *et al.*, 2019). Por su parte, en el trabajo de Bernard *et al.*, (2004) la diferencia en DATT de la FDN se asoció al tipo de híbrido más que a la altura de corte. En el presente estudio, no se detectaron diferencias en la DATT de la MO y PC y los valores están dentro de los rangos reportados en los estudios antes citados.

Cuadro 3-10. Digestibilidad aparente y balance de nitrógeno de las dietas del Experimento 2.

	C		D		A	B	EEM	S.E. ¹
	AC18	PM-C	PM-B	AC35				
<i>Digestibilidad aparente(240 h)</i>								
MO, %	60.0	59.4	59.0	60.0	1.15	NS		
PC, %	62.4	61.2	61.0	64.0	1.71	NS		
FDN, %	30.1	28.8	31.4	31.3	1.26	AC**		
<i>Partición del N, g d⁻¹</i>								
Alimento	662	656	680	653	-	-		
Leche	179	180	180	187	6.61	NS		
Fecal	248	255	265	235	10.8	NS		
Urinario	196	198	175	183	13.2	NS		
Balance de N, g d ⁻¹	40	23	60	48	-	-		
<i>Nitrógeno ureico</i>								
Urinario, g d ⁻¹	146	159	135	158	9.92	NS		
Plasma, mg dL ⁻¹	12.0	11.3	11.7	11.1	0.459	NS		

AC18: ensilaje de maíz cosechado a 18 cm sobre nivel del suelo. AC35: ensilaje de maíz cosechado a 35 cm sobre el nivel del suelo. PM-C: PM 2,830 g d⁻¹. PM-B: PM 2,680 g d⁻¹.

MO: Materia Orgánica. FDN: Fibra Detergente Neutro. PC: Proteína Cruda.

Balance de N = N Alimento – (N Leche + N Fecal + N Urinario).

¹Efecto de tratamiento. NS: no significativo, AC: altura de corte, PM: proteína metabolizable denotados por ** $P < 0.05$,

* $0.10 \geq P > 0.05$.

Balance de Nitrógeno. Ni el ensilado de maíz, ni la PM tuvieron algún efecto en el BN. En promedio las vacas alimentadas con las cuatro dietas tuvieron un aporte en el alimento de 663 g d^{-1} de N el cual se particionó en leche con $182 \pm 51.2 \text{ g d}^{-1}$, en heces con $251 \pm 83.7 \text{ g d}^{-1}$ y en orina con $188 \pm 102.2 \text{ g d}^{-1}$ dando un BN de $+42 \text{ g d}^{-1}$, lo cual indica que se tuvo una retención en el cuerpo de las vacas distribuyendo el N en los diferentes tejidos (Lobley *et al.*, 2003). Estos valores fueron similares a los reportados por Santana *et al.*, (2019) para el caso de N en leche; pero en el presente estudio se tuvieron valores superiores en N fecal, mientras el N urinario fue inferior. Esta concentración mayor de N fecal responde a un exceso de PNDR en las dietas (Flis y Wattiaux, 2005), el cual no se aprovechó en el tracto total y se expulsó en heces. El Nitrógeno Urinario en Plasma tuvo una concentración media de 11.5 ± 3.6 , resultado muy similar de Nitrógeno Ureico en Leche en el presente estudio y a lo reportado en los estudios antes citados; sin embargo, el Nitrógeno Ureico Urinario, aunque no tuvo diferencias entre tratamientos con $149.5 \pm 34.36 \text{ g d}^{-1}$, fue mayor a lo reportado en otros trabajos (Santana *et al.*, 2019), pero similar a los valores reportados en dietas donde se utilizó fuentes de proteína con baja degradabilidad ruminal (Olmos-Colmenero y Broderick, 2006).

3.3.4. Conclusiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el E2 se observa que utilizar ensilados de maíz cosechados a mayor altura de corte en la dieta de vacas en producción incrementa el rendimiento de leche sin tener efectos en su composición química ni el aprovechamiento de nitrógeno. Sin embargo, se observó una mayor concentración de nitrógeno en heces, lo que nos indica que el uso de PNDR es alto y pudiera reemplazarse una parte por PDR para economizar la ración.

3.4. ESTUDIO 3. MANEJO DEL SUELO AGRÍCOLA.

Ensilado de maíz cosechado a diferentes alturas de corte. Uso del estiércol de vaca y su interacción con los residuos de la cosecha anterior.

3.4.1. *Introducción.*

El ensilado de maíz es un ingrediente esencial en las dietas del ganado lechero (Adesogan *et al.*, 2019). El aprovechamiento de la planta completa puede tener como consecuencia el dejar al suelo vulnerable a la erosión física y química, así como la degradación mediante la pérdida de carbono orgánico y el agotamiento de nutrientes (Jokela *et al.*, 2009). Por otra parte, los establos lecheros tienen una alta producción de estiércol como subproducto de su actividad primaria, por lo que la aplicación de este en las tierras de cultivo puede llegar hasta las 150 t ha⁻¹ (Acevedo-Peralta *et al.*, 2017).

La aplicación de estiércol y el uso de cultivos de cobertura son prácticas en común para mejorar el aporte de carbono que sirve como fuente de energía, sustrato para la diversidad biológica y mejoramiento de la calidad del suelo (Weil y Magdoff, 2004). Dentro de los sistemas de producción en México y particularmente de los sistemas lecheros, el uso de cultivos de cobertura es aún poco común debido al costo que esta actividad representa; sin embargo, el uso de los residuos de cosecha del ensilado del maíz puede aportar una cantidad considerable de C ya que normalmente la paja del maíz tiene una relación C/N de 90:1 (Navarro y Navarro, 2013).

La interacción entre los residuos de cosecha o paja y el estiércol, son importantes debido a que influye en la densidad y diversidad microbiana, la inmovilización del N y el aumento de C fácilmente disponible (Rasmussen y Rohde, 1988). Debido a que la interacción entre residuos de cosecha y estiércol puede mantener una relación C/N de 25:1, es ideal para su descomposición y rápido aprovechamiento (Hoyle *et al.*, 2006). Otros factores que se deben de considerar para aumentar su eficiencia es la presentación del estiércol, ya sea líquido o sólido, así como la profundidad de aplicación (Blanco-Canqui *et al.*, 2006); en México típicamente se aplica estiércol sólido en el estrato superior del suelo.

Algo que se debe de considerar son los posibles efectos negativos del uso excesivo de los estiércoles, ya que pueden aumentar el pH del suelo por el uso de productos como el carbonato de calcio y bicarbonato de sodio en la dieta del ganado (Eghball, 2002); otros parámetros que pueden aumentar es la CE y el P (Trejo-Escareño *et al.*, 2013). Es por esto por lo que en el presente estudio se busca responder a la hipótesis H3, al evaluar el efecto en la calidad del suelo, producción y calidad forrajera, la interacción entre el estiércol obtenido del E2 y los residuos de cosecha mantenidos en la parcela de la cosecha del ensilado de maíz para el E2, tal como se planteó en el objetivo OE3.

3.4.2. Materiales y Métodos.

Área de estudio. El tercer estudio se estableció en el ciclo primavera verano del 2023 en la planicie Lagos-Aguascalientes dentro del predio Los Arquitos en la localidad de Betulia al norte del municipio de Lagos de Moreno, Jalisco; en la misma parcela e híbrido utilizados en el E1. El cultivo de maíz se estableció en un cuarto de pivote central de 6 torres correspondiente a 9.6 ha y se desarrolló bajo condiciones climáticas desfavorables para el maíz (Fig. 3-17), se tuvo una precipitación acumulada de 157.4 mm efectivos durante el cultivo y un rango de temperaturas superiores a las requeridas en el inicio del ciclo según lo referido por la FAO (Steduto *et al.*, 2012) que van de 10 °C hasta los 30 °C para el buen desarrollo del cultivo de maíz.

Manejo agronómico. Se sembró en suelo húmedo el 25 de mayo del 2023 utilizando el híbrido Supremo (ASPROS®, Toluca, México) a una densidad de 96,000 semillas ha⁻¹. El manejo de la nutrición se hizo en base al análisis de suelo aplicando 280 kg ha⁻¹ de N, 26 kg ha⁻¹ de (P₂O₅) y una mezcla de micronutrientes. La aplicación del fertilizante fue el total de P y micronutrientes en la siembra, mientras que el N se fraccionó usando el 20% en la siembra, 50% en la escarda previo a a las lluvias presentadas a los 38 DDS y el 30% restante en la sobreescarda realizada a los 80 DDS. Las fuentes utilizadas fueron MAP, Sulfato de amonio, Micromix II (MEZFER®, Celaya, México) y Yara Bela Nitromag (YARA®, Oslo, Noruega). Se aplicaron 3 riegos de presembrado y 8 riegos de auxilio a los 6, 7, 8, 55, 112, 118, 124 y 130 DDS. Para el manejo de plagas y enfermedades se aplicó para gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) a los 15 DDS spinoteram, Exalt (CORTEVA®, Indianápolis, IN.) y

a los 30 DDS se aplicó lambdacihalotrina + clorantraniliprol, Ampligo (SYNGENTA®, BS, Suiza). En cuanto al control de malezas se usó de forma preemergente acetoclor + clopiralid-olamina + flumetsulam, Surestar (CORTEVA®, Indianápolis, IN.), además del control mecánico en la escarda a los 38 DDS y la sobreescarda a los 80 DDS.

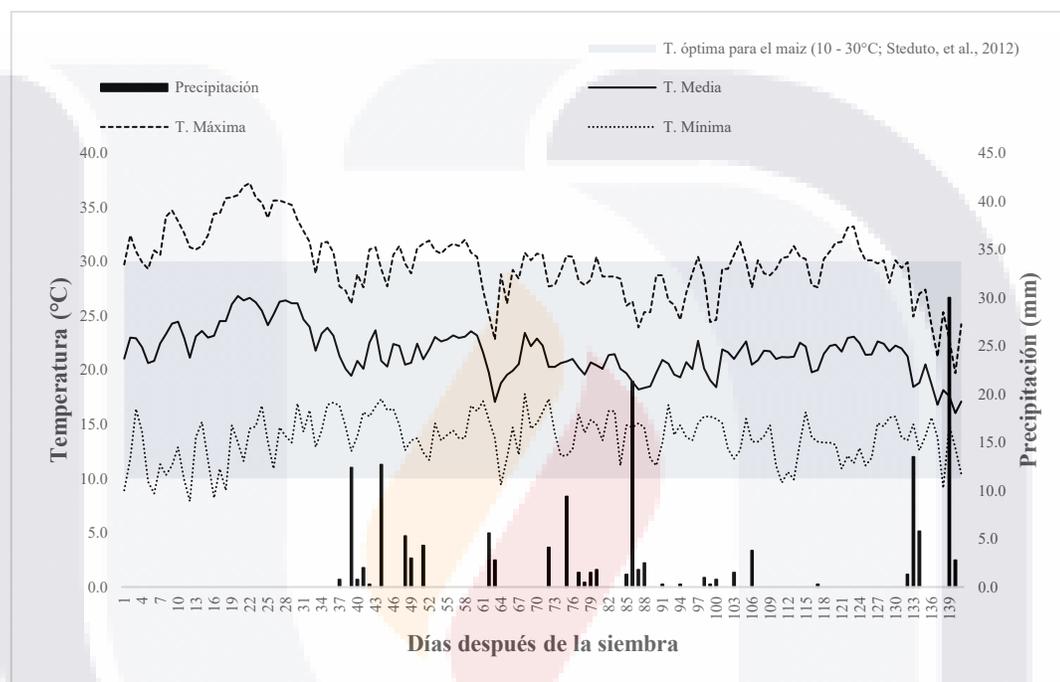


Figura 3-17. Datos climáticos registrados durante el periodo experimental (25 de mayo al 12 de octubre del 2023).

El estiércol se aplicó (en base seca) lo equivalente a 20 t ha⁻¹ en sub parcelas de 10 m × 6 m, utilizando los estiércoles E18 y E35 provenientes de los corrales alimentados en el E2 con ensilado de maíz AC18 y AC35 respectivamente.

Diseño experimental. Se consideró un diseño en parcelas divididas 3 × 2, donde la parcela grande fue el residuo de cosecha de los ensilados para el E2 (AC18 y AC35) y la parcela chica fueron los estiércoles extraídos de los corrales alimentados en el E2 con ensilado de maíz AC18 y AC35, dejando una parcela sin estiércol como testigo (SE, E18 y E35) con tres repeticiones de cada tratamiento. Se consideraron seis tratamientos con la interacción de los residuos de cosecha (n=2) y el uso de los estiércoles (n=3), con tres repeticiones de cada uno

(n=18). En cada tratamiento se seleccionó una parcela experimental de 0.75 m de ancho y 5 m de largo.

Toma de muestras y registro de datos. La toma de muestras se realizó el 12 de octubre al acumular 1,583 UC (Fig. 3-18), la madurez del grano estuvo en etapa R4 (3/4 avance línea de leche) y se tuvo un tamaño de planta promedio de 2.0 m de alto. En cada parcela se contó y cortó el total de plantas a 20 cm sobre el nivel del suelo y se registró el peso fresco de cada muestra de planta completa.

En las muestras de planta completa fueron tomadas al azar 5 plantas para ser molidas con una picadora 30-P (JF®, São Paulo, Brasil) a un tamaño de partícula de ~20 mm, se tomó una muestra de ~200 g para secar a 55 °C hasta peso constante y determinar MS, cenizas, PC, FDN, FDA y lignina en el laboratorio de forrajes del INIFAP – CEPAB.

Análisis químico. Los análisis se realizaron en el laboratorio de forrajes del INIFAP – CEPAB utilizando los procedimientos de la AOAC. Las muestras secadas en estufa para determinar MS fueron molidas en criba de 1 mm en un molino Wiley Modelo 4 (Thomas Sci. ®, Delaware, PA) para su análisis bromatológico. El contenido de cenizas se determinó al incinerar la muestra a 550 °C por 6 horas en una mufla Fisher Isotemp 338F (Thermo Sci. ®, Waltham, MA). La determinación de FDN y FDA se hizo de manera secuencial en bolsas F-57® en el analizador de fibras A200 (ANKOM Technologies®, Macedon, NY), enseguida la determinación de lignina sumergiendo las bolsas en una solución de H₂SO₄ al 72%. El N total se determinó utilizando el procedimiento de Kjeldahl semi automatizado, y la PC se calculó como N total x 6.25.

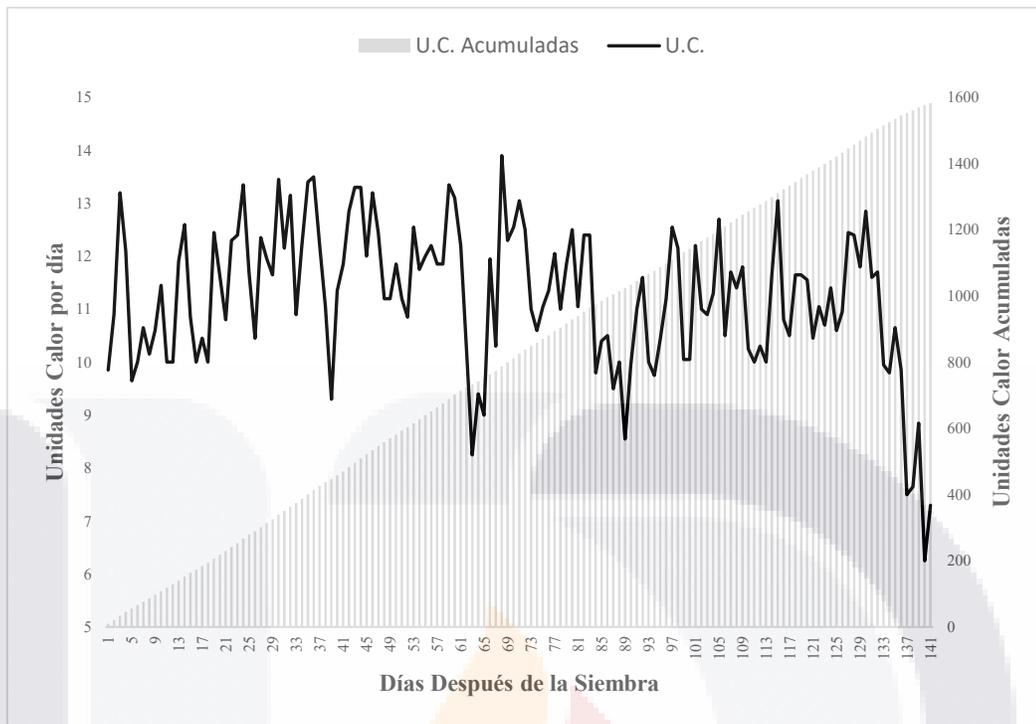


Figura 3-18. Comportamiento diario y acumulado de las Unidades Calor $UC = ((T_{max} + T_{min})/2) - T_{base}$ durante el período experimental (25 de mayo al 12 de octubre del 2023).

Análisis estadístico. Todos los datos fueron analizados en el programa RStudio (POSIT®, Boston, MA) utilizando el siguiente modelo estadístico:

$$Y = \mu + B_i + R_j + (BR)_{ij} + E_k + (ER)_{kj} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde Y es la variable respuesta, μ es la media general, B es el efecto aleatorio de bloque ($n=3$), R es el efecto del tratamiento de la parcela grande que es el residuo de cosecha de las alturas de corte ($n=2$), BR es el error de la parcela grande, E es el efecto de la parcela chica que es el estiércol extraído de las dietas del E2 ($n=3$), ER es la interacción entre la parcela grande y la parcela chica y ε es el error de la parcela chica. La significancia estadística se

declaró a $P < 0.05$ y la tendencia a $0.5 \leq P < 0.10$. Las medias que se presentan en los cuadros son medias de mínimos cuadrados (LSMeans) que se obtuvieron utilizando la instrucción del paquete *emmeans* del programa estadístico antes mencionado.

3.4.3. Resultados y Discusiones.

Los resultados agronómicos y de composición química se presentan en el Cuadro 3-11, donde se observa que no hubo ninguna interacción entre los residuos de cosecha y el estiércol.

Rendimiento. El RMS tendió a incrementarse en un 14 % en los tratamientos donde se dejó el residuo de cosecha AC35, sin que esto modificara la MS entre tratamientos con una media de 30.1 ± 3.27 % ($P=0.06$), estos resultados están por debajo de otros experimentos con el mismo híbrido (Santana *et al.*, 2021) e incluso con los obtenidos en el estudio E1 del presente trabajo, debido a las condiciones climatológicas durante el ciclo de cultivo y la poca disponibilidad de agua en ciertos períodos. Es probable que el rastrojo utilizado como cobertura en el suelo ayude a incrementar los rendimientos de los cultivos posteriores, independientemente del tipo de labranzas utilizadas (Holman *et al.*, 2024).

Cuadro 3-11. Rendimiento y composición química de la planta de maíz trabajada con diferentes niveles de residuo de cosecha y estiércol.

	Tratamiento ¹						Valor ² P			
	AC18			AC35			EEM	AC	E	AC*E
	SE	E18	E35	SE	E18	E35				
Rendimiento										
RMS, t ha ⁻¹	8.0	9.8	10.2	9.9	11.3	10.8	0.55	0.06 **	0.12	0.80
MS, %	29.2	30.4	28.0	31.3	31.3	30.3	0.77	0.40	0.85	0.94
Composición, % MS										
PC	8.2	7.5	7.7	8.0	7.8	7.7	0.08	0.88	0.04 *	0.31
FDN	53.1	50.3	53.9	48.3	48.1	47.0	0.79	<0.01 *	0.67	0.43
FDA	19.6	20.0	19.9	18.5	18.8	18.5	0.34	0.16	0.87	0.97
Lignina	3.5	2.9	2.5	2.5	3.1	2.3	0.14	0.22	0.02	0.12
Cenizas	5.8	3.9	5.4	5.3	5.6	5.0	0.25	0.66	0.30	0.17
CNF	30.0	35.4	30.1	35.5	35.6	37.4	0.91	0.017 *	0.32	0.20
TND	66.4	70.1	68.4	70.0	68.7	71.0	0.45	0.14	0.42	0.13
ENL, Mcal kg ⁻¹	1.63	1.72	1.68	1.72	1.68	1.74	0.01	0.13	0.44	0.14
ENL, Mcal ha ⁻¹	13,040	16,856	17,136	17,028	18,984	18,792	886.76	0.05 **	0.11	0.80

¹ AC18: Residuos de cosecha del ensilado AC18. AC35: Residuos de cosecha del ensilado AC35. SE: Sin aplicación de estiércol. E18: Estiércol extraído de los corrales alimentados con ensilado de maíz AC18. E35: Estiércol extraído de los corrales alimentados con ensilado de maíz AC35.

² * $P < 0.05$. ** $0.5 \leq P < 0.10$

RMS: rendimiento de materia seca. MS: materia seca. PC: proteína cruda. FDN: fibra detergente neutro. FDA: fibra detergente ácido. CNF: carbohidratos no fibrosos. TND: total de nutrientes digestibles (Calculado con la ecuación 2-5 NRC, 2001). ENL: energía neta de lactancia (Calculado con la ecuación 2-3 NRC, 2001).

Composición química. Se observó un efecto en la PC al disminuir en promedio 0.4 unidades en los tratamientos donde se usó estiércol ($P=0.04$). La FDN disminuyó en 4.6 unidades en los tratamientos establecidos donde hubo residuos de cosecha AC35 en el ciclo anterior ($P<0.01$), aunque no se afectó los contenidos de FDA, lignina y cenizas con medias de $19.2 \pm 3.4 \%$, $2.8 \pm 0.6 \%$ y $5.1 \pm 1.1 \%$ respectivamente. En respuesta a lo anterior, los CNF incrementaron en similar proporción al decremento en FDN (4.3 unidades; $P=0.02$). La aplicación de estiércol no tuvo efectos sobre la calidad forrajera. Es posible que la composición bromatológica, sobre todo FDN y CNF, se hayan alterado por el efecto de microorganismos en el suelo al incrementar las cantidades de residuos de cosecha (Ramírez *et al.*, 2023); específicamente, *Azospirillum spp.* que son bacterias muy adaptables a diferentes pH, concentración de sales y temperaturas, y que además tienen un aporte en el desarrollo radicular, lo cual ayuda en el flujo hídrico hacia el cultivo teniendo implicaciones directas en el rendimiento de grano y biomasa (Contreras-Liza *et al.*, 2024). La concentración de ENL por kg de MS no fue afectada por los tratamientos evaluados y se obtuvo una media de 1.69 ± 0.05 Mcal kg^{-1} ; no obstante, la ENL por hectárea tendió a incrementarse cuando en el forraje cosechado en parcelas con residuos de cosecha de AC35 con un promedio de 2,591 Mcal ha^{-1} ($P=0.05$).

Suelo. Los resultados se presentan en el Cuadro 3-12. No se encontraron diferencias entre tratamientos para ninguna variable dentro de las principales propiedades del suelo como DA, ph, CE y MO con medias de 1.45 ± 0.04 g cm^3 , 8.4 ± 0.12 , 4.4 ± 0.72 dS m^{-1} y $2.86 \pm 0.55 \%$ respectivamente; siendo resultados esperados al ser una evaluación de un solo ciclo, ya que este tipo de trabajos requieren dos o más años en tratamiento (Ramírez-Ibarra *et al.*, 2016; O'Brien y Hatfield, 2019). Entre los tres principales nutrientes presentes en el suelo para el desarrollo de los cultivos, solo el fósforo presentó diferencias para los tratamientos con estiércol indiferentemente de cual haya sido utilizado, teniendo hasta 49.1 ppm de concentración en suelo lo cual es considerado moderadamente alto (Castellanos-Ramos, 2000). Debido a las altas concentraciones de P y su baja movilidad es entendible el aumento en la concentración de este nutriente en el suelo en los tratamientos donde se agregó estiércol (Trejo-Escareño *et al.*, 2013)

Cuadro 3-12. Efectos del residuo de cosecha y el estiércol sobre el suelo.

	Tratamiento ¹						EEM	Valor ² P
	AC18			AC35				
	SE	E18	E35	SE	E18	E35		
Propiedades del suelo								
DA, g cm ³	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	0.01	NS
pH	8.2	8.4	8.2	8.4	8.5	8.5	0.03	NS
CE, dS m ⁻¹	4.4	4.5	4.4	4.5	3.7	4.8	0.17	NS
MO, %	2.4	3.2	2.7	3.0	2.8	3.0	0.13	NS
Composición química								
N-Inorgánico, ppm	26.4	23.3	23.3	21.0	17.9	21.7	0.94	NS
P, ppm	20.1	39.9	32.6	23.2	47.4	50.8	3.57	E*
K, ppm	104.0	157.3	155.5	150.3	160.7	212.3	10.02	NS

¹ AC18: Residuos de cosecha del ensilado AC18. AC35: Residuos de cosecha del ensilado AC35. SE: Sin aplicación de estiércol. E18: Estiércol extraído de los corrales alimentados con ensilado de maíz AC18. E35: Estiércol extraído de los corrales alimentados con ensilado de maíz AC35.

² * P < 0.05.

DA: densidad aparente, pH: potencial de Hidrógeno, CE: conductividad eléctrica, MO: materia orgánica, N: nitrógeno, P: fósforo, K: potasio.

3.4.4. Conclusiones.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que los residuos de cosecha a las cantidades utilizadas no tienen ninguna interacción con el estiércol aplicado a las concentraciones dadas en el presente estudio. Sin embargo, el estiércol aumenta la concentración de fósforo en el suelo; mientras que el residuo de cosecha parece aumentar el rendimiento de materia seca y mejora el perfil nutricional del forraje producido en el siguiente ciclo.

3.5. IMPLICACIONES ECONÓMICAS.

Análisis del impacto económico de elevar la altura de corte en el ensilado de maíz para la alimentación del ganado lechero.

3.5.1. Introducción.

La producción lechera tiene constantes fluctuaciones en los precios de la leche y los insumos; lo que impacta directamente en los costos de alimentación, ya que pueden llegar a representar hasta el 65% del costo total de producción (SE, 2012). En el caso de los sistemas de producción lechera intensiva se produce dentro del mismo un porcentaje alto o total del requerimiento del ensilado de maíz y algunos henos (Robledo-Padilla, 2018); de forma común los costos de producción del área agrícola son cubiertos por los ingresos generados por la venta de leche (Cabrera *et al.*, 2009).

En particular, el costo del ensilado de maíz es muy variable y puede ir desde \$900 hasta \$4,000 t⁻¹ dependiendo de factores como la zona del país y su producción estimada, si se compra en verde o fermentado o si se produce dentro del mismo establo (SNIIM, 2024), generando un mercado con incertidumbres. En un intento de referenciar el valor comercial de los piensos, Petersen (1932) generó una fórmula para homogenizar los precios en base a su valor nutrimental. Este método equipara los precios de cualquier alimento en base a su aporte de nutrientes tomando en cuenta la PC y el TND, aunque actualmente es preferible usar el valor de EN_L (St-Pierre, 2000). Esto nos permite tener un precio donde el establo paga por nutrientes y el proveedor puede recibir el pago en base a lo que aportó y no solo a los rendimientos obtenidos.

Se han implementado estrategias de reagrupación del hato por potencial productivo, debido a que esto ayuda a ajustar los costos y a un mejor aprovechamiento de los nutrientes (St-Pierre y Thraen, 1999). Pero, el hecho de manejar varias dietas y tener fluctuaciones en los precios, vuelve necesario tener parámetros como el Ingreso Sobre el Costo de la Alimentación (ISCA) en el cual se basan todas las software y aplicaciones que existen para determinar la eficiencia de cualquier cambio en la dieta, ayudando a nutriólogos y productores en la toma de decisiones (Wu *et al.*, 2019). Considerando estos factores, en el

presente estudio se busca responder a la H4, evaluando el impacto económico que tiene el elevar la altura de corte en el área agrícola y el establo, según lo planteado en el OE4.

3.5.2. Materiales y Métodos.

Los cálculos económicos del trabajo se realizaron para los estudios E1 y E2 en base a los costos de producción y venta según se registraron el año 2022 y 2023 respectivamente. Para el E3 no se realizó el estudio económico debido a las condiciones climáticas atípicas que repercutieron en rendimientos y precios.

Para el estudio E1 se calculó por hectárea los costos de producción como se muestran en el Cuadro 3-13. En los costos de producción se sumaron todos los conceptos de producción; incluyendo el costo de cosecha que considera la ensiladora, camiones para el traslado y tractores para el pisado y el tapado del silo; todo a un costo comercial para el año 2022 de \$0.32 kg⁻¹ de forraje verde.

Cuadro 3-13. Costos de la producción de la MS del E1.

	Tratamiento ¹		
	AC20	AC30	AC40
RMS, kg ha ⁻¹	15,000	14,300	14,000
Actividades, \$ ha ⁻¹			
Riego	5,700	5,700	5,700
Preparación	5,610	5,610	5,610
Siembra	5,900	5,900	5,900
Fertilización	17,743	17,743	17,743
Control de plagas y enfermedades	2,951	2,951	2,951
Control de malezas	5,130	5,130	5,130
Cosecha	16,189	14,522	14,310
Costo Total, \$ ha ⁻¹	59,222	57,555	57,343

¹AC20: 20 cm de altura de corte, AC30: 30 cm de altura de corte, AC40: 20 cm de altura de corte (sobre el nivel del suelo).

Para estandarizar el precio de los tratamientos del E2 se convirtió el precio tal cual a precio de MS y en base al valor nutrimental usando la ecuación de Petersen (1932) modificada por St-Pierre (2000); basándose en los precios comerciales del 2022. El silo en verde tuvo un

precio de \$1.50 kg⁻¹, el grano de maíz molido estuvo en \$7.70 kg⁻¹ y la pasta de soya se cotizó en \$12.00 kg⁻¹, mientras que la leche se consideró a un precio de \$10.00 L⁻¹. Las ecuaciones son las siguientes:

$$GMM\$ = EN_L\$ + PC\$$$

$$PSy\$ = EN_L\$ + PC\$$$

Donde $GMM\$$ es el costo por kilogramo del grano de maíz molido ajustado al valor de la energía y proteína, $PSy\$$ es el costo por kilogramo de pasta de soya ajustado al valor de la energía y proteína, $EN_L\$$ es el costo por Mcal de energía neta de lactancia y $PC\$$ es el costo por kilogramo de proteína cruda. Y la solución a las ecuaciones para $EN_L\$$ y $PC\$$ es la siguiente:

$$EN_L\$ = (PC_{PSy} * GMM\$) - (PC_{GMM} * PSy\$) / (PC_{PSy} * EN_{L\ GMM}) - (PC_{GMM} * EN_{L\ PSy})$$

$$PC\$ = (EN_{L\ PSy} * GMM\$) - (EN_{L\ GMM} * PSy\$) / (EN_{L\ PSy} * PC_{GMM}) - (EN_{L\ GMM} * PC_{PSy})$$

Donde $EN_L\$$ es el costo por Mcal de energía neta de lactancia, $PC\$$ es el costo por kilogramo de proteína cruda, PC_{PSy} es el porcentaje de proteína cruda de la pasta de soya, PC_{GMM} es el porcentaje de proteína cruda del grano de maíz molido, $GMM\$$ es el costo del grano de maíz ajustado a la materia seca, $PSy\$$ es el costo de la pasta de soya ajustado a la materia seca, $EN_{L\ GMM}$ son las Mcal de energía neta de lactancia del grano de maíz molido y $EN_{L\ PSy}$ son las Mcal de energía neta de lactancia de la pasta de soya.

Se contempló únicamente los gastos de alimentación como variables de estudio, ya que no se alteró ningún otro costo durante el trabajo. Se ajustó el precio tal cual a MS y para el caso del silo de maíz se ajustó el precio con la ecuación de Petersen (1932) usando la modificación de St-Pierre (2000). El desglose de los costos de alimentación se presenta en el Cuadro 3-14. El precio tal cual en el año 2023 fue de \$1.50 kg⁻¹ de silo de maíz, \$3.20 kg⁻¹ de heno de avena, \$7.70 kg⁻¹ de maíz molido, \$12.21 kg⁻¹ de Núcleo proteico Arquitos y \$6.41 kg⁻¹ de Núcleo proteico INIFAP.

Cuadro 3-14. Costos de alimentación de las vacas utilizadas en el E2, precio de insumos ajustados con la ecuación de Petersen (St-Pierre, 2000).

	AC18		AC35	
	PM-C	PM-B	PM-C	PM-B
Ingredientes, \$ MS				
Silo, \$ vaca-d ⁻¹	42.37	42.37	38.80	38.80
Avena, \$ vaca-d ⁻¹	4.92	4.92	4.92	4.92
Maíz Molido, \$ vaca-d ⁻¹	61.60	61.60	61.60	61.60
Núcleo Arquitos, \$ vaca-d ⁻¹	91.00	78.82	91.00	78.82
Núcleo INIFAP, \$ vaca-d ⁻¹	-	6.41	-	6.41
Costo Alimentación, \$ vaca-d⁻¹	199.90	194.13	196.32	190.55
Ingredientes, \$ Petersen				
Silo, \$ vaca-d ⁻¹	75.50	75.50	77.93	77.93
Avena, \$ vaca-d ⁻¹	4.92	4.92	4.92	4.92
Maíz Molido, \$ vaca-d ⁻¹	61.60	61.60	61.60	61.60
Núcleo Arquitos, \$ vaca-d ⁻¹	91.00	78.82	91.00	78.82
Núcleo INIFAP, \$ vaca-d ⁻¹	-	6.41	-	6.41
Costo Alimentación, \$ vaca-d⁻¹	233.03	227.26	235.45	229.68

AC18: ensilaje de maíz cosechado a 18 cm sobre nivel del suelo. AC35= ensilaje de maíz cosechado a 35 cm sobre el nivel del suelo. PM-C: PM 2,830 g d-1. PM-B: BPM 2,680 g d-1.

3.5.3. *Resultados y Discusiones.*

Los resultados económicos obtenidos en el E1 se presentan en el Cuadro 3-15. Se tuvo un costo de producción mayor en el tratamiento AC20 debido a que en los costos de producción está contemplada la cosecha que al cobrarse por kilos cosechados y tener un rendimiento mayor al de los demás tratamientos, esto incrementó el costo. El valor en base a MS es mayor para el tratamiento AC20 teniendo \$6,831.00 más de utilidad respecto al tratamiento AC40, con una tasa de retorno de inversión del 24.9 %; sin embargo, al contemplar el ajuste en valor nutrimental (Petersen, 1932; St- Pierre; 2000) la utilidad es mayor para el tratamiento AC30 con \$2,057.00 ha⁻¹ respecto al tratamiento AC20, con una tasa de retorno de 56.1%. Al contemplar el valor nutrimental que aporta cada tratamiento, la tasa de retorno es mayor que si se considera solo el precio en base a la MS.

Cuadro 3-15. Análisis económico de la producción del E1.

	Tratamiento		
	AC20	AC30	AC40
Rendimiento			
MS, %	30.4	32.4	32.2
RMS, kg ha ⁻¹	15,000	14,300	14,000
Análisis de costos, MS			
Costo producción, \$ ha ⁻¹	59,222	57,555	57,343
Precio, \$ kg ⁻¹	4.93	4.63	4.66
Ingresos, \$ ha ⁻¹	73,950	66,209	65,240
Utilidad, \$ ha ⁻¹	14,728	8,654	7,897
ROI, %	24.9	15.0	13.8
Análisis de costos, Petersen			
Costo producción, \$ ha ⁻¹	59,222	57,555	57,343
Valor Nutricional, \$ kg MS	5.98	6.30	6.30
Ingresos, \$ ha ⁻¹	89,700	90,090	88,200
Utilidad, \$ ha	30,478	32,535	30,857
ROI, %	51.5	56.5	53.8

¹AC20: 20 cm de altura de corte, AC30: 30 cm de altura de corte, AC40: 20 cm de altura de corte (sobre el nivel del suelo).

ROI: retorno sobre la inversión.

En el Cuadro 3-16 se presentan el análisis económico del E2, donde se estandarizaron los costos de los insumos en base a su valor de MS y nutrientes (Petersen, 1932; St-Pierre; 2000). El costo de alimentación tiene algunas variaciones en cuanto al tipo de ensilaje que se utilizó en la dieta y el núcleo proteico mientras que la producción de leche responde a lo observado en el E2. Se obtuvo un ingreso mayor en la dieta donde se utilizó el ensilado de maíz AC35, siendo la dieta A la de mayor ingreso total por leche producida. El ISCA que es el principal indicador económico en los establos cuando se trata de medir el impacto de la alimentación (Cabrera *et al.*, 2019). La dieta B es la que tiene un mayor ingreso después de la alimentación con \$199.4 vaca-d⁻¹ y \$160.3 vaca-d⁻¹ para el valor en base a MS y el valor nutricional de Petersen respectivamente; mientras que la dieta C (control) es la dieta con menor ingreso después de la alimentación con \$184.1 vaca-d⁻¹ y \$151.0 vaca-d⁻¹ para el valor de MS y nutricional respectivamente. Tomando la dieta C como control se observó un diferencial en

el ingreso de la dieta B de 8.3 % y 6.2 % mayor para el valor de MS y nutrimental respectivamente.

Cuadro 3-16. Análisis económico de la producción del E2 en base a MS y el valor nutrimental del ensilado de maíz (St-Pierre, 2000).

	C		D		A		B	
	AC18				AC35			
	PM-C	PM-B	PM-C	PM-B	PM-C	PM-B	PM-C	PM-B
Datos de producción								
CMS, kg d ⁻¹	24.7	24.4	25.0	24.7	25.0	24.7	25.0	24.7
Producción leche, kg d ⁻¹	38.4	38.1	39.5	39.0	39.5	39.0	39.5	39.0
Costo Alimentación, MS	199.9	194.1	196.3	190.6	196.3	190.6	196.3	190.6
Costo Alimentación, Petersen	233.0	227.3	235.5	229.7	235.5	229.7	235.5	229.7
Indicadores económicos, MS								
Ingreso, \$ vaca-d ⁻¹	384.0	381.0	395.0	390.0	395.0	390.0	395.0	390.0
ISCA, \$ vaca-d ⁻¹	184.1	186.9	198.7	199.4	198.7	199.4	198.7	199.4
Diferencial, %	100.0	101.5	107.9	108.3	107.9	108.3	107.9	108.3
Indicadores económicos, Petersen								
Ingreso, \$ vaca-d ⁻¹	384.0	381.0	395.0	390.0	395.0	390.0	395.0	390.0
ISCA, \$ vaca-d ⁻¹	151.0	153.7	159.5	160.3	159.5	160.3	159.5	160.3
Diferencial, %	100.0	101.8	105.7	106.2	105.7	106.2	105.7	106.2

AC18: ensilaje de maíz cosechado a 18 cm sobre nivel del suelo. AC35= ensilaje de maíz cosechado a 35 cm sobre el nivel del suelo. PM-C: PM 2,830 g d-1. PM-B: BPM 2,680 g d-1.

ISCA: Ingresos sobre el costo de alimentación.

Diferencial: Porcentaje diferencia del ISCA de las dietas contra la dieta C (Control).

3.5.4. Conclusiones.

Según lo observado en los resultados económicos del presente trabajo, elevar la altura de corte en el ensilado de maíz puede incrementar la rentabilidad de todo el sistema de producción lechera, ya sea que se tome el valor en base a la MS o en base a los nutrientes aportados según Petersen. Estos ajustes en el precio pueden ayudar a tener un precio justo entre la compra y venta de forrajes, ya que se contempla además del valor comercial tal cual el valor en base a los nutrientes aportados en la pastura.

IV. DISCUSIÓN GENERAL

Los resultados obtenidos en el presente estudio nos indican que es posible aumentar la calidad del forraje cosechado al subir la altura de corte a cosecha del ensilado de maíz, ya que el contenido FDN va disminuyendo conforme se sube la altura de corte, tal como se reporta en otros trabajos (Kruczynska *et al.*, 2001; Wu y Roth, 2023) y de forma similar el contenido de CNF fue aumentando tal como se observó en el presente estudio y en el de Santana *et al.* (2021); como consecuencia el contenido energético es mayor al elevar la altura de corte observando diferencias de hasta 0.10 Mcal kg⁻¹. La digestibilidad de la MS y la FDN es también aumentan al subir la altura de corte hasta 30 cm pero deja de aumentar cuando se pasa a los 40 cm, a excepción de los la digestibilidad de la FDN que no tuvo diferencias entre tratamientos. Todo sin tener una diferencia de rendimiento a pesar de ser reportado lo contrario en otros trabajos (González *et al.*, 2005; Neylon y Kung, 2003).

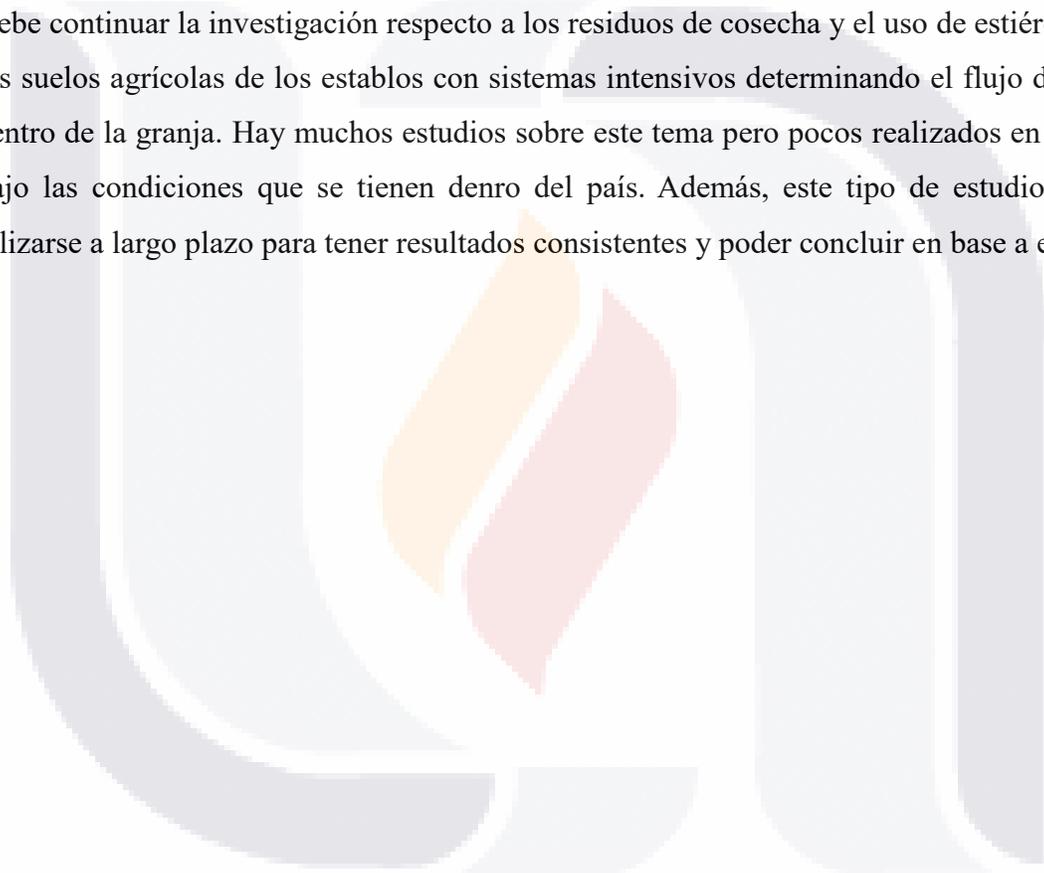
Al alimentar vacas productoras con ensilados de maíz cosechados a mayor altura de corte, se puede tener impacto en la producción, debido a una mayor digestibilidad de la fibra en las pasturas sin que esto impacte en el CMS, tal como lo reportan en otros trabajos (Wu *et al.*, 2001; Kung *et al.*, 2008). Las diferencias en la producción de leche pueden ser de hasta 1 kg vaca-d⁻¹ al utilizar este tipo de ensilados, manteniendo una tendencia en ese incremento de producción al hacer la corrección de LCE, lo cual es diferente a lo observado en otros trabajos (Wu *et al.*, 2001; Neylon y Kung, 2003). De igual forma modificar la PM puede no tener efectos en el CMS ni en la producción, contrario a lo reportado por Allen (2000) y M'hamed *et al.* (2001). Para el caso de la digestibilidad de la FDN en el tracto total se observa un aumento de 2 unidades al utilizar ensilado de maíz AC35, similar a lo encontrado en otros trabajos (Neylon y Kung, 2003; Santana *et al.*, 2019). Si bien las modificaciones en la PM no tuvieron efectos en el BN, si se pudo observar una mayor excreción de N en heces debido a las altas concentraciones de PNDR en todas las dietas (Flis y Wattiaux, 2005).

Al cortar a mayor altura el ensilado de maíz, nos permite dejar un porcentaje de residuos de cosecha mayor en el suelo agrícola. Justo este residuo nos puede aportar en el siguiente ciclo de cultivo, un aumento en el RMS, así como una reducción de la FDN de 4.6 unidades,

aumentando con esto el contenido de CNF, esto pudiera atribuirse al efecto de microorganismos en el suelo que puede aumentar su población al tener mayor cantidad de residuos de cosecha (Ramírez *et al.*, 2023).

Económicamente, elevar la altura de corte puede ser viable si se evalúa ajustando los precios en base a MS o valor nutritivo del forraje desde la producción del ensilado o en el establo al obtener un ISCA superior en las vacas alimentadas con ensilados AC35.

Debe continuar la investigación respecto a los residuos de cosecha y el uso de estiércoles en los suelos agrícolas de los establos con sistemas intensivos determinando el flujo de N y P dentro de la granja. Hay muchos estudios sobre este tema pero pocos realizados en México bajo las condiciones que se tienen dentro del país. Además, este tipo de estudios deben realizarse a largo plazo para tener resultados consistentes y poder concluir en base a estos.



V. CONCLUSIÓN GENERAL

Los resultados obtenidos en los tres estudios de investigación y el económico, nos indican que elevar la altura de corte a la cosecha del ensilado de maíz es una práctica adecuada para aumentar la calidad nutricional del forraje, ya que se disminuye el contenido de FDN y aumentan los CNF, así como la digestibilidad de la FDN, esto minimizando el impacto en el rendimiento cuando se sube la altura de corte hasta los 30 cm en base a lo observado en este trabajo. Además, al usar este ensilado en vacas productoras se incrementa el rendimiento de leche sin afectar la composición química ni el aprovechamiento del N. Otro beneficio que se obtuvo al elevar la altura de corte es el residuo de cosecha que puede ayudar a aumentar el rendimiento de la siguiente cosecha y mejorar sus características nutricionales. Todo esto, siendo económicamente rentable.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Ávila, C. L. S., & Carvalho, B. F. (2020). Silage fermentation— updates focusing on the performance of micro-organisms. *Journal of applied microbiology*, 128(4), 966-984. <https://doi.org/10.1111/jam.14450>
- Acevedo-Peralta, A. I., Leos-Rodríguez, J. A., Figueroa-Viramontes, U., & Romo-Lozano, J. L. (2017). Política ambiental: uso y manejo del estiércol en la Comarca Lagunera. *Acta Universitaria*, 27 (4), <https://doi.org/10.15174/au.2017.1270>
- Adesogan, A. T., Arriola, K. G., Jiang, Y., Oyebade, A., Paula, E.M., Pech-Cervantes, A. A., Romero, J. J., Ferrareto, L. F., & Vyas, D. (2019). Symposium review: Technologies for improving fiber utilization. *J. Dairy Sci.*, 102(6), 5726–5755. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15334>
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper. 29(1).
- AMCGSR. (2024). Orígenes del ganado Suizo Europeo. <https://amcgsr.com.mx/origenes-del-ganado-suizo-europeo/>
- Ali, S., Kailou L., Waqas, A., Huang, J., Muhammad, Q., Christian, K. A., Ali, A. M., Zhang, L., Lisheng, L., & Huimin, Z. (2021). Nitrogen mineralization, soil microbial biomass and extracellular enzyme activities regulated by long-term N fertilizer inputs: a comparison study from upland and paddy soils in a red soil region of China. *Agronomy* 11(10) 2057. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102057>
- Allen, M. (1996). Physical constraints on voluntary intake of forages by ruminants. *J. Animal Sci.*, 74(12), 3063-3075. <https://doi.org/10.2527/1996.74123063x>
- Allen, M. (2000). Effects of Diet on Short-Term Regulation of Feed Intake by Lactating Dairy Cattle. *J. Dairy Sci.*, 83(7), 1598-1624. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75030-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75030-2)
- Allen, M., Coors, J., & Roth, G. (2003). Corn Silage. (Agronomy Monograph no. 42). American Society of Agronomy.
- Alstrup, L., Weisbjerg, M. R., Hymoller, L., Larsen, M. K., Lund, P., & Nielsen, O. (2014). Milk production response to varying protein supply is independent of forage digestibility in dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 97(7), 4412–4422. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7585>
- ADANE. (2024). Types of Dairy Cows. <https://www.americandairy.com/dairy-farms/dairy-cows/>
- Arriola-Apelo, S. I., Bell, A. L., Estes, K., Ropelewski, J., de Veth, M. J., & Hanigan, M. D. (2014). Effects of reduced dietary protein and supplemental rumen-protected essential amino acids on the

nitrogen efficiency of dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 97(9), 5688-5699.
<https://doi.org/10.3168/jds.2013-7833>

Bach, A., Calsamiglia, S., & Stern, M. D. (2005). Nitrogen metabolism in the rumen. *J. Dairy Sci.*, 88 (Supplement), E9-E21. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73133-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73133-7)

Bansal, P., M. Hall, M. J. Realff, J. H. Lee, and A. S. Bommarius. 2009. Modeling cellulase kinetics on lignocellulosic substrates. *Biotechnol. Adv.* 27:833–848.

Barnett, A. J. G. (1954). Silage Fermentation. *Soil Science*, 78(1), p 81.

Barrera-Bassols, N. (diciembre, 1996). Los orígenes de la ganadería en México. *Ciencias*, núm. 44, pp. 14 – 27. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.06.005>.

Bello, N., Kramer, M., Tempelman, Stroup, W., St-Pierre, R., Craig, B., Young, L., & Gbur, E., (2016) : On recognizing the proper experimental unit in animal studies in the dairy sciences. *J. Dairy Sci.*, 99(11), 8871-8879. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11516>

Benson, J. A., Reynolds, C. K., Aikman, P. C., Lupoli, B., & Beever, D. E. (2002). Effects of Abomasal Vegetable Oil Infusion on Splanchnic Nutrient Metabolism in Lactating Dairy Cows. *J. Dairy Sci.*, 85(7), 1804-1814. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74255-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74255-0)

Bernard, J. K., West, J. W., Trammell, D. S., & Cross, G. H. (2004). Influence of Corn Variety and Cutting Height on Nutritive Value of Silage Fed to Lactating Dairy Cows. *J. Dairy Sci.*, 87(7), 2172–2176. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)70037-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)70037-5)

Bernardes, T. F., Daniel, J., Adesogan, A. T., McAllister, T. A., Drouin, P., Nussio, L. G., Huhtanen, P., Tremblay, G. F., Bélanger, G., & Cai, Y. (2018). Silage review: Unique challenges of silages made in hot and cold regions. *J. Dairy Sci.*, 101(5), 4001–4019. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13703>

Bjelland, D. W., Weigel, K. A., Hoffman, P. C., Esser, N. M., Coblenz, W. K., & Halbach, T. J. (2011). Production, reproduction, health, and growth traits in backcross Holstein x Jersey cows and their Holstein contemporaries. *J. Dairy Sci.*, 94(10), 5194 – 5203. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4300>

Borreani, G., Tabacco, E., Schmidt, R. J., Holmes, B. J., & Muck, R. E. (2018). Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages. *Journal of dairy science*, 101(5), 3952–3979. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13837>

Boston, R., Dou, Z., & Chalupa, W. (2002). RATION FORMULATION | Models in Nutritional Management. En Roginski, H. (Ed.). *Encyclopedia of Dairy Sciences* (pp. 2378 – 2389). Elsevier.

Britt, J. H., Cushman, R. A., Dechow, C. D., Dobson, H., Humblot, P., Hutjens, M. F., Jones, G. A., Ruegg, P. S., Sheldon, I. M., & Stevenson, J. S. (2018). Invited review: Learning from the future—

- A vision for dairy farms and cows in 2067. . *J. Dairy Sci.*, 101(5), 3722–3741.
<https://doi.org/10.3168/jds.2017-14025>
- BSA. (2024). Brown Swiss are known for dairy strength. <https://www.brownswissusa.com/about-us/bs-breed-facts>
- Butler, T. J., Han, K. J., Muir, J. P., Weindorf, D. C., & Lastly, L. (2008). Dairy manure compost effects on corn silage production and soil properties. *Agron. J.*, 100, 1541–1545. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0033>
- Cabrera, V. E., Shaver, R. D., & Wattiaux, M. A. (2009). Optimizing income over feed supplement costs. In *Proceedings Four-State Dairy Nutrition and Management Conference*, 10–11 June 2009, Dubuque, IA, USA, pp. 116–120.
- Caetano, H., Oliveira, M., Freitas Jr, J. E., Coutinho do Rego, A., Palma-Rennó, F., & Carvalho, M. (2011). Evaluation of corn cultivars harvested at two cutting heights for ensilage. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 40(1), 12-19. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000100003>
- Camacho-Vera, J. H., Cervantes-Escoto, F., Palacios-Rangel, M. I., Rosales-Noriega, F., & Vargas-Canales, J. M. (2017). Factores determinantes del rendimiento en unidades de producción de lechería familiar. *ReMex. Cienc. Pec.*, 8(1), 23-29. <http://dx.doi.org/10.22319/rmcp.v8i1.4313>
- Camacho-Vera, J. H., Vargas-Canales, J. M., Quintero-Salazar, L., & Apan-Salcedo, G. W. (2021). Características de la producción de leche en La Frailesca, Chiapas, México. *ReMex. Cienc. Pec.*, 12(3). <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i3.5375>
- Campling RC. (1970). Physical regulation of voluntary intake. In: Phillipson AT, editor. *Physiology of Digestion and Metabolism in the Ruminant*. Newcastle-upon-Tyne, England: Oriel Press, Ltd; p. 226.
- Carvalho, B. F., Ávila, C. L. S., Bernardes, T. F., Pereira, M. N., Santos, C., & Schwan, R. F. (2017). Fermentation profile and identification of lactic acid bacteria and yeasts of rehydrated corn kernel silage. *Journal of applied microbiology*, 122(3), 589-600. <https://doi.org/10.1111/jam.13371>
- Castellanos-Ramos, J.Z., J.X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar- Santelises (2000) *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas* (2da ed.). Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. Centro de Estudios Agropecuarios. (2001). *Vacas Lecheras*. Grupo Editorial Iberoamérica.
- Ciampitti, I. A., & Vyn, T. J. (2012). Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: a review. *F. Crop. Res.* 133, 48–67. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.008>.
- Ciampitti, I. A., & Vyn, T. J. (2013). Grain nitrogen source changes over time in maize: a review. *Crop Sci.* 53(2), 366–377. <https://doi.org/10.2135/cropsci2012.07.0439>.

- Cicchino, M., Rattalino-Edreira, J. I., & Otegui, M. E. (2010). Heat stress during late vegetative growth of maize: effects on phenology and assessment of optimum temperature. *Crop Sci.*, 50(4), 1431- 1437. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.07.0400>
- Clark, M., & Tilman, D. (2017). Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environ. Res. Lett.* 12:064016 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6cd5>.
- Cobos-Peralta M. y Shimada-Miyasaka, A. (2018). Digestión y metabolismo ruminal. En Shimada-Miyasaka, A. (Ed.), *Nutrición Animal* (pp 93-136). Trillas.
- Cochran, R. C., Adams, D. C., Wallace, J. D., & Galyean, M. L. (1986). Predicting digestibility of different diets with internal markers: Evaluation of four potential markers. *J. Animal Sci.*, 63(5), 1476-1483. <https://doi.org/10.2527/jas1986.6351476x>
- Dalla-Valle, D. E., Andrade F. H., Viviani-Rossi, E., & Wade M. H. (2008). The effecto of kernel number on growth, yield and quality of forage maize. *Rev. Arg. De Prod. Animal*, 28(2), 87 – 97.
- Dardanelli, J. L., Ritchie, J. T., Calmon, M., Andriani, J. M., & Collino, D. J. (2004). An empirical model for root water uptake. *F. Crop. Res.* 87, 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.09.008>.
- Diepersloot, E. C., Heinzen Jr, C., Saylor, B. A., & Ferraretto, L. F. (2022). Effect of cutting height, microbial inoculation, and storage length on fermentation profile and nutrient composition of whole-plant corn silage. *Translational Animal Sci.*, 6(2), 1-10. <https://doi.org/10.1093/tas/txac037>
- Ducharme, N. G., Desrochers, A., Fubini, S. L., Pease, A. P., Mizer, L. A., Walker, W., Trent, A. M., Roy, J. P., Rousseau, M., Radcliffe, R. M., & Steiner, A. (2017). Chapter 14 - Surgery of the Bovine Digestive System. En Fubini, S. L., & Ducharme, N. G. (Eds.). *Farm Animal Surgery* (pp. 223 – 343). Elsevier.
- Edwards, G. E., Franceschi, V. R., & Voznesenskaya, E. V. (2004). Single-cell C4 photosynthesis versus the dual-cell (Kranz) paradigm. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 173 – 196. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141725>
- Elischer, M. (26 de diciembre de 2014). History of dairy cow breeds: Holstein. MSU Extension. https://www.canr.msu.edu/news/history_of_dairy_cow_breeds_holstein
- Eriksson, T., Murphy, M., Cizuk, P., & Burstedt, E. (2004). Nitrogen balance, microbial protein production, and milk production in dairy cows fed fodder beets and potatoes, or barley. *J. Dairy Sci.*, 87(4), 1057-1070. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73252-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73252-X)
- Fanchone, A., Noziere, P., Portelli, J., Duriot, B., Largeau, V., & Doreau, M. (2013). Effects of nitrogen underfeeding and energy source on nitrogen ruminal metabolism, digestion, and nitrogen partitioning in dairy cows. *J. Animal Sci.*, 91(2), 895-906. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5296>

- FAO. (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/dea292cb-370d-46c7-a44d-59a617953c3b/content>
- FAO. (2024). Cultivos y productos de ganadería. Recuperado de la base de datos de FAOSTAT.
- Fawcett, J. C., & Scott, J. E. (1960). A rapid and precise method for the determination of urea. *J. Clin. Pathol.*, 13(2), 156-159. <https://doi.org/10.1136/jcp.13.2.156>
- Ferraretto, L. F., Crump, P. M., & Shaver, R. D. (2013). Effect of cereal grain type and corn grain harvesting and processing methods on intake, digestion, and milk production by dairy cows through a meta-analysis. *J. Dairy Sci.*, 96(1), 533-550. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-5932>
- Ferraretto, L. F., Taysom, K., Taysom D. M., Shaver, R. D., & Hoffman, P. C. (2014). Relationships between dry matter content, ensiling, ammonia-nitrogen, and ruminal in vitro starch digestibility in high-moisture corn samples. *J. Dairy Sci.*, 97(5), 3221-3227. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7680>
- Ferraretto, L. F., Shaver, R. D., & Luck, B. D. (2018). Silage review: Recent advances and future technologies for whole-plant and fractionated corn silage harvesting. *J. Dairy Sci.*, 101(5), 3937–3951. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13728>
- Ferraretto, L. F., Silva Filho, W. I., Fernandes, T., Kim, D. H., & Sultana, H. (2018). Effect of ensiling time on fermentation profile and ruminal in vitro starch digestibility in rehydrated corn with or without varied concentrations of wet brewers grains. *J. Dairy Sci.*, 101(5), 4643-4649. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14329>
- Ferreira, G., & Mertens, D. R. (2005). Chemical and Physical Characteristics of Corn Silages and Their Effects on In Vitro Disappearance. *J. Dairy Sci.*, 88(12), 4414-4425. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73128-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73128-3)
- Figuroa-Viramontes, U., Núñez-Hernández, G., Delgado, J. A., Cueto-Wong, J. A., & Flores-Margez, J. P. (2009). Estimación de la producción de estiércol y de la excreción de nitrógeno, fósforo y potasio por bovino lechero en la Comarca Lagunera.. En: Orona, I. C., Salazar, E. S., & Fortis, M. H. (Eds.), *Agricultura orgánica*. 2ª ed. (pp. 128-151) FAZUJED. SMCS.
- Figuroa-Viramontes, U., Núñez-Hernández, G., Reta-Sánchez, D. G., & Flores-López, H. E. (2015). Balance regional de nitrógeno en el sistema de producción leche-forraje dde la Comarca Lagunera, México. *Rev. Mex. Ciencias Pecuarias*, 6(4), 377-392.
- Figuroa Viramontes, U., Romo Lozano, J. L., Leos Rodríguez, J. A., & Acevedo Peralta, A. I. (2017). Política ambiental: uso y manejo del estiércol en la Comarca Lagunera. *Acta Universitaria*, 27 (4), 3-12. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41652788001>

- FIRA. (2023). Panorama agroalimentario, Leche y lácteos. <https://www.fira.gob.mx/Nd/NEstEcon.jsp>
- FIRA. (2024). Panorama agroalimentario, Maíz. <https://www.fira.gob.mx/Nd/NEstEcon.jsp>
- Filya, I. (2003). The Effect of *Lactobacillus buchneri* and *Lactobacillus plantarum* on the Fermentation, Aerobic Stability, and Ruminal Degradability of Low Dry Matter Corn and Sorghum Silages. *J. Dairy Sci.*, 86(11), 3575-3581. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73963-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73963-0)
- Firkins, J. L., Allen, M. S., Oldick, B. S., & St-Pierre, N.R. (1998). Modeling ruminal digestibility of carbohydrates and microbial protein flow to the duodenum. *J. Dairy Sci.*, 81(12), 3350–3369. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75901-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75901-6)
- Flach, K. W., Barnwell, T. O., & Crosson, P. (1996). Impacts of agriculture on atmospheric carbon dioxide. En Paul, E. A., Paustian, K. H., Elliott, E. T., & Vernon-Cole, C. (Eds.), *Soil organic matter in temperate agroecosystems long term experiments in North America*. (pp. 3-12). CRC Press.
- Flis, S. A., & Wattiaux, M. A. (2005). Effects of Parity and Supply of Rumens-Degraded and Undegraded Protein on Production and Nitrogen Balance in Holsteins. *J. Dairy Sci.*, 88(6), 2096–2106. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72886-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72886-1)
- Flores-Ancira, E., Díaz-Romo, A., Häubi-Segura, C., & López-Gutiérrez, M. A. (2018). Producción y calidad nutritiva de maíz bajo condiciones de secano en Aguascalientes, México. *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, 9(8), 1615 – 1625. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i8.1718>
- Fusseder, A. (1987). The longevity and activity of the primary root of maize. *Plant Soil* 101, 257–265. <https://doi.org/10.1007/BF02370653>.
- Gallegos-Daniel, C., Taddei-Bringas, C., & González-Córdova, A. F. (2022). Panorama de la industria láctea en México. *Rev. Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 33(61), 2-28. <https://doi.org/10.24836/es.v33i61.1251>
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. UNAM. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- Gasque, R., & Blanco, M. A. (2001). *Zootecnia en bovinos productores de leche*. UNAM.
- González-Castañeda, F., Peña-Ramos, A., Robles-Escobedo, F. J., & Núñez-Hernández, G. (2007). Producción de ensilaje de maíz con alto valor nutricional. (Folleto Técnico Núm. 36). INIFAP.
- Granados-Niño, J. A. (2023). Efecto de la selección del híbrido y altura de corte a la cosecha en sorgo: rendimiento de forraje y calidad nutritiva del ensilaje. [Tesis doctoral, FAZ Universidad Juárez del

Estado de Durango]. Repositorio Universitario
<http://repositorio.ujed.mx/jspui/handle/123456789/188>

Granados-Zurita, L., Quiroz-Valiente, J., Barrón-Arredondo, M., Cruz-Pelcastre, C., & Jiménez-Ortiz, M. M. (2011). Costo de producción del litro de leche y carne en un sistema de lechería de doble propósito. *AICA.*, 1, 424-427.

Gressley, T. F., Hall, M. B., & Armentano L. E. (2011). RUMINANT NUTRITION SYMPOSIUM: Productivity, digestion, and health responses to hindgut acidosis in ruminants. *J. Animal Sci.*, 89(4), 1120-1130. <https://doi.org/10.2527/jas.2010-3460>

Gregory, P.J. (2006). *Plant Roots. Growth, Activity and Interactions with Soils.* Blackwell, Oxford. <https://doi.org/10.1360/zd-2013-43-6-1064>.

Hackmann, T. J., & Spain, J. N. (2010). Invited review: Ruminant ecology and evolution: Perspectives useful to ruminant livestock research and production. *J. Dairy Sci.* 93(4): 1320-1334. <https://doi:10.3168/jds.2009-2071>

Hardacre, A.K., & Turnbull, H.L. (1986). The growth and development of maize (*Zea mays* L.) at five temperatures. *Ann. Bot.* 58(6), 779–787. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087260>

Hesketh, J. D. (1963). Limitations to photosynthesis responsible for differences among species. *Crop Sci.* 3, 493. <https://doi.org/10.2135/cropsci1963.0011183X000300060011x>

Hobson, P.N. and Stewart, C.S. (1997) *The Rumen Microbial Ecosystem.* 1st Edition, Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1453-7>

Holmes, B. J. (2009). Software applications for sizing silos to maximize silage quality. In *Proc. Intl. Symp. For. Qual. Conserv* (Vol. 1, pp. 189-208). 101 <http://isfqcbrazil.com.br/proceedings/2009/softwareapplications-for-sizing-silos-to-maximize-silage-quality1.pdf>

Holstein de México. (11 de julio de 2024). Nuestra historia. <https://holstein.com.mx/>

Hoyle, F. C., Murphy, D. V., & Fillery, I. R. P. (2006). Temperature and stubble management influence microbial CO₂-C evolution and gross N transformation rates. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(1), 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.04.020>

Hristov, A., & Broderick, G. A. (1994). In vitro determination of ruminal protein degradability using [15N] ammonia to correct for microbial nitrogen uptake. *J. Animal Sci.*, 72(5), 1344-1354. <https://doi.org/10.2527/1994.7251344x>

Hsiao, T. C., Fereres, E., Acevedo E., & Henderson, D. W. (1976). Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. En: Lange, O. L., Kappen, L. y Schulze, E. D. (Eds.), *Ecological*

- studies. Analysis and synthesis, Volume 19, Water and Plant Life. Berlin, Springer-Verlag, págs. 281-305.
- Huhtanen, P., Kaustell, K., & Jaakkola, S. (1994). The use of internal markers to predict total digestibility and duodenal flow of nutrients in cattle given six different diets. *Animal Feed Sci. Tech.*, 48(3-4), 211-227. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(94\)90173-2](https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)90173-2)
- Huhtanen, P., Rinne, M., & Nousiainen, J. (2007). Evaluation of the factors affecting silage intake of dairy cows: a revision of the relative silage dry-matter intake index. *Animal : an international journal of animal bioscience*, 1(5), 758–770. <https://doi.org/10.1017/S175173110773673X>
- Hussain, M. Z., Hamilton, S. K., Bhardwaj, A. K., Basso, B., Thelen, K. D., & Robertson, G. P. (2019). Evapotranspiration and water use efficiency of continuous maize and maize and soybean in rotation in the upper Midwest U.S. *Agric. Water Manag.* 221, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.049>.
- Jokela, W. E., Grabber, J. H., Douglas, L. K., Balsler, T. C., & Palmquist, D. E. (2009). Cover crop and liquid manure effects on soil quality indicators in a corn silage system. *Agron. J.*, 101(4), 727 – 737. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0191>
- Jones, C. M., Roth, G. W., Heinrichs, J., & Ishler, V. A. (2023). From Harvest to Feed: Understanding Silage Management. The Pennsylvania State University, PA, USA. <https://extension.psu.edu/from-harvest-to-feed-understanding-silage-management#section-95>
- Kato-Yamakake, T. A., Mapes-Sánchez, C., Mera-Ovenda, L. M., Serratos-Hernández, J. A., & Bye-Boettler, R. A. (2009). Origen y diversificación del maíz. Una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 116 pp. México, D.F.
- Kiniry, J.R., Ritchie, J.T., Musser, R.L., Flint, E.P., & Iwig, W.C., (1983). The photoperiod sensitive interval in maize. *Agron. J.* 75, 687–690. <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500040026x>.
- Knight, C. H. (2001). Lactation and gestation in dairy cows: flexibility avoids nutritional extremes. *PNS*, 60, 527-537. <https://doi.org/10.1079/pns2001115>
- Kourous, G. (14 de diciembre de 2011). Major gains in efficiency of livestock systems needed. FAO. <http://www.fao.org/news/story/en/item/116937/icode/>.
- Kotarski, S. F., Kwaniska, R. D., & Thurner K. K. (1992). Starch hydrolysis by the ruminal microflora. *The Journal of Nutrition*, 122(1), 178-190. <https://doi.org/10.1093/jn/122.1.178>

- Krehbiel, C. R. (2014). INVITED REVIEW: Applied nutrition of ruminants: Fermentation and digestive physiology. *The Professional Animal Scientist*, 30(2), 129 – 139. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)30100-5](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30100-5)
- Kreikemeier, K. K., Harmon, D. L., Peters, J. P., Gross, K. L., Armendariz, C. K., & Krehbiel, C. R. (1990). Influence of dietary forage and feed intake on carbohydrase activities and small intestinal morphology of calves. *J. Animal Sci.*, 68(9), 2916-2929. <https://doi.org/10.2527/1990.6892916x>
- Kresović, B., Tapanarova, A., Tomić, Z., Životić, L., Vujović, D., Sredojević, Z., & Gajić, B. (2016). Grain yield and water use efficiency of maize as influenced by different irrigation regimes through sprinkler irrigation under temperate climate. *Agric. Water Manag.* 169, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.01.023>.
- Kruczynska, H., Darul, K., Nowak, W., & Kowalik, I. (2001). The chemical composition and ruminal degradability of maize silages depending on the cultivar and mowing height at harvest. *J. Animal and Feed Sci.*, 10 (2), 331-337. <https://doi.org/10.22358/jafs/70117/2001>
- Kung Jr, L., Moulder, B. M., Mulrooney, C. M., Teller, R. S., & Schmidt, R. J. (2008). The Effect of Silage Cutting Height on the Nutritive Value of a Normal Corn Silage Hybrid Compared with Brown Midrib Corn Silage Fed to Lactating Cows. *J. Dairy Sci.*, 91(4), 1451–1457. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0236>
- Kung, L. Jr., Shaver, R. D., Grant, R. J., & Schmidt R. J. (2018). Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silage. *J. Dairy Sci.* 101(5): 4020-4033. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13909>
- Laborde, J., & Sánchez-Ríos, G. (2004). Los Tuxtlas: el paisaje de la sierra. Instituto de Ecología.
- Lapierre, H., & Lobley, G. E. (2001). Nitrogen recycling in the ruminant: a review. *J. Dairy Sci.*, 84(E. Suppl.), E223-E236. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)70222-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)70222-6)
- Leek, B. F. (1986). Sensory receptors in the ruminant alimentary tract. In: Milligan LP, Grovum WL, Dobson A, editors. *Control of Digestion and Metabolism in Ruminants*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; pp. 3–18.
- Leng, R. A. (1991). Application of biotechnology to nutrition of animals in developing countries. FAO.
- Lobley, G. E. (2003). Protein turnover—what does it mean for animal production? *Canadian J. Animal Sci.*, 83(3), 327-340. <https://doi.org/10.4141/A03-019>
- M'hamed, D., Favardin, P., & Verité, R. (2001). Effects of the level and source of dietary protein on intake and milk yield in dairy cows. *Anim. Res.*, 50(3), 205-211. <https://doi.org/10.1051/animres:2001127>

- Martínez-Montaño, E., Viana-Castrillón, M. T., & Shimada-Miyasaka, A. (2018). Digestión y metabolismo ruminal. En Shimada-Miyasaka, A. (Ed.), *Nutrición Animal* (pp 93-136). Trillas.
- Martínez-Rodríguez, J. G., Castellanos, Z., Rivera-González, M., Núñez-Henrández, G., & Faz-Contreras, R. (2006). Contaminación por nitratos en acuíferos del norte de México y del estado de Guanajuato. *Agrofaz*, 6(3), 379-388.
- McAllister, T. A., Bae, H. D., Jones, G. A., & Cheng, K. J. (1994). Microbial attachment and feed digestion in the rumen. *J. Animal Sci.*, 72(11), 3004-3018. <https://doi.org/10.2527/1994.72113004x>
- McCully, M. E. (1999). Roots in soil: unearthing the complexities of roots and their rhizospheres. *Annu. Rev. Plant Biol.* 50, 695–718. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.695>.
- McNaughton, K. G., & Jarvis, P. G. (1991). Effects of spatial scale on stomatal control of transpiration. *Agric. For. Meteorol.* 54, 279–302. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(91\)90010-N](https://doi.org/10.1016/0168-1923(91)90010-N).
- Navarro-García, G., & Navarro-García, S. (2013). *Química agrícola. Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas*. Mundiprensa.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2021. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Eighth Revised Edition*. Washington, DC: The National Academies Press.
- National Research Council. (1985). *Ruminant Nitrogen Usage*. Washington, DC: The National Academies Press.
- National Research Council. (2001). *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Seventh Revised Edition, 2001*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Newton, G. L., Bernard, J. K., Hubbard, R. K., Allison, J. R., Lowrance, R. R., Gascho, G. J., Gates, R. N., & Vellidis, G. (2003). Managing manure nutrients through multi-crop forage production. *J. Dairy Sci.*, 86(6), 2243-2252. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73815-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73815-6)
- Neylon, J. M., & Kung Jr, L. (2003). Effects of cutting height and maturity on the nutritive value of corn silage for lactating cows. *J. Dairy Sci.*, 86(6), 2163–2169. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73806-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73806-5)
- Noblet, J., Fortune, H., Shi, X. S., & Dubois S. (1994). Prediction of net energy value of feeds for growing pigs. *J. Animal Sci.*, 72(2), 344-354. <https://doi.org/10.2527/1994.722344x>
- Nocek, J. E., & Tamminga, S. (1991). Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effect on milk yield and composition. *J. Dairy Sci.*, 74(10), 3598-3626. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78552-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78552-4)

- Nocek, J. E., & Russel, J. B. (1988). Protein and Energy as an Integrated System. Relationship of Ruminant Protein and Carbohydrate Availability to Microbial Synthesis and Milk Production. *J. Dairy Sci.*, 71(8), 2070-2107. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(88\)79782-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79782-9)
- Núñez-Hernández, G., González-Castañeda, F., Faz-Contreras, R., Figueroa-Viramontes, U., Nava-Camberos, U., Peña-Ramos, A., Reta-Sánchez, D. G., Jasso-Ibarra, R., Maciel-Pérez, L. H., Orozco-Hernández, G., Payán-García, J. A., & Baez-Iracheta, F. (2006). Tecnología de producción de maíz forrajero de alto rendimiento y calidad nutricional. (Folleto Técnico Num. 13). INIFAP.
- Mikha, M. M., Rice, C. W., & Benjamin, J. G. (2006). Estimating soil mineralizable nitrogen under different management practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70, 1522-1531. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0253>
- Oba, M., & Allen, M. (1999). Evaluation of the importance of the digestibility of neutral detergent fiber from forage: effects on dry matter intake and milk yield of dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 82, 589–596. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75271-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75271-9)
- Oba, M., & Allen, M. (2000). Effects of brown midrib 3 mutation in corn silage on productivity of dairy cows fed two concentrations of dietary neutral detergent fiber: 3. Digestibility and microbial efficiency. *J. Dairy Sci.* 83(6):1350-1358. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75002-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75002-8)
- Oba, M., & Allen, M. (2003). Effects of corn grain conservation method on feeding behavior and productivity of lactating dairy cows at two dietary starch concentrations. *J. Dairy Sci.*, 86(1), 174-183. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73598-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73598-X)
- OECD/FAO (2022), OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/f1b0b29c-en>.
- Olmos Colmenero, J. J., & Broderick, G. A. (2006). Effect of Amount and Ruminant Degradability of Soybean Meal Protein on Performance of Lactating Dairy Cows. *J. Dairy Sci.*, 89(5), 1635–1643. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72230-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72230-5)
- Orantes-Zebabúa, M. A., Platas-Rosado, D., Córdova-Avalos, V., De los Santos-Lira, M. C., & Córdova-Avalos, A. (2014). Caracterización de la ganadería de doble propósito en una región de Chiapas, México. *ERA*. 1(1), 49-58.
- Ørskov, E. (1988). Nutrición proteica de los rumiantes. Editorial ACRIBA.
- Ørskov, E., & McDonald, I. (1970). The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *The Journal of Agricultural Science*, 92(2), 499-503. doi:10.1017/S0021859600063048

- Otegui, M. E., Andrade, F. H., & Suero, E. E. (1995). Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *F. Crop. Res.* 40(2), 87–94. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00093-R](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00093-R).
- Otegui, M. E., Cirilo, A. G., Uhart, S. A., & Andrade, F. H. (2021). Maize. En Sadras, V. O., & Calderini D. F. (Eds.). *Crop physiology: case histories for major crops.* (3 – 43). Academic Press.
- Owen, E. C. (1967). Nutrition balance techniques and their limitations. Nitrogen balances. *Proc. Nutr. Soc.*, 26(1), 116-124. <https://doi.org/10.1079/pns19670020>
- Owens, N. F., & Zinn, R. (1988). Protein metabolism of ruminant animals, in ed. by D.C. Church, *The Ruminant Animal. Digestive Physiology and Nutrition.* (Department of Animal Science, Oregon State University, Corvallis, OR, USA, 1988), pp. 227–249
- O'Brien, P. L., & Hatfield, J. L. (2019). Dairy manure and synthetic fertilizer: a meta-analysis of crop production and environmental quality. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2, 1-12. <https://doi.org/10.2134/age2019.04.0027>
- Pahlow, G., Muck, R. E., Driehuis, F., Oude-Elferink, S. J. W. H., & Spoelstra, S. F. (2003). Microbiology of ensiling. In D. R. Buxton, R. E. Muck, and J. H. Harrison, eds. *Silage Science and Technology.* Vol. 42. Madison, WI, Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., and Soil Sci. Soc. Am. pp. 31– 93. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr42.c2>
- Padilla, J. M., & Otegui, M. E. (2005). Co-ordination between Leaf Initiation and Leaf Appearance in Field-grown Maize (*Zea mays*): Genotypic Differences in Response of Rates to Temperature. *Annals of Botany.* 96(6), 997 – 1007. <https://doi.org/10.1093/aob/mci251>
- Paustin, K., Collier, S., Baldock, J., Burgess, R., Creque, J., DeLonge, M., Dungait, J., Ellert, B., Frank, S., Goddard, T., Govaerts, B., Grundy, M., Henning, M., Izaurrealde, R. C., Madaras, M., McConkey, B., Porzig, E., Rice, C., Searle, R., Seavy, N., Skalsky, R., Mulhern, W., Jahn M. (2019). Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system. *Carbon Management*, 10(6), <https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1633231>
- Pedroza-Sandoval, A., Ríos-Flores, J. L., Torres-Moreno, M., Cantú-Brito, J. E., Piceno-Sagarnaga, C., & Yáñez Chávez, L. G. (2014). Eficiencia del agua de riego en la producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) y alfalfa (*Medicago sativa*): impacto social y económico. *Terra Latinoamericana*, 32(3), 231-239. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792014000300231&lng=es&tlng=es.

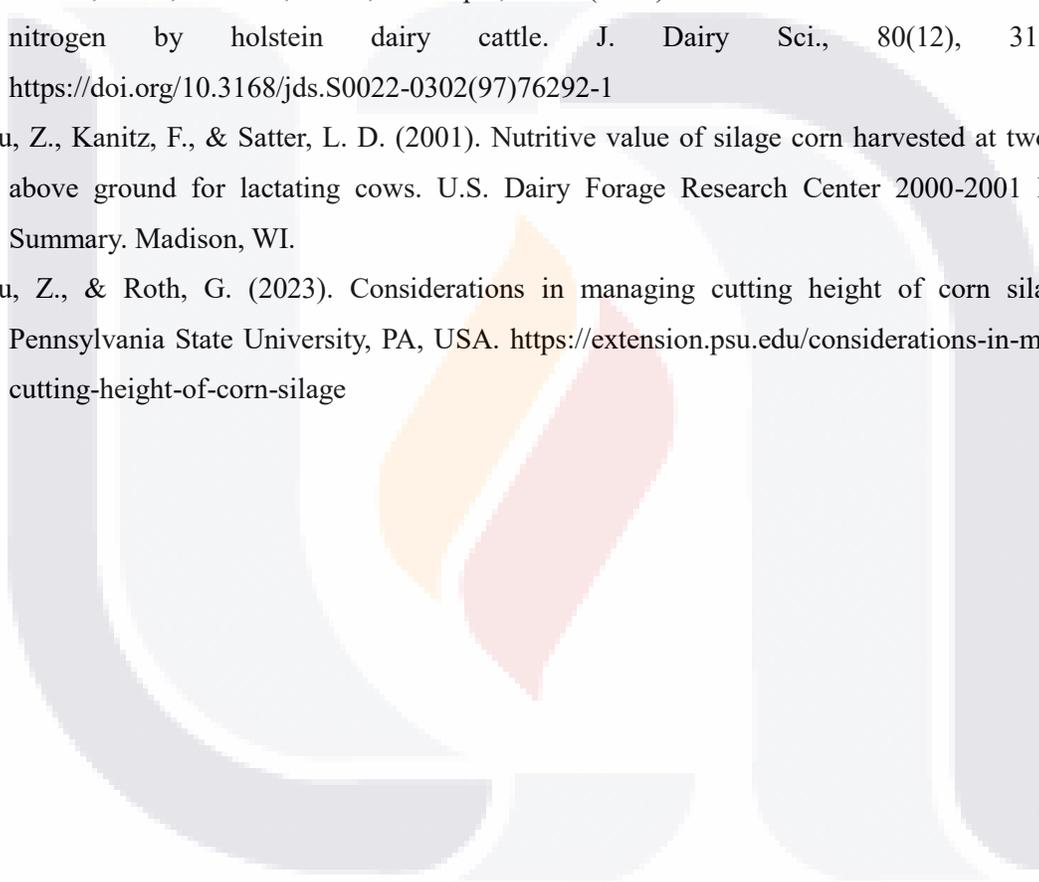
- Pérez-Barbería, F. J. (2020). Chapter 2, The Ruminant: life history and digestive physiology of a symbiotic animal. En García-Yuste, S (Ed.), Sustainable and environmentally friendly dairy farms (19-45). Springer.
- Peters, C. J., Picardy, J., Darrouzet-Nardi, A. F., Wilkins, J. L., Griffin, T. S., & Fick, G. W. (2016). Carrying capacity of U.S. agricultural land: Ten diet scenarios. *Elementa* 4:116. <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000116>.
- Petersen, J. (1932). A formula for evaluating feeds on the basis of digestible nutrients. *Journal of Dairy Science* 15: 293-297.
- Pitt, R. E., & Muck, R. E. (1993). A diffusion model of aerobic deterioration at the exposed face of bunker silos. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 55(1), 11-26. <https://doi.org/10.1006/jaer.1993.1029>
- Ramirez-Cabral, N.Y.Z., Kumar, L., & Shabani, F., (2017). Global alterations in areas of suitability for maize production from climate change and using a mechanistic species distribution model (CLIMEX). *Sci. Rep.* 7, 5910. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05804-0>.
- Ramírez-Gutiérrez, D. E., Olmos-Colmenero, J. J., Peña-Ramos, A., Sánchez-Duarte, J. I., Medina-Núñez, E., Gallardo-Ramírez, S., & Santana, O. I. (2024). Acumulación de materia seca, rendimiento y calidad nutricional del forraje de híbridos de maíz cosechados a diferentes días después de la siembra. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 15(2), 287-301. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v15i2.6554>
- Rasmussen, P. E., & Rohde, C. R. (1988). Long-term tillage and nitrogen fertilization effects on organic nitrogen and carbon in a semiarid soil. *Soil Science Society of America Journal*, 52: 1114-1117. <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200040041x>
- Rattalino-Edreira, J. I., Guilpart, N., Sadras, V., Cassman, K. G., van Ittersum, M. K., Schils, R. L. M., & Grassini, P. (2018). Water productivity of rainfed maize and wheat: a local to global perspective. *Agric. For. Meteorol.* 259, 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.019>.
- Reta-Sánchez, D. G., Serrato-Corona, J. S., Quiroga-Garza, H. M., Gaytán-Mascorro, A., & Figueroa-Viramontes, U. (2017). Secuencias de cultivo alternativas para incrementar el potencial forrajero y productivo del agua. *Rev. Mex. Ciencias Pecuarias*. 8(4), 397 – 406. <http://dx.doi.org/10.22319/rmcp.v8i4.4645>
- Robledo-Padilla, R. (2018). Producción de leche en México y el impacto de las importaciones de leche en polvo. [Sección de Libro, UNAM]. [ruIIEc https://ru.iiec.unam.mx/4223/](https://ru.iiec.unam.mx/4223/)
- Romo-Bacco, C. E., Valdivia-Flores, A. G., Carranza-Trinidad, R. G., Cámara-Córdova, J., Zavala-Arias, M. P., Flores-Ancira, E., & Espinosa-García, J. A. (2014). Brechas de rentabilidad

- económica en pequeñas unidades de producción de leche en el altiplano central mexicano. *Rev. Mex. Ciencias Pecuarias*, 5(3), 273-290.
- Román-Ponce, H., Cabello-Frías, E., & Wilcox, C. J. (1978). Producción de leche de vacas holstein, suizo pardo y jersey en clima tropical. *Rev. Mex. Ciencias Pecuarias*, 34, 21 – 33. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v0i34.2630>
- Rotz, C. A. (2004). Management to reduce nitrogen losses in animal production. *J Anim Sci.*, 82 (E-Suppl.) 119-137. https://doi.org/10.2527/2004.8213_supplE119x
- Russell, J. B., O'Connor J. D., Fox, D. G., Van Soest, P. J., & Sniffen C. J. (1992). A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: I. ruminal fermentation. *J. Animal Sci.*, 70(11), 3551-3561. <https://doi.org/10.2527/1992.70113551x>
- Russell, J., & Rychlik, J. (2001). Factors That Alter Rumen Microbial Ecology. *Science*, 292(5519), 1119-1122. <https://doi.org/10.1126/science.1058830>
- SADER. (2015). Ganadería bovina y sus derivados. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/ganaderia-bovina-y-sus-derivados>
- Sanchez-Duarte, J., Granados-Niño, J., Santana O., Reyes-González, A., Reta-Sánchez, D., Ochoa, E., & López-Calderón, M. (2021) Air Fryer: Determinación de la Materia Seca en Forrajes y Dietas para Ganado Lechero. INIFAP, Desplegable para productores No. 40. DOI: 10.13140/RG.2.2.15996.05768
- Santana, O. I. (2018). Impact of sources and level of forages in intensive dairy systems: whole farm nutrient balance, lactation performance, and feeding behavior. [Tesis doctoral, University of Wisconsin-Madison]. UW Digital Collections <https://search.library.wisc.edu/digital/A7GFNFE2NNZ7HY9A>
- Santana, O. I., Olmos-Colmenero, J. J., & Wattiaux M. A. (2019). Replacing alfalfa hay with triticale hay has minimal effects on lactation performance and nitrogen utilization of dairy cows in a semi-arid region of Mexico. *J. Dairy Sci.*, 102(9), 8546–8558. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-16223>
- Santana, O. I., Peña-Ramos, A., Sanchez-Duarte, J. I., & Reyes-González, A. (2021). Effects of tillage system and cutting height at harvest on dry matter yield, chemical composition, and digestibility of forage maize [Poster presentation]. 2021 American Dairy Science Association® Annual Meeting. Evento virtual. <https://www.adsa.org/Portals/0/SiteContent/Docs/Meetings/PastMeetings/Annual/2021/71.pdf>
- Santana, O. I., & Peña-Ramos, A. (2024). Evaluación de híbridos de maíz para forraje. (Informe 2023). INIFAP.

- Santos, A. O., Ávila, C. L. S., & Schwan, R. F. (2013). Selection of tropical lactic acid bacteria for enhancing the quality of maize silage. *J. Dairy Sci.*, 96(12), 7777-7789. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6782>
- Santos, F. A. P., Santos, J. E. P., Theurer, C. B., & Huber, J. T. (1998). Effects of Rumen-Undegradable Protein on dairy cow performance: a 12-year literature review. *J. Dairy Sci.*, 81(12), 3182-3213. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75884-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75884-9)
- Schettini, M. A., Prigge, E. C., & Nestor, E. L. (1990). Influence of mass and volume of ruminal contents on voluntary intake and digesta passage of a forage diet in steers. *J. Animal Sci.*, 77(7), 1896-1904. <https://doi.org/10.2527/1999.7771896x>
- SE. 2012. Análisis del sector lácteo en México. https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/analisis_sector_lacteo.pdf
- Smith, L. W., Goering, H. K., & Gordon, C. H. (1972). Relationships of forage compositions with rates of cell wall digestion and indigestibility of cell walls. *J. Dairy Sci.*, 55(8), 1140-1147. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(72\)85636-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(72)85636-4)
- SNIIM. (2024). Precio de ingredientes para la formulación de raciones. Recuperado de la base de datos de Mercados Nacionales Pecuarios-SNIIM.
- SIAP. (2024). Cierre de la producción agrícola (1980-2023). Recuperado de la base de datos de Producción Agrícola-SIAP.
- St-Pierre, N. R., & Thraen, C. S. (1999). Animal grouping strategies, sources of variation, and economic factors affecting nutrient balance on dairy farms. *J. Animal Sci.*, 77(Suppl:2), 72-83. https://doi.org/10.2527/1999.77suppl_272x
- St-Pierre, N. R., & Glamocic, D. (2000). Estimating unit costs of nutrients from market prices of feedstuffs. *J. Dairy Sci.*, 83(6), 1402-1411. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75009-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75009-0)
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Ferreres, E., & Raes D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. En Hsiao, T. C. (Ed). *Riego y Drenaje*. (119 – 129). FAO.
- Streeter, M. T., Schilling, K. E., Jones, C. S., & St Clair, M. (2023). Effects of cattle manure and soil parent material on shallow groundwater quality. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 6, e20380. <https://doi.org/10.1002/agg2.20380>
- Strong D. T., & Fillery I. R. P. (2002). Denitrification response to nitrate concentrations in sandy soils. *Soil Biol. Biochem.*, 34(7), 945–954. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00026-3)

- Spek, J. W., Dijkstra, J., Van Duinkerken, G., & Bannink, A. (2012). A review of factors influencing milk urea concentration and its relationship with urinary urea excretion in lactating dairy cattle. *J. Agricultural Sci.*, 151(3), 407-423. <https://doi.org/10.1017/S0021859612000561>
- SSSA. (2001). *Glosary of soil science terms*. SSSA.
- Tempelman R. (2009). Assessing experimental designs for research conducted on commercial dairies. *J. Dairy Scie.* 92(1), 1-15. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1404>
- Trejo-Escareño, H. I., Salazar-Sosa, E., López-Martínez, J. D., & Vázquez-Vázquez, C. (2013). Impacto del estiércol bovino en el suelo y producción de forraje de maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(5), 727-738. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342013000500006&lng=es&tlng=es.
- Uhart, S. A., & Andrade, F. H. (1995a). Nitrogen and carbon accumulation and remobilization during grain filling in maize under different source/sink ratios. *Crop Sci.* 35(1), 183–190. <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500010034x>.
- Uhart, S. A., & Andrade, F. H. (1995b). Nitrogen deficiency in maize: I. effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. *Crop Sci.* 35(5), 1376–1383. <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500050020x>
- USDA. (2014). Claves para la taxonomía de suelos. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>
- USDA. (2024). The American Dairy Industry. <https://www.nal.usda.gov/exhibits/speccoll/exhibits/show/the-american-dairy-industry>
- Valadares, R.F.D., Broderick, G. A., Valadares Filho, S. C., & Clayton M. K.. (1999). Effect of replacing alfalfa silage with high moisture corn on ruminal protein synthesis estimated from excretion of total purine derivatives. *J. Dairy Scie.*, 82(12), 2686 – 2696. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75525-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75525-6)
- Van Saun, R. J., & Herdt, T. (2014). Chapter 12 - Nutritional Assessment. En Cebra, C. Anderson, D. E., Johnson, L. W. (Eds.), *Llama and Alpaca Care* (pp. 100 – 123). Elsevier.
- Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional ecology of the ruminant* (2da Edición). Cornell University Press.
- Vilaboa-Arroniz, J., & Díaz-Rivera, P. (2009). Caracterización socioeconómica y tecnológica de los sistemas ganaderos en siete municipios del estado de Veracruz, México. *Zootecnia Trop.*, 27(4), 427-436.
- Vohra, A., Syal, P., & Madan, A. (2016). Probiotic yeasts in livestock sector. *Animal Feed Sci. and Tech.*, 219, 31-47. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.05.019>

- Weil, R. R., & Magdoff, F. (2004). Significance of soil organic matter to soil quality and health. Weil, R. R., & Magdoff, F. (Eds.), *Soil organic matter in sustainable agriculture* (pp 1 – 43). CRC Press.
- Weinberg, Z. G., Ashbell, G., Chen, Y., Gamburg, M., & Sela, S. (2004). The effect of sewage irrigation on safety and hygiene of forage crops and silage. *Animal feed science and technology*, 116(3-4), 271-280. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2004.07.009>
- Wiersma, D. W., Carter, P. R., Albrecht, K. A., & Coors, J. G. (1993). Kernel milkline stage and corn forage yield, quality, and dry matter content. *J. Prod. Agric.* 6(1), 94-99.
- Wilkerson, V. A., Mertens, D. R., & Casper, D. P. (1997). Prediction of excretion of manure and nitrogen by holstein dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 80(12), 3193-3204. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76292-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76292-1)
- Wu, Z., Kanitz, F., & Satter, L. D. (2001). Nutritive value of silage corn harvested at two heights above ground for lactating cows. U.S. Dairy Forage Research Center 2000-2001 Research Summary. Madison, WI.
- Wu, Z., & Roth, G. (2023). Considerations in managing cutting height of corn silage. The Pennsylvania State University, PA, USA. <https://extension.psu.edu/considerations-in-managing-cutting-height-of-corn-silage>



ANEXO



UNIVERSIDAD DE COLIMA
Dirección General de Educación Continua
otorga la presente

CONSTANCIA

a Francisco Javier Santoyo Ávila

por participar en el

Coloquio Nacional e Internacional de Estadística Aplicada en Ciencias Agropecuarias “Incentivando el Pensamiento Matemático”

organizado por la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia
los días 29 y 30 de septiembre de 2022, con valor curricular de 14 horas.

Atentamente
Estudia • Lucha • Trabaja
Colima, Colima, México; 7 de noviembre de 2022



Mtro. Jesús Omar Brizuela Padilla
Director General

Libro: 005 Foja: 040. Registro STPS: R6UCO-6209190013
Id: 636957d1-e770-4f0d-b415-04d394d51664

PERTINENCIA
QUE TRANSFORMA



UNIVERSIDAD DE COLIMA
Dirección General de Educación Continua

otorga la presente

CONSTANCIA

a **Francisco Javier Santoyo Ávila**

por participar en el

Coloquio Nacional e Internacional de Estadística Aplicada en Ciencias Agropecuarias “Incentivando el Pensamiento Matemático”

organizado por la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia
los días 29 y 30 de septiembre de 2022, con valor curricular de 14 horas.

Atentamente

Estudia • Lucha • Trabaja

Colima, Colima, México; 7 de noviembre de 2022



Mtro. Jesús Omar Brizuela Padilla
Director General

Libro: 005 Foja: 040. Registro STPS: R6UCO-6209190013
Id: 636957d1-e770-4f0d-b415-04d394d51664

PERTINENCIA
QUE TRANSFORMA



Reunión Nacional de Investigación
— **PECUARIA** —

MEMORIA

"EN BUSCA DE COMIDA" / Azucena Vargas Valero

COMPILADORES:

Ana María Anaya Escalera, Claudia García Figueroa, Laura Yavarik Alvarado Avila, Miguel Enrique Arechavaleta Velasco y Luis Reyes Muro

ISSN

2954-4165



ENSILAJE DE MAÍZ COSECHADO A DOS ALTURAS DE CORTE: I. RENDIMIENTO, PERFIL NUTRICIONAL Y FERMENTATIVO Y DIGESTIBILIDAD.Francisco Javier Santoyo-Ávila¹, Carlos Urban Haübi-Segura¹ y Omar Iván Santana^{2*}¹Centro de Ciencias Agropecuarias – Universidad Autónoma de Aguascalientes, ²INIFAP Campo Experimental Pabellón*Autor para correspondencia: santana.omar@inifap.gob.mx**Palabras clave:** Energía neta de lactancia, fibra, residuos.**Introducción**

En las cuencas lecheras del centro-occidente de México, el ensilaje de maíz es el principal forraje utilizado en la alimentación del ganado, en donde alrededor de un 70% se produce en el establo y el resto se compra a pie de parcela (Santana *et al.* 2021). La alta demanda de maíz para ensilaje conlleva a incrementar el rendimiento a expensas del uso deliberado de fertilización química y dejar pocos residuos del cultivo. Aunque la aplicación de estiércol es una práctica común en la región, ésta se hace con dosis excesivas y sin considerar una rotación, lo cual adiciona sales además de nitrógeno (N) y materia orgánica (MO), por lo que paulatinamente se disminuye el potencial productivo de los cultivos. Una alternativa para mitigar lo anterior es agregar materia orgánica dejando residuos del cultivo sin adicionar sales (Ferrareto *et al.* 2018b). Elevar la altura de corte mejora la digestibilidad de la fibra detergente neutro (FDN) que es el principal limitante en el consumo de materia seca (MS) del ganado lechero (Santana *et al.*, 2021); además el forraje cosechado puede poseer mayor densidad energética que el incluir la fracción de tallo (residuo). Por consiguiente, el objetivo fue evaluar tres alturas de corte a cosecha en el rendimiento, perfil nutricional y fermentativo y digestibilidad del ensilaje de maíz.

Materiales y métodos

Área de estudio y diseño experimental. El estudio se realizó en el ciclo PV-2022 en un predio particular en la localidad de Betulia, Lagos de Moreno, Jalisco; ubicado a 1,999 msnm en la planicie de Ojuelos-Aguascalientes donde prevalece un clima semiseco templado con 475 mm de precipitación. El cultivo se estableció en un área aproximada de 9.6 ha que corresponden al cuarto de un pivote central de seis torres. El diseño experimental se consideró en bloques al azar en el que las dos torres centrales fueron cada una un bloque, en cada tratamiento de altura de corte 20, 30 y 40 cm sobre la base del suelo (AC20, AC30 y AC40, respectivamente) se seleccionaron en cada bloque tres parcelas experimentales (n=18) de un surco de 0.76 m de ancho y 5.8 m de largo.

Manejo agronómico. El cultivo se estableció en un suelo franco con pH de 8.9 y moderadamente salino, que es característico en el área de estudio. La siembra ocurrió en suelo húmedo el 26 de mayo utilizando el híbrido Supremo de la marca Aspros® a una densidad de 96,000 semillas ha⁻¹. El manejo realizado fue el convencional del productor con una dosis total de fertilizante aplicada de 280N-26P-00K, el control de plagas y malezas según lo fue requiriendo, no se manifestaron enfermedades en el cultivo.

Toma de muestras y registro de datos. La toma de muestras se realizó el 22 de octubre al acumular 1,513 unidades calor cuando el grano estuvo en etapa R4 (avance ¾ línea de leche). En cada parcela se cortó el total de plantas a 20, 30 o 40 cm sobre el nivel del suelo y se registró el peso fresco; cinco plantas completas fueron tomadas al azar de cada muestra y se molieron, se tomó una muestra de ~200 g para secar a 55°C hasta peso constante y determinar materia seca (MS), otra muestra de ~200 g fue introducida en bolsa gofrada y se extrajo el aire para hacer mini-silos al alto vacío.

Análisis químico y digestibilidad. Todos los mini-silos fueron abiertos a los 65 días de fermentación, se tomó una muestra de 20 g y se licó por 30 seg en 200 mL de agua destilada, el extracto se filtró a través de una capa doble de malla quesera e inmediatamente se determinó el pH con un potenciómetro. Del extracto filtrado, se tomaron 40 mL y se le agregaron 0.4 mL de H₂SO₄ al 50%, la muestra se centrifugó a 7,000 x g durante 15 minutos y se tomaron 4 mL del sobrenadante para determinar N-NH₃ utilizando el procedimiento de Noel y Hambleton (Ferrareto *et al.*, 2018a). El mini-silo remanente se pesó y secó a 48°C hasta peso constante, la muestra se molió con criba de 1 mm para análisis bromatológicos y digestibilidad. El contenido

LVIII Reunión Nacional de Investigación Pecuaria. Memoria. Chihuahua, Chih., 8 - 11 de noviembre de 2023

ENSILAJE DE MAÍZ COSECHADO A DOS ALTURAS DE CORTE: II. UTILIZACIÓN EN VACAS LECHERAS ALIMENTADAS CON DOS BALANCES DE PROTEÍNA METABOLIZABLE.

Francisco Javier Santoyo Ávila¹, Carlos Urban Häubi Segura¹, Omar Iván Santana²

¹Centro de Ciencias Agropecuarias – Universidad Autónoma de Aguascalientes, ²INIFAP Campo Experimental Pabellón

*Autor para correspondencia: santana.omar@inifap.gob.mx

Palabra clave: eficiencia de alimentación, digestibilidad, producción de leche.

Introducción

El ensilaje de maíz es el principal forraje utilizado en cuencas lecheras del Altiplano Mexicano, en donde representa entre el 40 y 55% de la base seca de la dieta. El nivel de inclusión depende de la calidad forrajera, en donde la digestibilidad de la fibra y contenido de grano son los principales factores clave (Ferrareto et al., 2018). Por otra parte, en esa región prevalece una escasez de agua y suelos degradados por falta de materia orgánica, lo cual afecta el potencial de rendimiento de los forrajes. Y aunque los establos lecheros aplican estiércoles al suelo, estos también agregan sales que intensifican los ya de por sí suelos alcalinos y salinos. Así pues, se requiere de otras estrategias que conjuntamente mejoren la calidad del forraje y a su vez agreguen materia orgánica al suelo sin adicionar sales. El incremento en la altura de corte es una opción viable, ya que se descarta la fracción de fibra más lignificada en la base del tallo (Bernard et al. 2004), mientras se adiciona al suelo materia orgánica sin sales extra. Adicionalmente, proveer fibra más digestible al rumen permite que el nitrógeno (N) no proteico sea convertido en proteína microbiana (NRC, 2001) y se pueda prescindir de proteínas de sobrepaso para asegurar el suministro de proteína metabolizable. No obstante, elevar la altura de corte no es bien recibida por productores, ya que puede mermar el rendimiento y afectar el inventario de ensilaje.

Objetivo

Evaluar el efecto de utilizar ensilaje de maíz cosechado a dos alturas de corte y dos balances de proteína metabolizable en la producción y composición de leche en vacas en la primera mitad de la lactación.

Materiales y métodos

Sitio de estudio y diseño experimental. El estudio se realizó de enero a abril de 2023 en un establo particular en la localidad de Betulia, Lagos de Moreno, Jalisco. Ciento veintiocho vacas Holstein multiparas que promediaron al inicio del estudio en 120 días en leche se asignaron a uno de cuatro corrales (unidad experimental, UE). Se utilizó un diseño en Cuadro Latino 4 × 4 con arreglo factorial 2 × 2 para evaluar el ensilaje de maíz cosechado a dos alturas de corte (20 vs. 40 cm; AC20 y AC40, respectivamente) y dos balances de proteína metabolizable (PM; +186 vs. +330 g d⁻¹) sobre el requerimiento de 2,500 g d⁻¹ (NRC, 2001). Cada período experimental tuvo dos semanas de adaptación y la tercera semana para registro de datos y toma de muestras.

La dieta contuvo 45% de ensilaje de maíz, 4.3% heno de triticale, 27.5% de grano de maíz molido y 23.2% de un núcleo proteico-mineral; el balance de PM se alteró desplazando pasta de soya de sobrepaso y pasta de canola del núcleo y adicionando 50 g de urea por vaca d⁻¹. Las dietas fueron iso-energéticas (1.57 Mcal kg⁻¹), iso-proteicas (16.6% de la MS) y tuvieron una diferencia de 2 unidades porcentuales en FDN (28.4 vs. 26.4% en AC20 y AC40, respectivamente). Las vacas fueron ordeñadas a las 04:00 y 16:00 h y el alimento se ofreció a la misma hora como ración totalmente mezclada (RTM). Todo el tiempo tuvieron acceso a agua fresca y limpia y diariamente se hicieron ajustes para permitir un rechazo del 5%.

Registro de datos y toma de muestras. En la tercera semana de cada período experimental, por tres días consecutivos se registraron los kg de RTM servidos y se pesó el rechazo de alimento en 24 h. Una muestra de éstos se secó a 55 °C hasta peso constante para determinar MS. El consumo de MS se calculó como la diferencia entre el alimento servido y rechazado dividido entre 32 vacas de cada UE. La producción de leche individual se registró en el programa del equipo de ordeña (DeLaval, Tumba, Suecia) y se obtuvo el promedio diario. En cada UE se seleccionaron al azar cinco vacas (observaciones) para obtener muestras de leche por cuatro ordeños consecutivos, iniciando en el ordeño p.m. del primer día que se registró