



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN Y DE LA
SALUD ANIMAL

**EFFECTO DE LA DENSIDAD DE MAÍZ (ZEA MAYS L.) HOJUELEADO AL
VAPOR SOBRE LA DIGESTIÓN EN GANADO DE ENGORDA.**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
PRESENTA
MANUEL ALEJANDRO FRANCO HERNÁNDEZ

TUTOR: LUIS CORONA GOCHI (FMVZ, UNAM)

COMITÉ TUTORAL:

RICHARD A. ZINN

(PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN Y DE LA
SALUD ANIMAL).

ALEJANDRO PLASCENCIA JORQUERA

(PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN Y DE LA
SALUD ANIMAL).

MÉXICO, DF.

NOVIEMBRE DEL 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS.

A Dios, por permitirme tener esta oportunidad de realización en mi vida, por darme todos los medios para realizar este proyecto y por guiarme en esta experiencia que fue muy enriquecedora para mí.

A mi familia que en todo momento estuvo conmigo, me apoyó incondicionalmente y me alentó para seguir adelante aún en los momentos más difíciles, por los consejos de mi padre mi principal guía y maestro, la paciencia y los ánimos de mi madre y por la ayuda incondicional de mis hermanos.

A María Esther Barba Paredes, que en todo momento me ha brindado su apoyo incondicional, por su paciencia, comprensión y motivación, por permitirme estar a su lado a pesar de las dificultades y compartir conmigo mis alegrías y fracasos.

A mi primo Juan Martín, a mi tío Mario Estrada, a mi familia de Pachuca, Hgo., a la familia Moreno Medrano de la Cd. De México, a la familia Martínez Ramírez, a Sergio Martínez y Sandra Valenzuela de la ciudad de Mexicali a todas las personas que incluso sin conocerme me brindaron su apoyo y cariño todo este tiempo.

A todas aquellas personas que me han ayudado o han hecho alguna oración por mí desinteresadamente durante esta travesía, sepan que yo estoy dispuesto a hacer lo mismo por ustedes y que cuentan con un amigo para toda la vida.

AGRADECIMIENTOS.

A mis tutores, el Dr. Luis Corona Gochi, el Dr. Alejandro Plascencia y el Dr. Richard Zinn que en todo momento me apoyaron y guiaron para la realización de este trabajo, por su paciencia y confianza y por toda la enseñanza que no solo académica, si no para la vida diaria me brindaron.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al personal que en la institución laboran, a las secretarías de posgrado, a los miembros del comité académico, a los responsables de cada área del servicio escolar y en especial a la Dra. Clara Aguillón por su apoyo incondicional y constante, gracias por permitirme ser parte de esta casa de estudios y por el soporte prestado a través del Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado (PAEP).

A la Universidad de California (UC-Davis), en su Centro de Investigación del Desierto, y al personal que en él laboran, a la Sra. Silvia Quintana, al Sr. Carl Adams, el Sr. Sergio Martínez, al Sr. Armando Silva, a todos por permitirme utilizar sus instalaciones, recursos y apoyarme en todo momento.

A la Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias (IICV) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Mexicali y a las personas que ahí laboran por su apoyo en todo momento en mi capacitación para la adecuada realización de este proyecto de investigación.

A mis maestros tanto de la UNAM como de la UABC por sus enseñanzas e instrucción de gran valor para mi formación.

Adicionalmente un agradecimiento al Dr. Fred Owens por sus consejos y aportaciones personales a este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo presupuestario para la realización de este proyecto.

RESUMEN.

Se realizaron dos experimentos para evaluar el efecto de la densidad de la hojuela del maíz procesado con vapor (MHV) en la digestión de nutrimentos. Las dietas experimentales contenían 77% (BS) de grano. En el primer experimento se utilizaron 6 novillos Holstein (153 ± 11 kg) habilitados con cánulas en rumen y duodeno en un diseño de cuadrado Latino 6x6 para medir el sitio e intensidad de digestión del MHV. En el segundo experimento se utilizaron 12 novillos Holstein (154 ± 9 kg) asignados bajo un diseño en bloques al azar para evaluar las características de la digestión en el tubo digestivo total. Los tratamientos consistieron en hojuelear maíz al vapor a las densidades: 0.46, 0.41, 0.36, 0.31 y 0.26 kg/L y una dieta control con maíz quebrado en seco (MQS=0.54 kg/L). Comparado con MQS, el proceso de hojuelear el maíz (MHV) no afectó la digestión ruminal del nitrógeno (N, $P = 0.65$), ni la eficiencia microbiana a nivel ruminal ($P = 0.29$). En el caso de la eficiencia proteica, ésta fue mayor para MHV (11.92%, $P < 0.01$). El MHV incrementó (12.1%, $P < 0.01$) la digestión ruminal de la materia orgánica (MO). En base al porcentaje del consumo del animal, solo el N y la fibra detergente neutro (FDN) tuvieron incrementos en la digestión postruminal ($P < 0.01$), mientras que la MO y el almidón no reflejaron mejoras ($P = 0.48$ y $P = 0.57$, respectivamente). La digestión a nivel de tubo digestivo total fue mayor ($P < 0.01$) para MO y N ($P < 0.05$) en las dietas que contenían MHV. El MHV incrementó la digestión del almidón a nivel ruminal (11.28%, $P < 0.01$), postruminal (34.24%, $P < 0.01$) y en todo el tubo digestivo (7.42%, $P < 0.01$). Al disminuir la densidad de la hojuela en MHV se incrementó (efecto lineal, $P < 0.01$) la digestión ruminal de la FDN y el porcentaje de eficiencia proteica. La digestión ruminal de la MO y la digestión postruminal del N como porcentaje de lo consumido (efecto lineal, $P < 0.05$) también se incrementó conforme se disminuyó la densidad de la hojuela. Así como la digestión postruminal de la FDN consumida y la digestión del tubo digestivo total de la MO presentó una tendencia (efecto lineal, $P < 0.10$) a incrementarse. La densidad de la hojuela afectó la eficiencia microbiana (efecto cuadrático, $P = 0.02$).

presentando el valor máximo a densidad de 0.36 kg/L. Al disminuir la densidad de la hojuela del MHV de 0.46 kg/L hasta 0.26 kg/L se incrementó la digestión del almidón *in vivo* hasta un 3.96% ($P < 0.01$) e *in vitro* hasta en un 10.37%. El proceso de hojueleado del maíz incrementó $6.83 \pm 1.94\%$ promedio del total de nutrientes. Mientras que en base a la técnica de reemplazo se observó un incremento del 5 % promedio en la ENm y un incremento del 6.5% promedio en la ENg cuando el maíz amarillo es hojueleado al vapor. Con base a los resultados, la densidad óptima de la hojuela está entre 0.36 y 0.31 kg/L, ya que densidades menores (vgr. 0.26 kg/L) disminuyen significativamente la eficiencia microbiana (5.28%), la eficiencia proteica (2.54%), la digestión ruminal de la MO (0.32%) y de la FDN (49.7%). Tomando como referencia adicional la excreción fecal del almidón, la densidad más adecuada fue la de 0.31kg/L. La medición del almidón fecal fue el mejor método para predecir la digestión del almidón a nivel del rumen ($r^2 = 0.97$) y del tubo digestivo total ($r^2 = 1.00$), pero debido a la sencillez en su determinación, la medición del grosor de la hojuela (GH, mm) fue la herramienta más sencilla, confiable y práctica para determinar el óptimo procesamiento del maíz hojueleado al vapor utilizado en dietas para rumiantes.

Palabras Clave: Almidón, bovinos, densidad de hojuela, digestión, maíz hojueleado al vapor.

ABSTRACT.

Two trials were conducted to examine the influence of flake density (FD) on the feeding value and digestion of steam-flaked corn (SFC). Experimental diets contained 77% (DM) corn grain. In Trial 1, treatment effects on site and extent of digestion were evaluated using six Holstein steers (153 ± 11 kg) with cannulas in the rumen and proximal duodenum in a 6 x 6 Latin square design. In Trial 2, treatment effects on characteristics of total tract digestion were evaluated using twelve Holstein steers (154 ± 9 kg) in a randomized block design. Treatments consisted of corn that had been steam-flaked to mean densities of .46, .41, .36, .31 and .26 kg/L and a control diet consisted of corn that had been dry rolled (DRC=.54kg/L). Compared with DRC, the SFC did not influence either the nitrogen ruminal digestion (N, $P=0.65$) nor the microbial efficiency on the rumen ($P=0.29$). Protein efficiency was greater to SFC (11.92% $P<0.01$). Ruminal digestion of organic matter (OM) increased (12.1%, $P<0.01$) in SFC diets. Based on animal intake %, N and neutral detergent fiber (NDF) post-ruminal digestion were increased ($P<0.01$), however OM and starch digestion did not increase ($P=0.48$ and $P=0.57$, respectively). Total tract digestion of OM ($P<0.01$) and N ($P<0.05$) were greater of SFC diets. The SFC diets improved ruminal (11.28%, $P<0.01$), postruminal (34.24%, $P<0.01$) and total tract (7.42%, $P<0.01$) starch digestion. Decreasing the FD resulted in a linear increase ($P<0.05$) in ruminal NDF digestion and protein efficiency, ruminal OM and postruminal N digestibility. Linear increases were observed in ruminal OM and postruminal N digestibility too. Postruminal digestibility of NDF and total tract digestibility of OM, increased linearly ($P<0.10$) decreasing FD. Flake density was affected the microbial efficiency (quadratic effect, $P=0.02$) showing 0.36kg/L the best value on this characteristic. Decreasing the flake density on SFC from 0.46 kg/L to 0.26 kg/L increased the *in vivo* starch digestion (3.96%, $P<0.01$) and *in vitro* starch digestion (10.37%). The steam flaked improve $6.83 \pm 1.94\%$ total digestible nutrients. Based on replace technique, it was observed an improvement of 5% for net energy of maintenance (NE) and 6% for net energy of gain (NEg) when SFC. It was

concluded that the optimal density is between 0.36 and 0.31 kg/L, because less density (for example 0.26 kg/L) decrease microbial efficiency (5.28%), protein efficiency (2.54%), ruminal digestion of OM (0.32%) and NDF ruminal digestion (49.7%). Taking additional references in the fecal starch input, the SFC 0.31 kg/L density was the most appropriate. The fecal starch measurement was the best method to predict the ruminal ($r^2= 0.97$) and the total tract ($r^2= 1.00$) starch digestion, but due the ease of its determination, flake thickness (FT, mm) is the most convenient and reliable measure for assessment of day-to-day process adequacy on feedlot cattle diets.

Key Words: Starch, cattle, corn, digestion, steam flaked corn.

CONTENIDO.

	Página
Resumen.....	III
Abstract	v
Lista de Cuadros.....	3
Lista de Figuras.....	5
Introducción.....	8
Revisión de literatura.....	13
Estructura del grano de maíz	14
Pericarpio, endospermo y germen.....	15
Composición química del grano de maíz	17
Estructura del almidón	20
Amilosa y amilopectina.....	22
Matriz proteica.....	24
Propiedades del almidón	25
Hinchamiento y gelatinización	25
Retrogradación.....	27
Digestión de los carbohidratos.....	28
Degradación del almidón en rumen.....	29
Digestión postruminal del almidón.....	32
Absorción de glucosa.....	35
Factores que afectan la digestibilidad del almidón	37
Factores antinutricionales.....	37
Tipo y nivel de forraje.....	38
Nivel de consumo.....	40
Características inherentes del animal.....	42
Interacciones almidón-proteína.....	46
Grado y tipo de procesamiento del grano.....	49
Maíz quebrado y molido en seco	50

Maíz hojueado al vapor.....	52
Densidad de la hojuela (procesamiento óptimo).....	54
Grano alto en humedad	57
Sitio y grado de digestión del almidón	59
Digestión in vitro del maíz y su correlación con la digestión in vivo.....	64
Justificación.....	70
Objetivos.....	72
Hipótesis.....	72
Materiales y métodos.....	73
Animales, tratamientos y procedimiento de muestreo.....	74
Análisis de laboratorio y cálculos.....	80
Análisis estadístico.....	84
Resultados y discusión.....	85
Conclusiones.....	107
Literatura citada	108

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página.
1	Composición química proximal del grano de maíz y sus principales componentes (%).....	18
2	Influencia del tipo animal en el sitio y extensión de la digestión en el almidón.....	45
3	Influencia del procesamiento del maíz en sitio y extensión en la digestión del almidón para el ganado de engorda.	62
4	Influencia de la densidad de la hojuela del maíz procesado con vapor sobre la digestibilidad del almidón en rumen e intestinos de ganado de engorda	63
5	Digestión del almidón soluble (ARA) y digestión del almidón insoluble (DAI), y digestión ruminal del almidón observada y predicha del maíz y del sorgo hojueados al vapor y quebrados.....	69
6	Composición de las dietas experimentales (Experimento 1).....	76
7	Composición de las dietas experimentales (Experimento 2).....	79
8	Influencia del procesamiento sobre las características físicas del maíz.....	86
9	Composición química y digestión enzimática del almidón del maíz de cada uno de los tratamiento.....	88

10	Efecto de la densidad de la hojuela sobre las características de la digestión en el ganado (Experimento 1).....	94
11	Efecto de la densidad de la hojuela sobre las características de la digestión del tubo digestivo total en el ganado (Experimento 2).....	100

LISTA DE FIGURAS.

Figura		Página.
1	Estructura del grano de maíz (FAO, 1993).....	14
2	Contenido nutricional del grano de maíz y de cada una de sus partes en fracción de base seca.....	17
3	Representación esquemática del gránulo de almidón.....	21
4	Estructura lineal de la amilosa y de la amilopectina.....	23
5	Representación esquemática de una sección de amilopectina.....	23
6	Fotografía de los gránulos de almidón en el maíz con microscopio electrónico.....	25
7	Impacto de la densidad del procesado en el grano en la desaparición del almidón ruminal.....	55
8	Relación entre la digestión del almidón en rumen e intestino delgado del consumo total de almidón menos la excreción fecal de almidón dividido por la indigestibilidad media del almidón.....	66

9	Relación entre la predicción de la digestión ruminal (PDR, %) y la densidad de la hojuela (DH, mm).....	89
10	Relación entre la predicción de la digestión ruminal (PDR, %) y la digestión ruminal observada (DRO, %).....	89
11	Relación entre la digestibilidad del almidón en el tubo digestivo total (DATT, %) y la densidad de la hojuela (DH, kg/L).....	102
12	Relación entre la digestibilidad del almidón en rumen (DAR, %) y la densidad de la hojuela (DH, kg/L).....	102
13	Relación entre la digestibilidad del almidón en el tubo digestivo total (DATT, %) y el grosor de la hojuela (GH, mm).....	103
14	Relación entre la digestibilidad del almidón en rumen (DAR, %) y el grosor de la hojuela (GH, mm).....	103
15	Relación entre la digestibilidad del almidón en el tubo digestivo total (DATT, %) y el almidón reactivo a la amilogucosidasa (ARA, %).....	104
16	Relación entre la digestibilidad del almidón en rumen (DAR, %) y el almidón reactivo a la amilogucosidasa (ARA, %).....	104

17	Relación entre la digestibilidad del almidón en el tubo digestivo total (DATT, %) y el almidón fecal (AF, % MS).....	105
18	Relación entre la digestibilidad del almidón en rumen (DAR, %) y el almidón fecal (AF, % MS).....	106

INTRODUCCIÓN.

Los cereales son muy importantes para la alimentación humana y pecuaria, pero destaca en particular el maíz, ya que es el que tiene el mayor valor energético y es utilizado no solo como fuente de alimento, sino también en la industria para la producción de almidón, glucosa, dextrosa, fructosa, aceites y en los últimos años como biocombustible (SIAP, 2012).

La producción del maíz en México se realiza en dos ciclos productivos (primavera-verano y otoño-invierno) en diversas condiciones agroclimáticas, de humedad, temporal y riego. Durante el periodo 1996-2006 se produjo un promedio anual de 19.3 millones de toneladas métricas de maíz, mientras que para el 2014 se estima que sea de más de 25 millones (SFA-SAGARPA, 2011) incluidos maíz blanco, amarillo y otros. Se cultivan principalmente dos variedades de maíz: blanco (92.9% de la producción total del maíz en el 2005) y amarillo o forrajero (5.9% de la producción total del maíz en el 2005), el blanco se destina exclusivamente para consumo humano en tanto que el amarillo se destina al procesamiento industrial y a la alimentación animal. En referencia al maíz amarillo, cuatro entidades contribuyen con el 94% de la producción total: Chihuahua (35%), Jalisco (25%), Tamaulipas (21%) y Chiapas (13%) (SIAP, 2012). En general se estima que para el 2014, habrá una producción en México de 2.106 millones t de maíz amarillo y un consumo de 11.248 millones t del mismo, de los cuales alrededor del 70% de este se destinará al consumo animal, proyectando una importación de más de 9 millones t (SFA-SAGARPA, 2011). El rendimiento estimado para el maíz blanco nacional promedio en el 2014 será de 3.4 toneladas por hectárea y para el maíz amarillo será de 5.3 toneladas por hectárea (SFA-SAGARPA, 2011).

Otro de los cereales que se producen en México y que se utilizan para la industria pecuaria, es el trigo, el cual la variedad que se usa para dicho sector, es la del trigo durum o cristalino y para el 2014 se espera que se produzcan 2.141

millones de t, con un consumo total de 1.490 millones t siendo 7.5 millones t utilizadas para la industria pecuaria y el resto para el consumo humano y la exportación. Con referencia al sorgo, que es de los granos más utilizados por el sector avícola y porcícola principalmente y que también se puede emplear en la alimentación de los bovinos, se estima que para el 2014 la producción nacional sea de 8.19 millones de t con un consumo total de 10.97 millones de t siendo el 98% destinado al consumo pecuario (SFA-Sagarpa, 2011).

La producción de biocombustibles es parte del proyecto de desarrollo competitivo de los países dentro del mercado agrícola internacional, en la que el objetivo es reducir la dependencia de las importaciones petroleras desarrollando energías alternativas. Por lo tanto el aumento de precios que ha experimentado el maíz desde el año 2006, tiene que ver con la demanda de productos agrícolas para la producción de etanol (González y Castañeda 2008). En fechas recientes, el precio del maíz ha experimentado una disminución sustancial, derivado de las cosechas record en los países productores, mostrándose además, una demanda estable con referencia a los años anteriores (Rabobank, 2014). Los precios actuales del maíz están en un rango de 178 a 225 dólares por tonelada métrica (ASERCA 2014), lo que significa un 40% menos aproximadamente con respecto a años pasados. Esto representa una ventana de oportunidad para los productores pecuarios que basan la alimentación de los animales en el maíz ya que desde el 2006 al 2012 los precios se habían mantenido altos por la demanda para la producción de biocombustibles.

Respecto al contexto mundial de la producción del maíz, los principales productores, en orden de importancia, son: Estados Unidos de América, con el 40% de la producción mundial, China con el 19%, Brasil con el 6% y México con el 3%, estos 4 países contribuyen con más del 50% de la superficie total cosechada a nivel mundial. Los países exportadores son prácticamente los mismos países que ocupan los primeros lugares en producción, a excepción de México, que siendo uno de los principales productores, sus requerimientos de maíz son superiores a su

producción, por lo que es uno de los principales países importadores. Destaca en el rubro de la exportación, EUA con el 60% de las ventas mundiales de maíz (principalmente de la variedad amarilla), Argentina con el 12%, Francia con el 9% y China con el 8% (SIAP 2012, con datos de FAO).

México importa la tercera parte de su consumo aparente de maíz mayoritariamente de los EEUU, el déficit actual de maíz en México es del orden de 10 millones de toneladas anuales, por los que paga \$2.5 mil millones de dólares anuales (Turrent *et al.*, 2012).

El maíz se ha usado en la alimentación animal en México, desde hace muchos años, principalmente en la avicultura y porcicultura. También se utiliza para incrementar los niveles de energía en la dieta de los bovinos. En los Estados Unidos de América, es común su inclusión en las dietas para los bovinos de engorda (Lardy, 2013) y en México en los principales corrales de engorda es común el uso de dietas a base de maíz.

Sin embargo, a pesar de que es un excelente ingrediente en la formulación de raciones para las dietas de los bovinos, por los costos que implica el uso de este grano y dada sus características físico-químicas es indispensable realizar un óptimo procesamiento para incrementar su valor alimenticio. El incrementar el valor alimenticio del maíz, implica utilizar métodos de procesamiento que incrementen la digestibilidad y la palatabilidad evitando los efectos adversos que representan la disminución del pH ruminal o los trastornos digestivos. Entre los métodos más comunes están los empleados para disminuir el tamaño de partícula (grano quebrado o molido) con adición o no de humedad; ensilado con la humedad natural del maíz antes de que el grano sea secado para obtener maíz de alta humedad o mediante la adición de agua para reconstituir el maíz antes del ensilado y/o alimentación del ganado; y el hojueleado al vapor. (Zinn *et al.*, 2011). El hojueleado al vapor mejora significativamente la digestibilidad total del almidón y el valor

alimenticio del sorgo y el maíz cuando se compara con el grano entero, el quebrado en seco o el molido (Theurer *et al.*, 1999; Zinn *et al.*, 2002; Corona *et al.*, 2006; Plascencia *et al.*, 2011; Zinn *et al.*, 2011). Incluso, estudios previos han mostrado que el proceso de hojueado al vapor incrementa (18%) el valor energético de maíz sobre procesos en seco en la engorda de bovinos (Zinn *et al.*, 2002). Sin embargo, los estándares de producción que reflejen el procesamiento óptimo no están bien definidos, este hecho en particular, representa un elemento de gran importancia a considerar, ya que el efecto en el procesamiento es elemental para la productividad de los animales en la engorda, donde por ejemplo, el uso de maíz hojueado al vapor puede incrementar la digestibilidad total del almidón hasta en un 10% comparado con el maíz entero o el maíz hojueado en seco y hasta un 4.5% cuando se compara con el maíz molido, incluso en el caso de la comparación con el maíz de alta humedad que representa prácticamente los mismos niveles de digestibilidad a nivel del tubo digestivo total, el maíz de alta humedad tiene una proporción de almidón digerido a nivel ruminal de 8% más que el maíz hojueado al vapor (Zinn *et al.*, 2011). En forma práctica, el grado de procesamiento óptimo del maíz hojueado al vapor, se puede determinar a través de la evaluación de la concentración de almidón en heces, al ser ésta una forma rápida y precisa para determinar la digestibilidad total del almidón ya que por sí solo el almidón en heces, explica el 96% de la variación en la digestibilidad total del almidón (Zinn *et al.*, 2007), de esta manera, como lo muestra en un ejemplo Zinn *et al.* (2011), si en nuestra unidad de producción se alimenta con maíz hojueado al vapor con una densidad de 0.36 kg/L y analizamos las muestras de heces de diferentes corrales, encontrando un 4.5 % de almidón en las mismas entonces tendremos una digestibilidad del almidón del 97.8% (EN_m del maíz 2.37 Mcal/kg) y si por el contrario aumentamos el grado de procesamiento de dicho maíz hasta hojuearlo al vapor a una densidad de 0.34 kg/L, podríamos encontrar una cantidad de almidón en heces inferior al 3% lo que representaría una digestibilidad superior al 99% y una EN_m del maíz cercana a 2.40 Mcal/kg, esto nos permitiría aumentar la eficiencia en el uso del maíz en las dietas para el ganado. La diferencia de almidón en heces, en éste

ejemplo es 1.5%, si un bovino en promedio excreta 1kg de MS/día, esto representa 15 gramos de almidón por día que desecharía extra por un mal procesado de la hojuela, si es una engorda de 25,000 animales representa 375 kg de almidón al día, por 90 días que dure la engorda en promedio, significan 33,750 kg de almidón que se desperdician por un mal proceso del maíz hojueleado al vapor y esto multiplicado por el costo del maíz (200 dólares/tonelada), significa 6,750 dólares (\$89,370 pesos mexicanos con una paridad del dólar de \$13.24) por ciclo productivo.

Recientemente la ganadería ha experimentado un incremento en los precios de los animales destetados y cebados, esto motivado por la apertura a la exportación de las canales mexicanas hacia destinos como Japón, Corea del Sur, Rusia y los EUA. Este hecho representa una ventana de oportunidad para los productores en nuestro país para hacer más eficiente sus sistemas de producción utilizando el maíz como base en las dietas formuladas para el ganado de engorda, logrando mejorar la calidad de las canales, los índices de conversión y recortando los tiempos de alimentación de los animales hasta el sacrificio. (Streeter *et al.*, 1990; Zinn, 1991; Owens *et al.*, 1997; Plascencia *et al.*, 2002).

REVISIÓN DE LITERATURA.

El maíz (*Zea mays*) pertenece a la familia de las gramíneas y es una planta anual alta dotada de un amplio sistema radicular fibroso. Se trata de una especie que se reproduce por polinización cruzada y la flor femenina (elote, mazorca, choclo o espiga) y la masculina (espiguilla), se localizan en distintos lugares de la planta. Se puede definir la planta del maíz como un sistema metabólico cuyo producto final es, en lo fundamental, almidón depositado en unos órganos especializados: los granos.

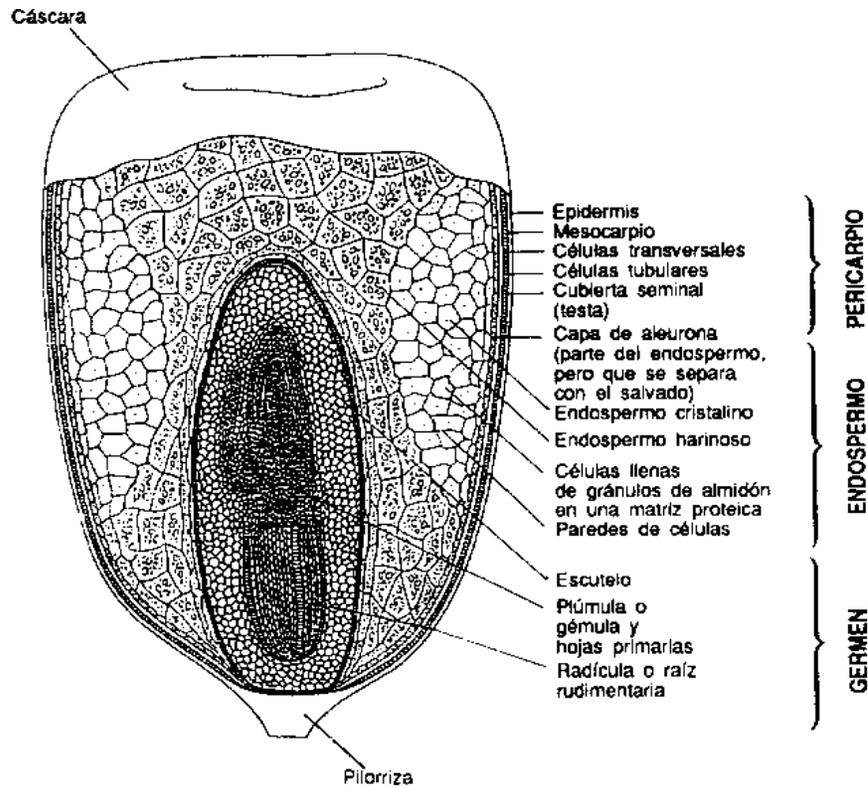
Las panojas (olotes) son las estructuras donde se desarrolla el grano, en un número variable de hileras (12 a 16), produciendo de 300 a 1 000 granos, que pesan entre 190 y 300 g por cada 1000 granos. El peso depende de las distintas prácticas genéticas, ambientales y de cultivo. El grano constituye aproximadamente el 42 por ciento del peso seco de la planta. El maíz es a menudo de color blanco o amarillo, aunque también hay variedades de color negro, rojo y jaspeado. Hay varios tipos de grano, que se distinguen por las diferencias de los compuestos químicos depositados o almacenados en él (dulce, dentado, harinoso y cristalino) (FAO, 1993).

El maíz es uno de las principales fuentes de energía y proteína para las dietas de los Bovinos. Gran parte de su importancia radica en el contenido de nutrientes que contiene, accesibilidad del mismo y su alta digestibilidad si este es procesado adecuadamente. Los métodos de procesamiento buscan modificar la aceptabilidad y la digestibilidad, principalmente del almidón de los granos, sin provocar disfunciones digestivas, incrementando el valor energético del alimento (Owens *et al.*, 1997).

A continuación se realiza una revisión de las características físico-químicas del maíz y su desempeño en la digestión de los bovinos de engorda.

Estructura del grano de maíz

Los granos de maíz se desarrollan mediante la acumulación de los productos de la fotosíntesis, la absorción a través de las raíces y el metabolismo de la planta de maíz en la espiga (mazorca). El grano de maíz se denomina como cariósipide o cariopsis; cada grano contiene el revestimiento de la semilla, o cubierta seminal, y la semilla.



(Facilitado por el Wheat Flour Institute, Chicago, Illinois, 1964)

FIGURA 1: Estructura del grano de maíz (FAO, 1993).

En la figura se muestran las cuatro estructuras físicas fundamentales del grano: el pericarpio (cáscara, o salvado); el endospermo; el germen (embrión); y la piloriza (tejido inerte en que se unen el grano y el carozo) (FAO, 1993). Las cuales según Owens y Zinn (2005) se dividen en diferentes proporciones dentro del maíz, 5.3%, 82.9%, 11.1% y 0.8% respectivamente.

Pericarpio:

El pericarpio sirve para proteger a las semillas de la humedad, de los insectos y de la contaminación por hongos que impedirían la germinación. Aunque el pericarpio contiene aproximadamente 5% del peso del grano de maíz, este contiene cerca de la mitad de la Fibra Detergente Neutra (FDN) total del grano (10% FDN). Para la digestión del almidón del endospermo, es necesario que el pericarpio sea fraccionado para permitir que la humedad, las enzimas y los microorganismos entren. Por otro lado, la matriz proteica que rodea a los gránulos de almidón, también limita la digestión del mismo (McAllister *et al.*, 1993). Cualquier factor que agregue estrés y por consiguiente, ruptura al pericarpio (por ejemplo, secado del maíz, alta temperatura, cosechado precoz) incrementará la exposición del almidón y el sitio y la tasa de digestión. El ensilaje y el hojueleado al vapor reducirán la asociación física del pericarpio y el endospermo (Zinn *et al.*, 2011). Para la digestión del almidón contenido en el endospermo, la cubierta del grano debe ser quebrada para permitir la acción microbiana y enzimática, pero aun después del rolado en seco el pericarpio usualmente permanece unido al almidón vítreo, por lo que esta tendencia puede limitar el acceso del endospermo a la fermentación o digestión (Owens y Zinn, 2005). El secado con alta temperatura y la cosecha temprana, así como los métodos que emplean calor, humedad, tiempo y acción mecánica son factores que permiten el rompimiento del pericarpio y la separación de éste con el endospermo y la matriz proteica, lo que conlleva un incremento de la exposición del almidón así como la tasa y grado de digestión, por lo que el rolado u

hojueleado con vapor, micronizado, reconstituido y el ensilado pueden reducir la asociación física del pericarpio con el endospermo (Huntington, 1997; Theurer, 1986).

Endospermo:

El mayor componente del grano es el endospermo, que es un tejido de almacenaje (principalmente de almidón). Tiene dos capas distintas, la capa de la aleurona que es la más externa y contiene al endospermo córneo, esta capa a su vez contiene enzimas esenciales y enzimas inhibitorias. Las células del endospermo córneo son alargadas, con gránulos de almidón poligonal y están envueltos por los cuerpos de proteína (Huntington, 1997). Por debajo de estas láminas se encuentra el endospermo harinoso que posee altas concentraciones de gránulos de almidón que no están unidos a la matriz proteica, lo que hace a este tipo de almidón más susceptible a las fuerzas externas como la digestión o el procesamiento del grano (Rooney y Pflugfelder, 1986).

La diferencia en la proporción del endospermo córneo y harinoso determina su clasificación en 5 tipos generales: flint (duro), palomero, harinoso, dentado y dulce (Huntington, 1997). El maíz flint posee un endospermo grueso, córneo o vítreo, que encierra un centro pequeño, granuloso y amiláceo, mientras que el harinoso presenta un endospermo suave o blando. El maíz dentado representa una cruce de los tipos flint y harinoso, por lo que su endospermo es calloso y vítreo en los lados y parte posterior del grano, mientras que su núcleo central es blando (FAO, 1993; Pratt *et al.*, 1995). El maíz contiene del 25 al 80% del almidón en el endospermo córneo, donde los gránulos de almidón están densamente empaquetados con una matriz proteica muy lentamente degradable e insoluble en el rumen, el almidón restante se encuentra en el endospermo harinoso. El maíz amarillo contiene aproximadamente un 50% de endospermo córneo, mientras que el maíz blanco contiene un 80% (Zinn *et al.*, 2011). Los híbridos comerciales de maíz, tienen también diferentes proporciones de endospermo córneo: harinoso (Corona *et al.*, 2006). El mayor contenido de endospermo vítreo en el maíz, está asociado con una

disminución de la digestibilidad ruminal del almidón (Philippeu *et al.*, 1999a; Correa *et al.*, 2002), sin embargo, Zinn *et al.* (1995) observaron que el hojueado al vapor incrementa la digestibilidad tanto del almidón como de la materia orgánica libre de almidón en el tipo de maíz vítreo. Corona *et al.* (2006) concluyeron que el almidón contenido en las variedades de maíz vítreo son menos digeridas con un proceso de quebrado en seco comparado con la aplicación en dicho maíz de un proceso de hojueado al vapor.

Germen:

El germen es el encargado de generar una nueva planta, en él están contenidos la mayor parte del aceite y de los aminoácidos esenciales que posee el maíz (Zinn *et al.*, 2011).

Composición química del grano de maíz

La composición química del grano depende de sus características físicas que le han sido conferidas por los factores genéticos y ambientales, por lo cual difiere entre las diversas variedades. El grano de maíz utilizado en la industria ganadera presenta la composición química mostrada en el Cuadro 1, y cuya distribución se encuentra representada en la Figura 2.

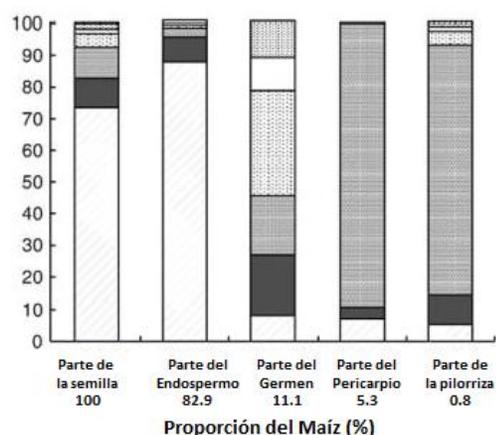


FIGURA 2. Contenido nutricional del grano de maíz y de cada una de sus partes en fracción de base seca.

(Adaptado de Zinn *et al.*, 2011):

**Almidón (□), Proteína (■), Fibra (▨),
Detergente Neutra (▩), Grasa (▤),
Cenizas (▥), Azúcar (▦).**

Cuadro 1. Composición química proximal del grano de maíz y sus principales componentes (%). (Adaptado de May, 2008).

Componente	Grano^a	Pericarpio^b	Endospermo^b	Germen^b
Proteína	9.80	3.70	8.00	18.40
Extracto Etéreo	4.06	1.00	0.80	33.22
Fibra Neutro Detergente (FDN)	10.80	86.70	2.70	8.80
Ceniza	1.46	0.80	0.30	10.50
Almidón	71.88	7.30	87.60	8.30
Azúcar		0.34	0.62	10.80

^aNRC, 1996; ^bFAO, 1993

El componente químico principal del grano de maíz es el almidón y las características de la cubierta de la semilla, pared celular y estructura de la matriz proteica son elementos importantes en la digestión del mismo, cuyo contenido en el maíz se puede encontrar desde 72 % (Streeter *et al.*, 1990; FAO, 1993) hasta 76% (Herrera-Saldaña *et al.*, 1990), esta variación puede deberse a factores medioambientales, variedad, edad, diferencias en el almacenaje, procesamiento y metodología de análisis (Herrera-Saldaña *et al.*, 1990). Sin embargo, Zinn *et al.* (2002) informa una concentración de almidón de 71.0% ± 0.4 en 46 híbridos modernos de maíz amarillo dentado en pruebas hechas en EUA.

El almidón es el nutriente más importante de la dietas de los rumiantes para promover altos niveles de producción, por lo que su utilización óptima es fundamental para mejorar la eficiencia de la producción en los animales (Theurer, 1986).

Otros hidratos de carbono que se encuentran en el maíz son azúcares sencillos en forma de glucosa, sacarosa y fructosa, en cantidades que varían del 1

al 3 por ciento del grano y la sucrosa, el elemento más importante, se halla esencialmente en el germen. (FAO, 1993).

Después del almidón, las proteínas constituyen el siguiente componente químico del grano por orden de importancia. En las variedades comunes, el contenido de proteínas puede oscilar entre el 8 y el 11% del peso del grano, y en su mayor parte se encuentran en el endospermo. El aceite del grano de maíz está fundamentalmente en el germen y viene determinado genéticamente, con valores que van del 3 al 18 por ciento. (FAO, 1993).

El pericarpio, que protege al grano de la humedad, los insectos y las infecciones fúngicas, posee un elevado contenido de fibra detergente neutro (FDN), aproximadamente entre 85% y 90%, lo que representa el 4.7 % del peso del grano y cerca de la mitad de la FDN del grano, considerando que el grano tiene en promedio 10 a 12% de FDN. La disponibilidad de energía de varios granos está fuertemente relacionada con la cantidad de almidón en el grano, ya que éste es más digestible que los otros componentes, especialmente si se compara con la digestibilidad de la FDN (Owens y Zinn, 2005).

Otros nutrientes presentes en el maíz son los minerales expresados como concentración de cenizas que es de aproximadamente del 1.3 por ciento.

Además posee vitaminas liposolubles, la provitamina A (carotenoide) y la vitamina E. Los carotenoides se hallan sobre todo en el maíz amarillo, en cantidades que pueden ser reguladas genéticamente, en tanto que el maíz blanco tiene un escaso o nulo contenido de ellos. La mayoría de los carotenoides se encuentran en el endospermo duro del grano y únicamente pequeñas cantidades en el germen.

En cuanto a las vitaminas hidrosolubles estas se encuentran sobre todo en la capa de aleurona del grano de maíz, y en menor medida en el germen y el endospermo, se han encontrado cantidades variables de tiamina, niacina y

riboflavina y cantidades pequeñísimas de colina, ácido fólico, ácido pantoténico y ácido ascórbico (FAO, 1993).

Estructura del almidón

El almidón es el polisacárido de almacenamiento de las gramíneas y leguminosas, su concentración es de 60 al 80% en la mayoría de los granos de cereales (Herrera-Saldaña *et al.*, 1990; Huntington, 1997; Van Soest, 1986).

El almidón es almacenado en las plantas en forma de gránulos dentro de las células alargadas del endospermo. Los gránulos del almidón del maíz están embebidos en una matriz proteica que está constituida principalmente por zeína, se encuentran dentro de amiloplasto celular y se agregan formando una estructura más compleja. (French, 1973; Nocek y Tamminga, 1991; Tester *et al.*, 2004). Estos gránulos son pseudo- cristales que tienen áreas organizadas (cristalinas) o relativamente no organizadas (amorfos), las zonas amorfas y cristalinas se depositan de tal forma (forma de hélice) que hacen anillos para formar el tamaño y forma final del gránulo (Figura 3) (Buléon *et al.*, 1998).

Otra característica de estos gránulos es que son insolubles en agua fría y de hinchamiento reversible, en los cuales las moléculas de amilopectina y amilosa se unen mediante puentes de hidrógeno. La densidad verdadera del almidón varía de 1.4 a 1.6 g/cm³. El tamaño de los gránulos del almidón de maíz puede ser de 2 a 30 µm, con formas esféricas o poligonales, que rotan en un plano de luz polarizada y se observa una sombra característica, en forma de cruz, fenómeno conocido como birrefringencia. El microscopio de luz polarizada es utilizado como herramienta para identificar almidón y para medir la pérdida de organización de los gránulos de almidón durante el procesado. En general, los gránulos de almidón que muestran birrefringencia se considera que están en su estado nativo (Rooney y Pflugfelder, 1986; Zinn, *et al.*, 2002).

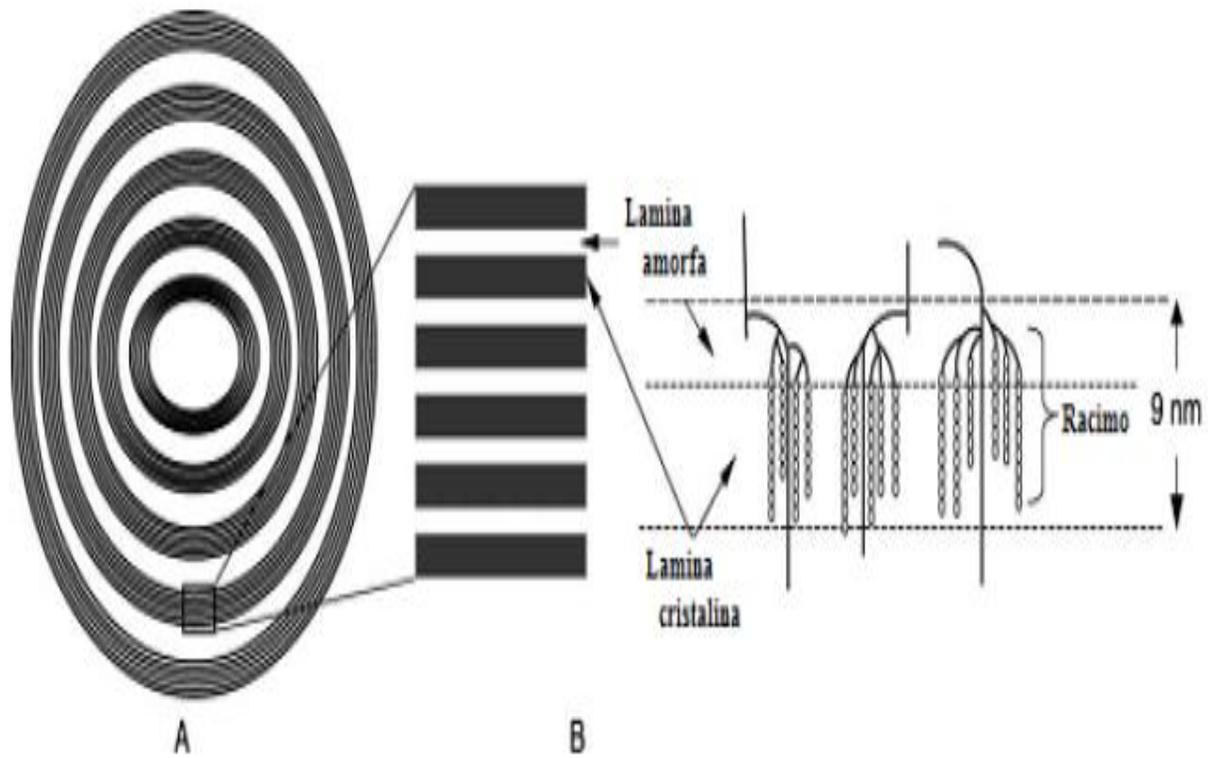


FIGURA 3. Representación esquemática del gránulo de almidón. (Tester et al, 2004)

Amilosa y Amilopectina

El almidón es en general, una mezcla de dos polisacáridos muy similares: la amilosa y la amilopectina

La amilosa es un polímero lineal de unidades de D-glucosa con ligaduras α -1-4, por lo que tiende a ser menos digestible por las enzimas (Figura 4). El contenido de amilosa del cereal normal es de 20 a 30 % (French, 1973). Procedimientos genéticos y cruzamientos han proporcionado nuevas variedades de almidón incluyendo el maíz waxy (céreo) que puede contener poca o nada de amilosa o el maíz alto en amilosa (amilomaíz) que tiene aproximadamente 70% de amilosa, en el cuál sus cadenas de amilopectina parecen ser más largas (Thomison, 1991).

La amilopectina es un polímero ramificado mucho más largo y es el componente más abundante de los almidones normales. Las cadenas lineales de D-glucosa con ligaduras α -1-4, tienen puntos de ramificación α -1-6 cada 20 o 25 residuos de glucosa, las cadenas lineales de la molécula son clasificadas como "A" (no lineales), "B" (lineales), "C" (una cadena central simple que tiene un grupo final reducido) (Figura 4), (Figura 5). La amilopectina comprende del 70 al 80% de la mayoría del almidón de los cereales. El almidón del maíz común contiene cerca del 27% de amilosa y 72 % de amilopectina (Nocek y Tamminga, 1991).

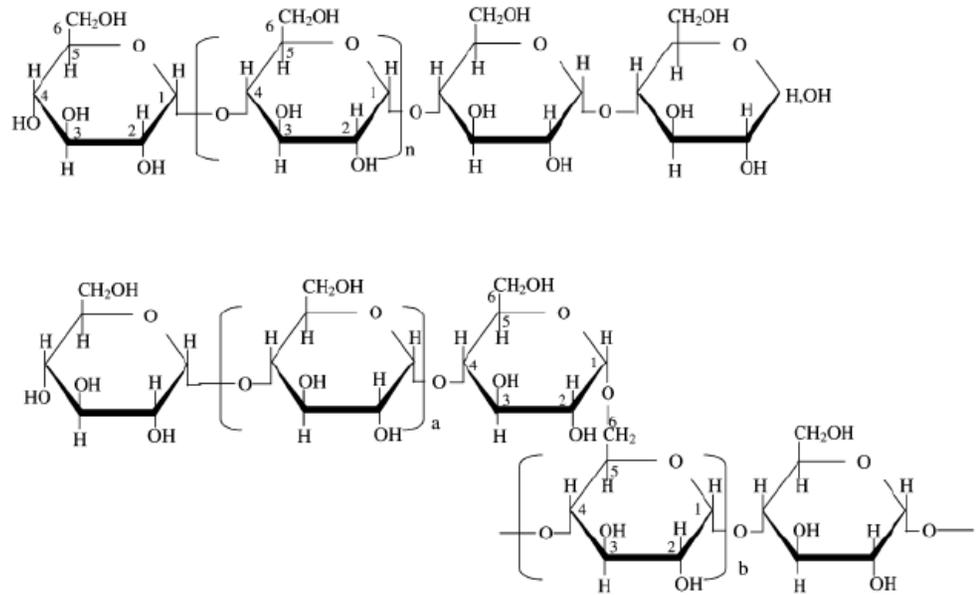


FIGURA 4. Estructura lineal de la amilosa (superior) y de la amilopectina (inferior)

(Tester et al, 2004)

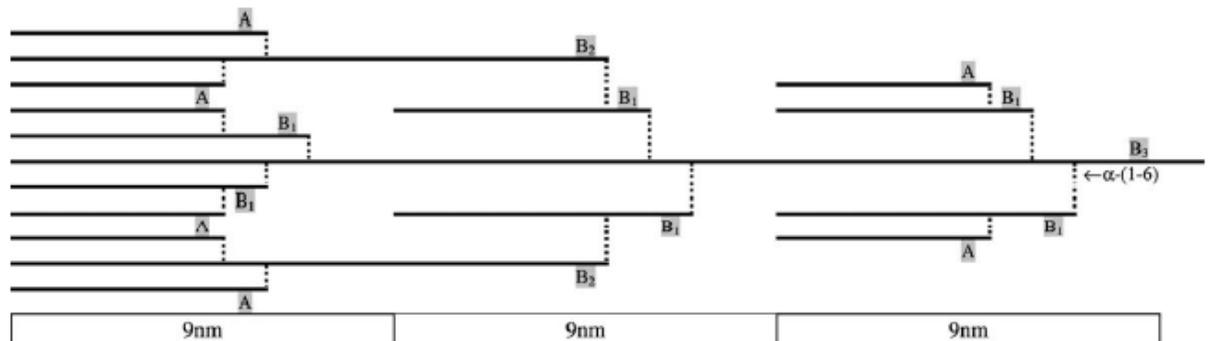


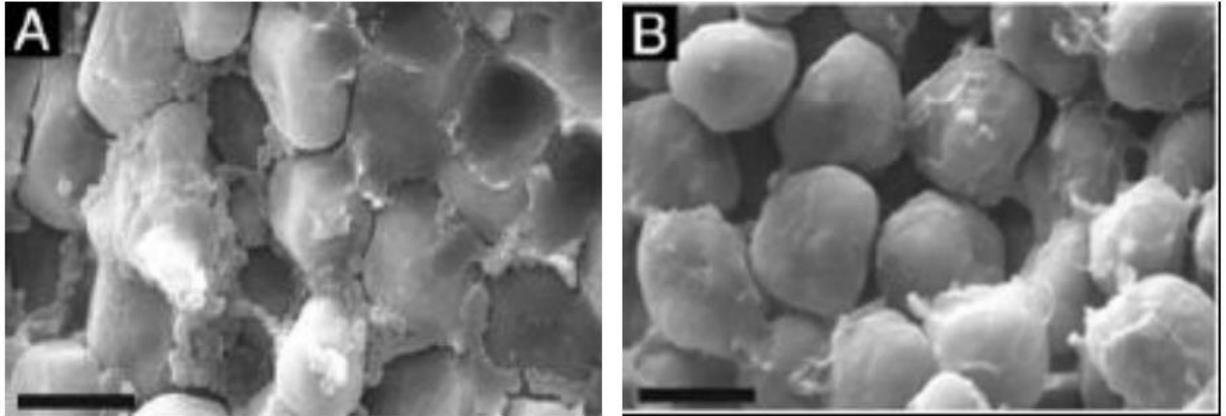
FIGURA 5. Representación esquemática de una sección de amilopectina. Indica el patrón de ramificación de la unidad cadenas α -(1,4)-(A, B1, B3), unidas entre sí por los enlaces α -(1,6)-(puntos de ramificación) (Tester et al., 2004).

Existen variedades de maíz altas en amilopectina y otras altas en amilosa. Las variedades cerosas son un ejemplo de un maíz alto en amilopectina, estas variedades son utilizadas en la industria alimenticia (budines, helados, cremas, sopas, productos lácteos, etc.), así como en la industria textil, de los adhesivos, corrugados y del papel. Las variedades de alta amilosa se usan principalmente en la industria de las películas y fibras. (Crop science, 2012; Fassio *et al.*, 2000).

Matriz proteica.

La accesibilidad a los gránulos de almidón depende de la composición química y el grosor de la pared que existe a su alrededor y de la interacción intracelular con proteínas, que puede impedir o disminuir el ataque enzimático (Cheng *et al.*, 1991).

La dureza del endospermo del maíz, está relacionada con su composición química, presenta un endospermo córneo que contiene gránulos de almidón compactos de forma poligonal con abundante matriz proteica directamente asociada, mientras que en el endospermo blando los gránulos son más grandes y menos agregados (Figura 6). La matriz proteica del maíz está compuesta principalmente de la prolamina, conocida como zeína, que es una proteína de almacenamiento soluble en alcohol y que representan 50 % o más del total de proteína del endospermo del maíz, aunque los granos con el gen mutado, conocido como maíz opaco, opaque 2 (o2) (Figura 6), tienen menos de 50 % de zeína. La zeína puede ser dividida en varias clases estructuralmente distintas: alfa, beta, gama y delta (Pratt *et al.*, 1995, Robutti, *et al.*, 1997). Aunque las proteínas zeína son solubles en alcohol, estas son insolubles dentro del medio ruminal. Por lo que las proteínas zeínas son fermentadas lentamente en el rumen (NRC, 1996). Otras proteínas que componen al maíz son los albuminas, globulinas y glutelinas (Hoffman y Shaver, 2008).



Endospermo Vítreo.

Endospermo Harinoso.

FIGURA 6. Fotografía de los gránulos de almidón en el maíz con microscopio electrónico. A) Gránulos de almidón densamente embebidos en la matriz de proteína-prolamina. B) Gránulos de almidón en el endospermo del maíz opaco con una encapsulación menos densa por las proteína-prolamina. (Gibbon, 2003).

Propiedades del almidón.

Hinchamiento y gelatinización.

La gelatinización es un proceso de hidratación que confiere un estado gelatinoso, típico de coloides coagulados (gel). Con la exposición al calor y a la humedad, las moléculas de almidón se hinchan y forman geles (Zinn *et al.*, 2011). En la práctica, la gelatinización es medida por la pérdida de birrefringencia, poder de hinchamiento, solubilidad y reactividad enzimática (Zinn *et al.*, 2002).

En general, la gelatinización puede estar causada por agentes mecánicos, térmicos, químicos o su combinación. Una gelatinización mecánica del almidón ocurre durante la molienda de los cereales, el resultado es un almidón “dañado” susceptible a ser degradado por acción de las amilasas, lo que ocurre también durante la extrusión, hojueleado y quebrado en seco (Nocek y Tamminga, 1991).

Los gránulos de almidón sufren gelatinización, o pérdida irreversible de su estructura nativa. En su primera etapa, cuando es aplicada la energía suficiente para romper los puentes de hidrógeno en el área cristalina. Por ejemplo, exposición gradual al calor (hasta 55°C) ocasiona que los gránulos de almidón absorban agua y se alcance la temperatura de transición vítrea, se incrementa su peso hasta un 50%. Los gránulos se hinchan, formando un gel y exponiendo la parte de la amilosa haciéndola susceptible a la degradación enzimática y pérdida de la birrefringencia (Richards y Hicks, 2007; Nocek y Tamminga, 1991). Este hinchamiento es reversible, ya que el almidón después de que se enfría y seca se observa sin alteración, sin embargo si el calentamiento es aumentado hasta un rango de 60 a 80°C, la mayoría del almidón sufre un hinchamiento o gelatinización irreversible en el cual los gránulos pierden su cristalinidad (Owens, *et al.*, 1997). Este proceso está asociado a la región amorfa, sin embargo, conforme se agrega temperatura y humedad, también se afectan las áreas cristalinas del gránulo de almidón (French, 1973). El rango de temperatura de gelatinización (RTG) varía con el genotipo del maíz y factores medioambientales relacionados con la producción del cultivo. El RTG del almidón del maíz normal es de 62 a 72 °C (Zinn *et al.*, 2002). Inmediatamente después de agregar humedad, durante la segunda etapa, las cadenas de almidón comienzan a aflorar fuera del gránulo, reaccionando con el agua del medio, aumentando drásticamente la viscosidad aparente de las masas y suspensiones que la contienen. Cuando se llega a la máxima viscosidad ocurre inmediatamente la tercera etapa, llamada de retrogradación, donde las cadenas se funden unas con otras.

Se ha relacionado la digestibilidad *in vitro* enzimática del almidón del sorgo del maíz, y observaron que la digestibilidad del almidón (disponibilidad) se relaciona positivamente con el porcentaje de almidón que se gelatiniza. (Zinn, 1990a; Preston *et al.*, 1993; Rodríguez *et al.*, 2001). Por lo que esta podría ser una herramienta útil para la predicción de digestibilidad del almidón.

Retrogradación.

Es la unión de las moléculas de almidón separadas durante la gelatinización (Zinn *et al.*, 2002), lo que produce la liberación de agua del gel formado. Los puentes de hidrógeno entre la amilosa y las cadenas de amilopectina son restaurados, sin embargo el almidón retrógrado no tiene la característica pseudo-cristalina del almidón nativo, ya que se genera como un pegamento que endurece las secciones afectadas del almidón; esto disminuye la porosidad de la matriz interna del almidón y limita la rehidratación y la penetración de las enzimas (Zinn *et al.*, 2002). La extensión de la retrogradación depende de diversos factores, incluyendo la fina estructura de la amilosa y amilopectina, el contenido de humedad, temperatura, la formación de complejos con lípidos y la concentración de almidón (French, 1973). Por lo tanto, la retrogradación produce una pérdida de la gelatinización o solubilidad del almidón (Zinn y Barajas, 1997). La estabilidad del almidón gelatinizado, es directamente proporcional al grado de dispersión de las moléculas de almidón pero inversamente proporcional a la concentración de amilasa (Zinn *et al.*, 2002).

Considerando que durante el hojueado al vapor se presentan los fenómenos anteriores, Ward y Galyean (1999) evaluaron la desaparición *in vitro* de materia seca (IVDMD) y la disponibilidad enzimática del almidón (liberación de glucosa). Observaron que la disponibilidad enzimática fue de 33 % para el maíz hojueado a vapor y almacenado por un tiempo y de 55% para el que fue hojueado y tomado “fresco” directamente de los rodillos. Los datos de la IVDMD fueron casi idénticos entre ambas muestras (almacenado vs. fresco), lo que sugirió que la retrogradación del almidón reflejada, por la diferencia de la disponibilidad enzimática, menor (40%) para el maíz hojueado y almacenado que el tomado de los rodillos, no tiene impacto sobre la habilidad de los microorganismos ruminales para degradar la materia seca, y presumiblemente el almidón (Ward y Galyean, 1999). Lo cual concuerda con el estudio *in vivo* realizado por Zinn y Barajas (1997) en el cual la reactividad del almidón (medida de solubilidad del almidón relacionada con la gelatinización) fue similar (26.0 % vs. 26.6 %) para el maíz hojueado fresco

(hojueado diariamente para ser ofrecido) y maíz hojueado secado al aire (secado al aire por 5 días después de procesado). Por lo que la retrogradación o pérdida de la solubilidad no aumenta por el secado posterior al hojueado, así como tampoco se alteran las características de digestión e incremento del valor nutritivo del maíz hojueado.

Digestión de los carbohidratos.

El metabolismo de los carbohidratos por los microorganismos del rumen determina la producción de ácidos grasos volátiles (AGV's) que, a su vez, proporcional del 70 al 80% de las necesidades calóricas total del animal hospedador. Como consecuencia de la eficaz degradación de los carbohidratos de la dieta por parte de los microorganismos del rumen, puede suceder que en el intestino delgado sea absorbida una cantidad insuficiente de glucosa para cubrir las demandas del animal rumiante. Por consiguiente, el proceso de gluconeogénesis resulta de suma importancia para las especies rumiantes, y el suministro de precursor de la glucosa y la velocidad con que ciertos órganos que sintetizan glucosa, pueden ser factores limitativos para la productividad total del animal e incluso para su supervivencia (Church, 1993).

La celulosa es el carbohidrato más abundante de la naturaleza, pero los granos son ampliamente utilizados en las dietas de sistemas de producción intensiva con animales altamente productivos, suministrando una cantidad apreciable de almidón para la digestión ruminal e intestinal (Ortega y Mendoza, 2003).

Degradación del almidón en rumen

En no-rumiantes, la digestión del almidón ocurre principalmente en el intestino delgado. La situación en los rumiantes es diferente debido a la acción de los microorganismos en el rumen. (Ortega y Mendoza, 2003).

La mayoría de los carbohidratos consumidos por los rumiantes son polímeros de la glucosa que aparecen en forma de celulosa o almidón. Para que se pueda llevar a cabo la fermentación de los carbohidratos, estos deben experimentar una hidrólisis en el rumen (Church, 1993).

Las principales bacterias que digieren los carbohidratos no estructurales en el rumen, son las bacterias amilolíticas y succinolíticas. La rapidez con que es hidrolizado el almidón por estas bacterias hasta formar maltosa y algo de glucosa es afectada intensamente por la fuente de almidón y el tipo de tratamiento a que haya sido sometido el alimento. Una vez que el almidón es degradado hasta maltosa, es fermentado rápidamente por microorganismos sacarolíticos (Church, 1993).

Aunque los protozoarios y los hongos participan en la digestión del almidón, la mayor parte es realizada por las bacterias ruminales (Huntington, 1997).

Una etapa inicial fundamental en la digestión bacteriana de la partícula de alimentos es la adhesión; aproximadamente, tres cuartas partes de la digestión de la fibra, proteína y almidón se lleva a cabo por las bacterias que están sujetas a las partículas del alimento (MacAllister *et al.*, 1994). Sin embargo, no todas las bacterias cuentan con todas las enzimas digestivas. Por lo tanto, la máxima digestión del almidón, requiere de la interacción entre las especies bacterianas (Huntington, 1997).

En el momento en el que el almidón ingresa al rumen, pasa por una serie de etapas fermentativas que permiten la formación de ácidos grasos volátiles (AGV's). La primera etapa es la hidrólisis de las cadenas de amilosa y amilopectina para lograr una degradación hasta sus componentes monosacáridos (glucosa); la glucosa es convertida en fructuosa 1,6-difosfato, que a su vez, mediante glucólisis, es convertida en fosfoenolpiruvato. A partir de aquí puede seguir por distintas vías.

+ A la formación de un intermediario transitorio (formato) y a la posterior producción de metano. No todo el fosfoenolpiruvato que se va a esta vía es utilizado para este propósito, ya que una pequeña porción, va a producir acetato.

+ A la producción de piruvato (la mayor parte del fosfoenolpiruvato se utiliza para esto), que a su vez se va a dirigir a distintas vías: 1) producción de butirato por medio de β -OH-butirato, 2) producción de propionato por la vía aleatoria (oxalacetato-succinato) y 3) producción de propionato por la vía reductora directa (lactato-acrilato), aunque esta última solo produce del 10 al 30% del propionato total (Rodríguez, 2010).

Cuando se presenta un aumento en el suministro del almidón fermentable, la población microbiana ruminal responde rápidamente con la producción de ácidos grasos de cadena corta, los cuales provocan una disminución del pH ruminal y con ello una pérdida de la motilidad ruminal normal, que son los principales trastornos digestivos asociados a la alimentación con dietas altas en granos (Huntington *et al.*, 2006).

La fermentación que se lleva a cabo en el rumen transforma los componentes de la dieta en productos útiles (AGV's y proteína microbiana) y productos de desecho (metano y CO₂). Dentro de los componentes de la dieta, los carbohidratos constituyen la principal fuente de energía para los microorganismos ruminales, mientras que los AGV's (productos secundarios de la digestión bacteriana) constituyen la principal fuente de energía para el animal (Rodríguez, 2010).

Existen diversas especies de bacterias presentes en el rumen que son capaces de digerir almidón. Estos organismos amilolíticos se encuentran en mayor porcentaje en la población microbiana cuando el almidón se encuentra en altas proporciones en el alimento. Las especies que participan en el ganado alimentado con dietas altas en grano son: *Bacteroides amylophilus*, *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Bacteroides ruminicola*, *Selenomona lactylitica*, *Streptococcus bovis*, *Prevotella ruminicola*, *Eubacterium ruminantium*, *Ruminobacter amylophilus*, *Ruminococcus bromii*, *Succinimonas amylolytica* y *Lactobacillus spp.* (Clarke y Bauchop, 1977; Church, 1979; Kotarski *et al.*, 1992. Citados por Ortega y Mendoza, 2003).

Los microorganismos bacterianos del rumen tienen la capacidad enzimática de degradar los enlaces glucosídicos α (1-4) y α (1-6) del almidón. Bacterias, hongos y protozoarios contribuyen a dicha degradación, aunque su contribución relativa es variable. Cuando se utilizan dietas con elevados contenidos de carbohidratos no estructurales, se incrementa rápidamente la producción de AGV's, descendiendo con ello el pH ruminal, lo que inhibe el crecimiento de hongos y protozoarios. En general, se puede atribuir la mayor actividad de degradación ruminal del almidón de las bacterias, pese a la participación de protozoarios y hongos (Huntington, 1997). Se ha reportado que los protozoarios reducen la tasa de digestión y la digestibilidad del almidón en el rumen, cambiando el sitio de digestión del almidón hacia el intestino delgado (Ortega y Mendoza *et al.*, 2003). Las hifas de los hongos pueden jugar un papel importante, erosionando la superficie de los granos de la dieta, lo que favorece el ataque microbiano (MacAllister *et al.*, 1994); hongos como el *Neocallismatix frontalis* fermentan rápidamente el almidón, mientras que los protozoarios tienen la capacidad de ingerir rápidamente carbohidratos fermentables (Huntington, 1997), con los que sintetizan sus propios polisacáridos de reserva logrando dotar al rumen de una capacidad tampón para evitar el exceso de material fermentable (Williams y Coleman, 1997).

Digestión postruminal del almidón.

Los rumiantes basan su digestión en el intestino delgado esencialmente en las mismas enzimas que los animales no rumiantes, con la única diferencia que no poseen α -amilasas salivales (Harmon, 1993).

La mayoría de los carbohidratos no estructurales presentes en el alimento son fermentados en el rumen. Sin embargo, cuando el consumo de la ración alcanza niveles elevados, pueden llegar cantidades importantes de almidón sin degradar hasta el intestino delgado (Harmon, 1993; Church, 1993).

Con el uso de sistemas de alimentación de rumiantes con dietas altas en granos se despertó el interés en la determinación de la capacidad de los rumiantes para digerir el almidón en el intestino, ya que la absorción y el metabolismo de la glucosa parece ser más eficiente energéticamente que la fermentación y la absorción de ácidos orgánicos (Huntington, 1997), esto sigue en controversia en la actualidad. El proceso que sufre el almidón desde que logra pasar el rumen y llega al intestino delgado hasta su absorción ocurre en tres fases distintas.

En la primera fase, el almidón que pasa al intestino se digiere en el lumen del duodeno a través de la acción de las α -amilasas secretadas por el páncreas; con esto se inicia la ruptura del almidón en componentes más básicos, como la maltosa, la maltotriosa, dextrinas y oligosacáridos de dos o tres moléculas de glucosa (Gray, 1992; Harmon, 1993). La secreción de la amilasa pancreática en el rumiante depende de varios factores, entre los que están: la composición de la dieta, el nivel de la ingestión, la cantidad y proporción de almidón en la ración (Van Hellen *et al.*, 1978; Russell *et al.*, 1981). Por lo tanto el papel del páncreas dentro de la digestión es de suma importancia, ya que es el encargado de proporcionar las enzimas digestivas necesarias para asegurar una completa ruptura de los sustratos en la digesta duodenal y, al mismo tiempo, neutralizar el quimo acidificado proveniente del abomaso por medio de la secreción de bicarbonato, a fin de proporcionar un ambiente óptimo para la actividad enzimática (Huntington *et al.*, 2006). Harmon

(1993) concluye que la producción y la secreción de enzimas durante la digestión del almidón en el intestino responden más a la cantidad de energía consumida por el animal que a la cantidad de almidón en la dieta.

La siguiente fase ocurre en el borde de la membrana ciliar mediante la acción de las carbohidrasas (amilasas, glucosidasas y oligosacaridasas). Las amilasas se encargan de la hidrólisis de los enlaces glucosídicos de los carbohidratos de cadena larga (almidón). Las glucosidasas actúa principalmente sobre los disacáridos como sacarosa, fructuosa, maltosa y lactosa, hidrolizándolos hasta convertirlos en compuestos simples para ser absorbidos. A diferencia de los animales no rumiantes, los rumiantes no tienen actividad de sacarasa medible y, por lo tanto, dependen de la actividad de la maltasa para producir unidades de glucosa para la absorción (Harmon, 1992). Las oligosacaridasas (maltasas e isomaltasas) se encuentran en la membrana de la mucosa intestinal y dan como producto final glucosa, la cual es absorbida por el intestino hacia el torrente sanguíneo (Huntington *et al.*, 2006).

La última fase comprende el transporte de la glucosa fuera del lumen intestinal y dentro de la circulación sanguínea. La glucosa en el lumen pasa a la sangre por el transporte activo secundario, a través de un transportador sodio-glucosa, y por difusión simple a través del espacio intercelular (Bauer *et al.*, 2001) Estos transportadores se encuentran en mayor concentración en el duodeno y van desapareciendo a lo largo del intestino delgado, por lo que la digestión del almidón se produce principalmente en la parte proximal del intestino delgado (Huntington *et al.*, 2006). Entre 5 y 20% del almidón consumido se digiere a nivel post-ruminal (Streeter *et al.*, 1989, 1990; Hill *et al.*, 1991; Zinn, 1991).

Dentro de las enzimas necesarias para la digestión del almidón, se encuentran las amilasas. La enzima α -amilasa degrada a la amilosa en maltosa y pequeños compuestos de glucosa; sin embargo, esta enzima sólo degrada parcialmente a la amilopectina y al glucógeno, debido a que no es capaz de desdoblar los enlaces

glucosídicos 1-6 encontrados en los puntos de ramificación de la cadena del polisacárido. La β -amilasa, presente en plantas y bacterias, también cumple la función de degradar los enlaces 1-4- α -glucosídicos, pero comienza su acción por el extremo libre no reductor del almidón, liberando maltosa al igual que la enzima α -amilasa; la hidrólisis se detiene en los puntos de ramificación de la amilopectina y el residuo se conoce como dextrina límite. La pululanasa o isoamilasa hidroliza los enlaces 1,6- α -glucosídicos, quitando las ramificaciones de la amilopectina o de las dextrinas. Si existe un acompañamiento general del complejo de las amilasas, se puede lograr una efectiva degradación total del almidón. Otra enzima perteneciente a esta familia es la glucoamilasa, también conocida como amiloglucosidasa, su función es actuar en la hidrólisis de cadenas de polisacáridos, operando en los enlaces 1-4- α -D-glucosa que están de manera residual después de haberse expuesto la cadena a la acción de α y β amilasas. La enzima también produce pequeñas cantidades de oligosacáridos. La acción de la enzima causa inversión de la configuración, produciendo β -glucosa (Carrera, 2003).

Con referencia al almidón que escapa a la primer porción del intestino delgado, Armstrong y Beever (1969) mencionan que el almidón que no ha sido digerido en la parte proximal del intestino será sujeto a fermentación en la parte distal, el almidón que alcanza el colon, será sujeto a degradación microbiana con la consecuente producción de ácidos grasos volátiles.

De la misma manera, Church (1993) indica que la proporción de polímero de glucosa α -ligada que puede ser fermentada en intestino grueso es normalmente muy pequeña. En ovejas que han sido alimentadas con dietas que contienen 70% aproximadamente de concentrados, por ejemplo, menos del 2% de la glucosa α -ligada digestible desaparece en ciego y colon. Sin embargo, cuando el ganado vacuno es alimentado con dietas que contiene el 80% de maíz molido, el 11.3% de α -glucano digestible desaparece en ciego y colon.

Absorción de glucosa

En general, la fermentación microbiana de carbohidratos en el rumen determina que sea muy escasa la glucosa que se absorbe directamente en el conducto gastrointestinal. Puede presentarse una excepción a esta regla cuando los animales consumen grandes cantidades de almidón que es degradado lentamente. Por consiguiente, la glucosa necesaria a nivel tisular es aportada principalmente mediante vías glucogénicas a partir de propionato, aminoácidos glicerina y lactato. A pesar de las etapas metabólicas extra que son necesarias para aportar glucosa a los tejidos, los rumiantes tienen las mismas necesidades de glucosa para su metabolismo basal que otras especies, aun cuando su nivel de glucosa en sangre (40 a 60 mg/dl) es casi la mitad que la de los animales no rumiantes (Church, 1993).

Los alimentos a base de grano, los cuales contienen altos niveles de almidón, son la mayor fuente de energía para los sistemas de producción en los rumiantes. Cuando los rumiantes son alimentados con dietas altamente concentradas, más del 40% del almidón escapa de la fermentación ruminal (Orskov, 1986). Aunque más cantidad de almidón es digerido después del rumen cuando la cantidad de consumo de almidón aumenta, la eficiencia en la digestión del almidón disminuye (Nocek y Tamminga, 1991).

Las dos rutas principales para la transferencia de glucosa desde la luz del intestino delgado al torrente sanguíneo son el transporte activo secundario y la difusión paracelular en arreglo con absorción de agua (“arrastre por disolvente”) (Rodríguez, 2010). El transporte activo secundario corresponde a un sistema en el cual, mediante una proteína integral de membrana, la glucosa es transportada del lumen intestinal hacia los enterocitos (Wright, 1993). En cambio, la difusión, corresponde a un componente menor de la absorción de glucosa a través del sistema portal (Krehbiel *et al.*, 1996).

Los transportadores de glucosa han sido identificados para una gran variedad de especies, incluidos los rumiantes (Hediger y Rhoads, 1994; Shirazi-Beechey *et al.*, 1995). La identificación del transportador sodio-glucosa que se encuentra en el intestino (SGLT1) incluye información sobre la ubicación cromosómica de los genes responsables de su síntesis, su estructura primaria y conformación de la membrana del borde en cepillo, además de los mecanismos por los cuales es capaz de transportar una molécula de glucosa y dos $+Na$ en cada uno de sus ciclos (Huntington, 1997). Se han realizado estimaciones de la capacidad de transporte de la SGLT1, las cuales van desde 50 hasta más de 200 ciclos por segundo (Hediger y Rhoads, 1994; Ferraris *et al.*, 1989). La densidad de SGLT1 está en función de la superficie de las vellosidades intestinales y la ubicación dentro del intestino delgado. La mayor densidad de los transportadores, está en la porción proximal del intestino, con aproximadamente 50%, y la menor densidad se encuentra en la porción distal del intestino (Ferraris *et al.*, 1989). La capacidad de transportar activamente la glucosa se puede duplicar en un plazo de 2 a 4 días (Huntington, 1997).

Factores que afectan la digestibilidad del almidón.

La digestibilidad del almidón es afectada por la composición y forma física del almidón, las interacciones de proteína-almidón, la integridad celular de las unidades que contienen almidón, el nivel de consumo, factores antinutricionales, alteraciones químicas del alimento (grado de hidratación y gelatinización), la forma física del alimento (procesamiento de granos, masticado) y el grado de adaptación de la microbiota ruminal (Thorne *et al.*, 1983; Dreher *et al.*, 1984; Huntington, 1997). La cocción, generalmente mejora la digestibilidad de los almidones que normalmente son pobremente digeridos, en el amilomaíz esto no sucede ya que es poco digestible tanto en su forma cruda como cocinada, mientras el almidón de las variedades waxy (céreas) de los granos están entre las más digestibles, por lo tanto, se dice que la digestibilidad del almidón es inversamente proporcional al contenido de amilosa (Rooney y Pflugfelder, 1986).

El alterar el consumo mediante técnicas de administración del alimento (Loerch, 1990; Pritchard, 1995) o mediante el uso de aditivos como los ionóforos (Zinn, 1987; Burrin *et al.*, 1988; Stock *et al.*, 1990; Zinn y Borques, 1993), puede afectar la digestión del almidón (Huntington, 1997). La aplicación de factores que modifican la estructura microscópica del grano, como el calor, la temperatura, tiempo y presión, es muy utilizado para aumentar la digestión del almidón de aquellos granos que de manera natural son digeridos pobremente (Owen y Goetsch, 1986).

Factores Antinutricionales.

Existen diversas sustancias contenidas en los alimentos que pueden provocar una modificación en la digestibilidad del almidón, los efectos más comunes que ocasionan dichas sustancias son la inhibición enzimática (fitatos, lectinas y taninos) (Dreher *et al.*, 1984) y alteraciones en el metabolismo animal (isoflavonas y cianuros) (Church, 1993). El problema con estas sustancias secundarias estriba en que son componentes de ciertos alimentos y forrajes (Van Soest, 1982).

Por ejemplo, los taninos presentes en el sorgo café (resistente a las aves), en las leguminosas, hojas de árboles y en ciertos productos residuales de la agricultura (Kumar, 1984), se unen a las proteínas e inhiben algunos sistemas enzimáticos lo que reduce sustancialmente la digestión de los almidones (Hahn *et al.*, 1984; Church, 1993). Los taninos además reducen la permeabilidad de la pared intestinal al reaccionar con la capa celular externa del intestino de forma que disminuye el paso de nutrientes a través de la pared intestinal (Mitjavila *et al.*, 1977).

Como ya se mencionó anteriormente, existen además, otros factores como el tipo de maíz que influyen en la digestión del almidón, por ejemplo, en variedades de maíz más vítreos, el encapsulamiento de los gránulos de almidón dentro de una matriz ya sea de proteína o de fibra demora o retarda la digestión, sin embargo, las restricciones asociadas con la vidriosidad son removidas ampliamente por la fermentación o por el procesamiento (Corona, 2006; Owens, 2005)

Tipo y Nivel de Forraje.

El forraje en las dietas es importante ya que por sus características físico-químicas permite a los animales incrementar el flujo de saliva (amortiguador del pH) al rumen durante el masticado del alimento lo que permite a su vez incrementar el mezclado del contenido ruminal y el tiempo de rumia. Para estas funciones en específico, un forraje de baja digestibilidad (rastrojo de maíz, paja, etc.) tienen en consecuencia un valor igual a la alfalfa de alta calidad y al ensilado de maíz en la dietas altas en concentrado.

Sobre esta base, un alimento con una FDN (Fibra Detergente Neutra) efectiva a bajo costo es deseable como criterio económico (Owens, 2010). Sin embargo, un aporte adicional de FDN por encima de las necesidades para prevenir un problema de acidosis puede disminuir el consumo tanto del alimento como de la energía neta en las dietas altas en concentrado (Defoor *et al.* 2002; Owens *et al.*, 2002), esto debido probablemente al incremento del pH ruminal, o al cambio en el sitio de digestión de rumen a intestino.

El procesado del maíz altera el tipo y nivel ideal de forraje a utilizar en las dietas para bovinos de engorda. Se debe considerar el costo relativo de la energía que proviene de los forrajes cuando estos se comparan con los concentrados para determinar cuánto forraje debe ser incluido. Por ejemplo en el caso del maíz entero, en el maíz rolado en seco, la cebada y la avena que poseen características fibrosas, una menor cantidad de FDN proveniente del forraje debe ser añadido a las dietas que cuando estas contienen granos menos fibrosos o cuando dichos granos están adecuadamente procesados (Owens, 2010).

Por otra parte, para reducir la separación del forraje y el grano durante el mezclado del alimento o para evitar la selección por parte del ganado, el forraje

debe contener una partícula pequeña y esta debe ser adherente (por si misma o por algún otro ingrediente de la dieta). Desgraciadamente al reducir el tamaño de partícula también se reduce la efectividad de la FDN en el forraje, además de que una separación del forraje y el concentrado a nivel del rumen también puede ocurrir. De hecho, para estimular la rumia entre los alimentos, una tasa baja en la digestión de FDN debe preferirse en las dietas altas en concentrado. Otro factor a considerar en las dietas con granos altamente procesados es que al provocar estos una disminución en el pH ruminal, a su vez ocasiona una baja en la digestibilidad de la fibra detergente ácida (FDA, que es equivalente a celulosa más lignina). Esto supuestamente causa un efecto negativo en las raciones totalmente mezcladas, disminuyendo el consumo, la digestibilidad y la eficiencia del alimento cuando se compara con dietas bajas en concentrado o altas en forraje. Por lo tanto, ya que un pH ruminal bajo disminuye la digestibilidad de la FDA más que para la FDN (hemicelulosa más FDN), un óptimo nivel en la relación de FDN:FDA debe ser diferente conforme al procesamiento del grano. Con granos altamente procesados en la dieta, una baja relación FDA:FDN debe ser preferido al contrario que cuando se usan granos enteros o rolados en seco, forrajes con una alta relación de FDA:FDN pueden ser más tolerados ya que la digestión de la celulosa se reducirá menos. La relación de FDA:FDN incrementa con la madurez de los pastos y las leguminosas (Owens, 2010).

Nivel de consumo.

Rusell *et al.*, (1981) mencionan que un incremento en el nivel de consumo de granos en la dieta para ganado puede incrementar la digestión de almidón a nivel ruminal.

El tiempo de permanencia de las partículas de alimento en el rumen, es uno de los factores determinantes en el nivel de utilización de los granos (Ortega y Mendoza, 2003) y se puede ver afectado fundamentalmente por el nivel de ingestión

y por la relación forraje/concentrado de la dieta. Al incrementar el plano de la alimentación, aumenta la tasa de renovación del contenido ruminal y, por consiguiente, disminuye el tiempo de permanencia en el rumen. Se ha observado que un incremento en el plano de la alimentación de una a dos veces el nivel de mantenimiento, cuando se administra forraje granulado a ovejas, supone un ritmo fraccional de paso de las partículas de suplemento proteínico en el rumen de 2.2 a 3.1% por hora, y un incremento en la fracción de paja de 6 a 23% en dietas concentradas ofrecidas a corderos en cebo intensivo representa un incremento del ritmo fraccionado de paso de 4.8 a 7.9% por hora, debido probablemente a la mayor salivación y motilidad ruminal provocada por el incremento de la proporción de la paja en la dieta (Castrillo *et al.*, 1992).

En teoría, la máxima eficiencia en relación a la nutrición, se alcanza cuando el consumo del alimento está al máximo, asumiendo que la energía de mantenimiento está cubierta y que la energía que sobre pasa al mantenimiento se usará para propósitos productivos (por ejemplo crecimiento, lactación, reproducción, engorde, etc.) (Lofgreen y Garret, 1968). Sin embargo, algunas publicaciones sugieren que restricciones moderadas en el consumo de materia seca pueden permitir mejoras en la eficiencia alimenticia en el ganado adulto (Plegge, 1987; Hicks *et al.*, 1990) y en los ovinos (Glimp *et al.*, 1989). Evidencia directa de la razón por la que la eficiencia alimenticia es mejorada al restringir el consumo de alimento no ha sido reportada. Las posibles explicaciones son 1) reducción del tamaño del hígado y de los gastos de energía de mantenimiento, 2) reducción de la actividad física permitiendo la reducción de los requerimientos de energía, 3) incremento en la digestibilidad del alimento con disminución del consumo y 4) reducción del desperdicio alimenticio (Hicks *et al.*, 1990). Por ejemplo, Pethes *et al.*, (1985) observaron disminución en el gasto de la energía de mantenimiento al reducir el consumo de alimento en el ganado lechero, indicado por la disminución en la concentración de la triiodotironina (T3). En el ganado de engorda esto resultaría en una mayor cantidad de energía disponible para el crecimiento que lo que se puede predecir por el sistema de energía neta (EN) (Murphy y Loerch, 1994).

En un estudio publicado en 1994, Murphy y Loerch concluyeron que el restringir el consumo de alimento a novillos en crecimiento y finalización, no disminuía la eficiencia alimenticia y de hecho la podía incrementar. Concluyeron además, que al restringir el consumo de alimento se había reducido la energía de mantenimiento y se había incrementado el tejido magro en relación al total de la ganancia.

La forma de presentación de la ración, el estado fisiológico y la temperatura ambiente son otros factores que modifican el tiempo de permanencia del alimento en el rumen. La digestión del alimento en el rumen depende, básicamente, de la tasa de degradación de los mismos y a la velocidad con que abandonan el rumen (tasa de paso). El ritmo de degradación de los alimentos está condicionado por sus propias características (composición química, tamaño de partícula, procesado previo, entre otros), así como por el ambiente ruminal con el que se degradan (pH, flora microbiana, concentración de amoníaco, entre otros). El ritmo de paso de la digesta depende de numerosos factores, algunos de ellos relacionados con el animal y su medio ambiente (especie animal, estado fisiológico, temperatura ambiente, etc.) y otros relacionados con el propio alimento (forma física de la ración, proporción forraje/concentrado, etc.). Uno de los factores que afecta más claramente al ritmo de paso de la digesta a través del tracto digestivo es el nivel de ingestión (Carro *et al.*, 2000).

Características inherentes del animal.

Las características inherentes más importantes a considerar en cuanto a la digestibilidad del almidón, son las que corresponden a la diferencia entre razas y el propósito productivo (carne o leche) del ganado.

“Por ejemplo, los novillos Holstein, tienen consumos excesivos de alimento. En algunos corrales se observan consumos mayores a 15 kg por cabeza al día, lo cual

es demasiado. Se necesita “quemar” a los Holstein desde el inicio de la engorda al inicio de la engorda o ellos te comerán a ti y a tu casa” (Comentarios de productores estadounidenses recopilados en Owens, 2010). Información proveniente de Hicks, *et al.*, (1990) indica que los novillos Holstein puede comer hasta 2.4 libras más alimento por día que los novillos típicos cruzados, por lo que consumos demasiado elevados pueden esperarse en los novillos Holstein. Con consumos altos de alimento y tasas de pasaje altas, la digestibilidad del almidón a partir de consumo en dietas a base de maíz quebrado en seco o maíz entero será menor y para alcanzar energía suficiente para una tasa de producción alta, el ganado deberá comer más alimento. En consecuencia, el beneficio de un procesamiento exhaustivo en el grano como el hojueleado o la conservación en alta humedad será más significativo para los novillos Holstein que para un típico ganado cruzado. La probabilidad de desórdenes digestivos es proporcional al número de días en alimentación, por lo que en un sistema en el que se alimente durante bastantes días como en el caso de los Holstein es más probable encontrar este tipo de problemas. Cuidados especiales para evitar la acidosis y mantener la pared ruminal sana, alimentando con dietas altas en forraje, probablemente tendrán un mayor beneficio económico en los periodos largos de alimentación utilizados en los novillos Holstein, que en los periodos cortos utilizados para los novillos cruzados (Owens, 2010).

Los Holstein tienen una eficiencia alimenticia pobre. Basados en una prueba de sacrificio, los novillos Holstein necesitaron 23% más alimento que los novillos Hereford para mantener la energía corporal (Garrett, 1971). Otros estimados indican que los requerimientos de energía de mantenimiento son de 7 a 20% más altos para los novillos Holstein o Frisones que para los novillos Angus o Hereford. El NRC (1996) estima que la energía de mantenimiento estimada para los Holstein, es 13% superior (Lo mismo que para los Jersey y los Simmental) que para el ganado Angus o Hereford. Algunas de estas diferencias están asociadas a una actividad física más alta. Pero más probablemente, los requerimientos de mantenimiento están correlacionados con el potencial genético para el crecimiento y producción de

leche (y tal vez a la masa relativa de energía de mantenimiento que requieren los órganos internos, incluidos el hígado y del tracto digestivo). Además, los novillos Holstein tienden a depositar más grasa alrededor de los intestinos y menos a nivel subcutáneo comparado con los novillos cruzados. La deposición de grasa en los intestinos se incrementa con la absorción de glucosa a través del intestino delgado. Por lo tanto, los métodos de procesamiento que disminuyen la absorción de glucosa a nivel intestinal serán preferidos para los novillos Holstein (se preferirá al maíz de alta humedad que al maíz hojueado al vapor) (Owens, 2010).

En cuanto a la variante productiva, la diferencia entre el ganado con propósito de carne y el ganado con propósito lechero, Owens (2005) menciona diferencias a nivel de digestibilidad del almidón en el tubo digestivo total y en los diferentes sitios a través del tracto entero (ruminal y postruminal). La digestibilidad del tubo digestivo total del almidón se encuentra entre el rango del 90 al 96% para el ganado lechero y del 87 al 99 % para el ganado de carne (Cuadro 2). Con el grano siendo el 70% de almidón, las diferencias en los valores económicos correspondientes a la alimentación debidas al procesamiento a partir solamente del almidón, son del 4% para el ganado lechero y del 9% para el ganado de carne. Esto debe compensarse contra los costos y el manejo que representan el procesamiento del grano. El grado de fermentación ruminal del almidón para el maíz es más bajo para el ganado lechero que para el ganado de carne, esto puede ser atribuido a las tasas de pasaje más rápidas que se asocian a altos consumos de alimento o a un mayor (500%) tamaño en la apertura del orificio retículo-omasal (Welch, 1982; 1986) esto permite que partículas de maíz más grandes, densas y menos digeridas fluyan desde el rumen. Pero a nivel postruminal, la desaparición del almidón es muy similar para el ganado lechero y para el ganado de engorda, indicando que probablemente factores similares afecten a la digestibilidad del almidón después del rumen a ambos tipos de ganado.

Cuadro 2. Influencia del tipo animal en el sitio y extensión de la digestión en el almidón. (Adaptado de Owens, 2005).

Clase de animal	Vacas en lactancia	Ganado engordado en corral	Error Estándar de la Media (EEM)	Probabilidad (P<)
Digestión del almidón en Rumen, % de la ingesta	58.48	75.34	2.37	0.01
Desaparición postruminal, % del ingreso	80.90	79.71	2.89	0.66
Fracción del almidón digerida en el rumen, % del total.	63.43	79.56	2.54	0.01
Digestión total en el tracto, % de la ingesta	92.45	94.55	0.96	0.02
Digestión del almidón en l. delgado, % del ingreso	63.26	78.77	12.26	0.07
Digestión del almidón en l. delgado, % de la ingesta	25.75	21.85	5.46	0.31
Digestión del almidón en rumen en l. delgado, % de ingesta	88.06	92.17	1.95	0.31
Digestión del almidón en l. grueso % del ingreso	35.40	41.25	13.24	0.53
Digestión del almidón en l. grueso % de la ingesta	3.58	5.47	3.16	0.40

Interacciones almidón-proteína.

La matriz de proteína que rodea a los gránulos de almidón en el endospermo es el principal responsable de las diferencias en la digestión en los granos (Kotarski *et al.*, 1992; McAllister *et al.*, 1993)

La interacción del almidón con las proteínas puede reducir significativamente su susceptibilidad a la acción de las bacterias y enzimas hidrolíticas, esto se debe a la insolubilidad de la mayoría de las proteínas que están contenidas en el endospermo, además de la manera como se entrelazan con los gránulos de almidón, con lo que aumenta la dificultad para digerirlos (Wall y Ross., 1970). Las proteínas muestran una distribución poco o nada uniforme, lo cual provoca la formación de placas densas alrededor de los gránulos de almidón, por lo tanto la matriz como los cuerpos de proteína no pueden ser atacados por las proteasas y se dificulta la exposición del almidón a la acción de las amilasas.

La interacción con proteínas, puede reducir la susceptibilidad del almidón intacto y procesado a la hidrólisis enzimática. Ya que los gránulos del almidón pueden estar completamente embebidos en una matriz proteica, como sucede en el endospermo cristalino y periférico del maíz por lo que la actividad de las enzimas amilolíticas se ve restringida proporcionando así la naturaleza de cristalinidad o dureza al grano. Por el contrario, en el endospermo harinoso los gránulos de almidón, están más accesibles a las bacterias del rumen, debido a que están incluidos en una matriz proteica discontinua (Kotarski *et al.*, 1992; Philippeau *et al.*, 1999a).

Los gránulos de almidón en el endospermo harinoso o suave del maíz tienen poros sobre su superficie, como cáscara de naranja; en contraste a las esferas comprimidas de almidón en el endospermo vítreo o duro, además son paquetes densos y unidos por zeínas solubles en alcohol, no tienen poros para la entrada de

enzimas (Dombrink-Kurtzman y Knutson, 1997). Sin embargo, como se mencionó la principal barrera para la digestión del almidón intacto parece ser la matriz proteica que encapsula los gránulos de almidón.

La matriz proteica en el trigo consiste en mayor medida de glutelinas solubles en ácidos y bases débiles y son rápidamente degradadas en el rumen. Por lo que el grado de digestión del almidón del trigo es alta (>80%) y no es incrementada por el hojueado al vapor (Zinn, 1994). En contraste, la dureza del endospermo del maíz, que está relacionada con su composición química, presenta un endospermo córneo que contiene gránulos de almidón compactos de forma poligonal con abundante matriz proteica directamente asociada, mientras que en el endospermo blando los gránulos son más grandes y menos agregados. La matriz proteica del maíz está compuesta principalmente de la prolamina, zeína, que es una proteína de almacenamiento soluble en alcohol y que representan 50% o más del total de proteína del endospermo del maíz, aunque los granos con el gen mutado o2, tienen menos de 50 % de zeína. La zeína puede ser dividida en varias clases estructuralmente distintas: alfa, beta, gama y delta (Pratt *et al.*, 1995, Robutti, *et al.*, 1997). Aunque las proteínas zeínas son solubles en alcohol, estas son insolubles dentro del medio ruminal. Por lo que las proteínas zeínas son fermentadas lentamente en el rumen (proteína no degradable en rumen igual a 57 %) (NRC, 1996).

Se ha demostrado que la proteína del maíz y sorgo es más resistente al ataque y penetración bacteriana que la del trigo y cebada (McAllister *et al.*, 1994). El tratamiento con una enzima proteolítica (pronasa) del sorgo mejoró la tasa de hidrólisis del almidón (Kotarski *et al.*, 1992) y esto fue debido a que las enzimas que degradan almidón fueron más efectivas una vez que la matriz proteica estaba desdoblada. McAllister *et al.* (1993) observaron que la digestión del almidón aislado de maíz y cebada es similar, aunque el grano de cebada es más degradado que el de maíz, lo que sugiere que los componentes estructurales del endospermo, que

incluye la matriz proteica de zeína que está envolviendo los gránulos de almidón, son el factor más importante en la tasa y grado de digestión del almidón de maíz, más que las propiedades del gránulo.

Corona *et al.*, 2006, observaron que cuando se procesan variedades de maíz con alto contenido en endospermo duro, mediante hojueleado al vapor, se mejora la digestión del almidón en comparación con el rolado en seco.

Interacciones entre almidón y proteína pueden continuar después de que el grano fue procesado como también hay evidencia de que almidón gelatinizado puede formar complejos con proteína (Thorne *et al.*, 1983). Joy *et al.* (1997) observaron que la degradación de nitrógeno alimenticio en el rumen fue más bajo para maíz hojueleado al vapor (0.39 kg/L) que para maíz rolado en seco. Esto puede ser debido a la formación de complejos almidón y proteína. Ciertos lípidos pueden producir complejos con amilosa en almidón intacto y gelatinizado, pero el efecto sobre la digestibilidad se desconoce (May *et al.*, 2008).

No solo la interacción del almidón y la proteína en el mismo grano influyen en la digestibilidad, si no que la presencia de proteína dietaria tiene injerencia en la digestibilidad del almidón en general. El conocimiento de los mecanismos específicos que regulan la secreción de la amilasa por el páncreas es importante. Se ha encontrado que la presencia de glucosa o almidón hidrolizado en el intestino delgado disminuye la secreción de amilasa en el ganado (Swanson *et al.*, 2002) así como la actividad enzimática (Kreikemeier *et al.*, 1990). La secreción pancreática está regulada por hormonas gastrointestinales. Kreikemeier *et al.* (1990) reportaron un incremento en la actividad amilolítica cuando un alimento alto en proteína a base de heno de alfalfa fue alimentado versus una dieta alta en grano, con una cantidad similar de energía. Esto podría estar relacionado con la estimulación del páncreas por el péptido liberador de colecistoquinina sensible a proteasas debido a la presencia de proteína en el intestino. (Fushiki *et al.* 1989). El efecto estimulador de

la proteína en la secreción de la amilasa pancreática se ha demostrado en no rumiantes. Johnson *et al.* (1977) alimentaron con una alta cantidad de carbohidratos a ratas, observando que la síntesis de la amilasa fue estimulada solamente por la presencia de proteínas de alta calidad. Es posible que la secreción pancreática en rumiantes esté mediada por un péptido monitor en una forma similar que la descrita por Fushiki e Iwai (1989) y Fushiki *et al.* (1989). Resultados de Kreikemeier *et al.* (1990) sugieren que la cantidad de proteína en la dieta podría jugar un rol importante en la digestión de almidón en intestino delgado. Mendoza *et al.* (1993) observó una respuesta lineal en el almidón digerido en el intestino delgado como respuesta a una infusión duodenal de caseína.

Grado y tipo de procesamiento del grano.

El procesamiento de los cereales se realiza con el fin de aumentar la velocidad y el grado de digestión del almidón. Generalmente, los granos se quiebran, muelen o se rolan al vapor para romper la estructura del pericarpio y desdoblar la matriz proteica que envuelve al almidón (McAllister *et al.*, 1990) y con ello facilitar el acceso de los microorganismos a los nutrientes que se encuentren en el endospermo del grano. El tamaño de partícula, determina en gran medida la cantidad de almidón expuesto a la digestión por las enzimas microbianas y, por lo tanto, la producción de ácidos orgánicos y mucopolisacáridos es más acelerada, lo que lleva a una disminución de pH (Cheng *et. al.*, 1998). Algunos métodos de procesamiento pueden llegar a ser muy costosos, como el hojueado al vapor y el micronizado, debido que implican la aplicación de calor a los granos de cereales y la gelatinización del almidón (Evers y Stevens, 1985). Más allá del molido o quebrado, la gelatinización aumenta la accesibilidad de las enzimas microbianas al almidón, de modo que la tasa de digestión a nivel ruminal del almidón del sorgo hojueado al vapor es aproximadamente tres veces mayor que el del sorgo molido (Theurer, 1986) y hasta un 10% más alta en el maíz hojueado al vapor comparado con otros procesamientos del maíz (Zinn *et al.*, 2011). La mayoría de los autores coinciden

en que la gelatinización del almidón tiene una cinética de orden de cero en los primeros minutos y de primer orden durante el resto de la reacción. En cambio el calor, seco puede formar complejos entre el almidón y proteína, que frenan el ritmo de la digestión en el rumen (Rodríguez, 2010).

Aunque los granos pueden ser procesados para poderlos mezclar con otros ingredientes y reducir la separación de los componentes de la dieta durante su preparación y en el comedero, la principal razón para procesar los granos es para incrementar su valor nutricional (Owens, 2010), incrementando la digestibilidad de la energía proveniente del almidón, así como la digestibilidad de la mayoría de los nutrientes presentes en el grano (Zinn *et al.*, 2002). El valor alimenticio de los granos de cereal está determinado por su contenido nutricional, características físicas y químicas que afectan su digestibilidad, aceptabilidad e interacciones asociativas con el proceso digestivo. Los métodos de procesamiento son seleccionados para lograr la mejor digestibilidad y aceptabilidad sin afectar el pH ruminal y causar problemas digestivos. Así por ejemplo, El uso de maíz hojueado al vapor comparado con procesos en seco incrementa 18 % el valor energético de las dietas en finalización para bovinos. (Zinn *et al.*, 2002). El resultado de la aplicación de estos procesos son granos quebrados o molidos en seco, de alta humedad, reconstituidos y granos rolados con vapor u hojueados (Theurer, 1986).

-Maíz quebrado y molido en seco.

El grano es molido o quebrado para formar grano quebrado o molido en seco (sin adición de humedad), el molido es el método más común de procesamiento, debido a que es el más económico y simple. Hay una gran variedad de equipos disponibles para controlar el tamaño de la partícula del producto terminado. El molino de martillos es uno de los equipos más utilizados en donde el tamaño de la partícula es controlado por cambio en la criba, sin embargo el producto terminado genera más polvo durante la molienda que el molino de rodillos u otro tipo de equipo para moler (May, 2008)

Diferentes pruebas han señalado que un molido grueso es preferible para rumiantes, además de que el molido fino puede predisponer a acidosis. El proceso de quebrado o rolado consiste en que el grano es pasado a través de un juego de rodillos acanalados. El tamaño de partícula varía de grueso a fino influenciado por el peso de los rodillos, presión y espacio, contenido de humedad y velocidad de flujo del grano. (Kellens y Church, 2001; Secrist *et al.*, 1995; Secrist *et al.*, 1996).

El grano quebrado o molido puede ser fermentado si contiene la cantidad adecuada de humedad (de 24 a 35 %) (Owens y Zinn, 2005). El grano de maíz puede ser molido finamente para maximizar la digestión en tubo digestivo total, ya que las partículas que son grandes e hidrofóbicas resisten al ataque microbiano en el rumen y al enzimático en el intestino (Orskov, 1986; Owens *et al.*, 1997).

Aunque el molido fino puede incrementar el grado de digestión del almidón, principalmente debido a un incremento en la desaparición del almidón en el rumen, el almidón de maíz quebrado que sale del rumen se ha observado que es pobremente digerido en el intestino delgado y puede ser fermentado en el intestino grueso. Debido a que partículas de almidón muy finas son fermentadas muy rápidamente en el rumen y pueden causar acidosis, el molido fino es evitado en dietas ricas en almidón para rumiantes. Sin embargo, si suficiente forraje es incluido en la dieta para prevenir la acidosis y el ganado alimentado con frecuencia con una dieta integral, es improbable que el molido a un tamaño de partícula fino cause acidosis y además mejorará la digestibilidad del almidón y eficiencia alimenticia (Elizalde *et al.*, 1999). Comparado con grano quebrado, el grano molido, típicamente tiene mayor rango en el tamaño de partícula debido a los finos generados durante el molido. En observaciones de campo donde dietas compuestas por maíz entero descascarado y bajas en forraje se ofrecieron a novillos para que el grano fuera retenido en el rumen para ser rumiado y fermentado, a menudo se obtuvo una mejor eficiencia alimenticia en comparación a dietas de maíz rolado que de manera general son ofrecidas con un nivel mayor de forraje. Aunque la adición de forraje

usualmente acorta el tiempo en que las partículas son retenidas para la fermentación dentro del rumen, el grado de separación ruminal de las partículas de forraje del grano entero puede ser importante, los granos separados en el rumen no serán rumiados; e incluso el grano de maíz entero intacto no será digerido en ningún sitio. (Owens y Zinn, 2005). Sin embargo, comparando con maíz entero, en dietas donde es utilizado maíz rolado puede existir una falta de respuesta en la digestibilidad de las dietas y en el comportamiento productivo de los animales en los cuales es usado este tipo de procesamiento (Bengochea *et al.*, 2005; Gorocica-Buenfil y Loerch, 2005). Aunque ambos procesos provocan la ruptura del grano y la reducción del tamaño de partículas, con lo que se logra aumentar el área de superficie que está expuesta a la acción de enzimas digestivas, el grado de procesamiento que sufren no es suficiente para desdoblar la matriz proteínica, (Zinn *et al.*, 2002; Corona *et al.*, 2005).

-Maíz hojueleado al vapor.

En este tipo de procesamiento, el grano entero y seco, es humedecido con vapor con una atmósfera de presión por 10-30 minutos, con la finalidad de aumentar el contenido de humedad de 18 a 20%, posteriormente es aplastado entre dos rodillos corrugados. La diferencia entre un grano hojueleado y uno rolado con vapor está en el grado de procesamiento, al rolado se le aplica vapor por periodos más cortos de tiempo, la hojuela es más gruesa y el almidón está menos gelatinizado (Kellens y Church, 2001). En cambio, con menos espacio entre los rodillos, el hojueleado llega a ser más delgado, y con un mayor tiempo de vaporizado antes del hojueleado, la hojuela llega a ser más flexible y menos susceptible a la ruptura; La dureza, la delgadez (densidad) y la consistencia de la hojuela son los factores más importantes a considerar en este procesamiento (Karr, 1984). Típicamente, la densidad de la hojuela (peso bushel o kg/L) es usada como un indicador funcional para la elaboración del maíz hojueleado al vapor, otros indicadores incluyen el grado de gelatinización del almidón (medición microscópica) y la tasa de digestión por enzimas de origen animal o de levaduras (Xiong *et al.*, 1990; Zinn, 1990a).

Como ya se ha mencionado anteriormente, entre mayor gelatinización y menor interacción de la matriz proteica con el almidón, la digestibilidad y valor nutricional del maíz en consecuencia se verá incrementado. Esto se consigue con el maíz hojueado al vapor, variando el grado de gelatinización y desnaturalización de la proteína en el grano hojueado con las condiciones de procesamiento. Existen cinco factores el proceso que afectan la calidad de la hojuela: 1) la temperatura de la cámara de vapor, 2) tiempo de cocimiento, 3) corrugación de los rodillos, 4) separación de los rodillos y 5) tensión de los rodillos (Zinn, *et al.*, 2002).

El hojueado presenta un efecto consistente de incremento en la digestibilidad del almidón y el valor alimenticio del sorgo y del maíz cuando se compara con el grano entero, el quebrado en seco o el molido (Zinn 1990a; Zinn *et al.*, 1998; Barajas y Zinn, 1998; Theurer *et al.*, 1999; Zinn *et al.*, 2002; Corona *et al.*, 2006). El marcado incremento observado de la digestión postruminal de almidón debido al hojueado del maíz ($53 \pm 26\%$) está asociado con el incremento ($13 \pm 6\%$) en la digestibilidad del N postruminal. El hojueado del maíz también puede ejercer un efecto positivo sobre la fermentación de la fibra, incrementando el potencial de fermentación postruminal, ya que al disminuir la cantidad de almidón que llega al intestino grueso, se mantiene el pH adecuado para que se lleve a cabo la fermentación microbiana de la FDN y la fibra detergente ácida (FDA), ya que mientras más almidón llegue al intestino grueso el pH se reduce por debajo del óptimo para que se lleve a cabo la fermentación bacteriana (Zinn *et al.*, 2002).

+Densidad de la hojuela (Procesamiento óptimo).

Como menciona Zinn y su equipo de trabajo (2002), el grado de daño del almidón y el grado de la desnaturalización de la proteína en la hojuela del grano varía con las condiciones del procesado.

El grosor de la hojuela (mm, tomado como el promedio de 10 hojuelas tomadas al azar), la densidad de la hojuela (kg/L), la solubilidad del almidón (glucosa liberada durante la exposición a las enzimas amilolíticas o reactividad del almidón a la amiloglucosidasa) y la reactividad enzimática (reactividad del almidón a la pancreatina porcina y a la amilasa) son usados como control de calidad durante el hojueleado, siendo las dos primeras las más comunes, prácticas y útiles en su aplicación. Una ventaja de la medición del grosor de la hojuela, es que esta es independiente del tiempo, de la condición y de la localización (por ejemplo después del procesado, en el comedero o en una muestra del alimento ya mezclado). Otra medición importante como lo es la densidad de la hojuela, cambiará con la frescura de dicha hojuela, en la medición en la cubeta de pesaje, por pérdidas de humedad y por la abrasión al manejar el maíz procesado, pero en cambio el grosor de la hojuela permanecerá constante. La relación entre el grosor de la hojuela (GH, mm) y la densidad de la hojuela (DH, kg/L) es moderadamente cercana ($r^2=0.74$; $DH=0.042 + 0.14GH$), ya que la densidad de la hojuela puede cambiar con el grado de finos presentes en el hojueleado. (Zinn, 1990b).

Owens (2010) hace una comparativa entre diferentes densidades de hojuela y su impacto en la digestibilidad del almidón a nivel ruminal (Figura 7). De los trabajos mostrados en dicha figura, excepto uno de los 17, en el cual se muestran experimentos con diferentes densidades del maíz al vapor (peso bushel) manifestó que a menor densidad mayor incremento en la digestibilidad ruminal.

Este incremento en la digestión ruminal con hojuelas de menor densidad y menor grosor fue paralelo con un incremento en la digestibilidad tanto a nivel intestinal como a nivel de tubo digestivo total. La digestión del tubo digestivo total supera el 95% con densidades de hojueado menores a 30 libras por bushel (0.39 kg/L) (Owens, 2010).

Un hojueado adecuado incrementará los valores de energía neta de mantenimiento (ENm) y de ganancia (ENg) del grano de maíz normal en 15 y 18% respectivamente (Zinn *et al.*, 2002). Zinn (1990b) demostró que cuando el grano de maíz fue cocido a un tiempo constante (34 min. a 105 °C), el incremento en la presión de los rodillos produjo hojuelas con densidades de 0.41, 0.36 y 0.31 kg/L (32, 28 y 24 lb/bushel, respectivamente) y el grado de digestión del almidón se incrementó linealmente en el rumen y tubo digestivo total. La densidad de la hojuela debe ser ajustada para lograr una digestibilidad de almidón de 99% (típicamente menos de 4% de almidón fecal). Pero también se ha observado que una hojuela muy poco densa ocasiona baja de consumo en los animales, posiblemente debido a la alta tasa de producción de ácidos en el rumen o a la concentración de ácido en dicho órgano, por lo que la gelatinización del almidón a más del 50% se debe evitar para reducir este problema. Por lo tanto si el almidón proveniente del abomaso pudiera ser digerido en el intestino delgado, y si la absorción de glucosa pudiera ser más eficiente que la absorción de ácidos grasos volátiles, una óptima eficiencia energética sería alcanzada a una densidad de hojuela muy baja, necesaria para alcanzar hasta un 100% de digestibilidad a nivel de tubo digestivo total (Owens, 2010). Zinn *et al.* (2002) señalan que es importante que al momento del hojueado, los rodillos así como los granos, se encuentren bien calientes, que la cámara de vapor debe estar preparada para un tiempo de cocimiento de al menos 30 min a su capacidad máxima para producir hojuelas de 0.31 kg/L (24 lb/bushel) y cuando menos haya un 5% de captación de humedad durante el cocimiento.

Sin embargo, Sind *et al.* (2006a, b) concluyeron en un experimento que no hay mejora en la digestibilidad en las dietas a base de maíz hojueleado al vapor, ni se mejoró el desempeño productivo con densidades menores a 0.36 kg/L y que la durabilidad de la hojuela puede ser mejorada por incremento de la humedad en el grano, incremento del tiempo de la aplicación de vapor, la aplicación de un surfactante o la disminución de la densidad de la misma. Siendo la densidad de la hojuela el medio más efectivo para alterar la disponibilidad del almidón si existe una adecuada cantidad de calor y humedad. También hace la observación que la aplicación de humedad mientras se lleva a cabo el enfriado del grano justo después del hojueleado es una medida efectiva para agregar humedad al grano y por tanto disminuir los largos periodo de vaporización, sin embargo un nivel elevado de humedad puede provocar el detrimento de comportamiento productivo. Además en un trabajo realizado por Plasencia *et al.* (2011), observaron que al disminuir la densidad de la hojuela del maíz blanco 0.36 a 0.31 kg/L (28 a 24 lb/bushel), no hubo ningún efecto en sitio y extensión de digestión en almidón. Por lo tanto, al confirmar diferencia en los resultados, se deben realizar trabajos que sean concluyentes en relación al óptimo procesamiento del grano, donde se determine cuál es la densidad adecuada o el grosor de la hojuela adecuado del maíz que favorezca a la digestibilidad en las dietas para ganado en finalización.

-Grano alto en humedad.

El grano alto en humedad, puede ser de dos tipos: 1) grano que contiene humedad inherente a él, debido a una cosecha temprana, cuando posee 20-35% de humedad, 2) o formado a partir de añadir humedad al grano, resultando en un grano reconstituido (Kellems y Church, 2001; Benton *et al.*, 2005, Owens y Zinn, 2005; Owens, 2010). El valor nutricional del maíz de alta humedad depende del método de almacenamiento (silo tipo bunker o vertical), método de procesamiento y nivel de humedad, ya que en general los animales alimentados con maíz entero de alta humedad presentaron una reducción en la ganancia de peso y consumo comparado con aquéllos que se les dio grano alta humedad pero que fue prensado

antes de ser ofrecido. (Mader *et al.*, 1991). Dos factores son críticos para una máxima eficiencia alimenticia y digestión a nivel del rumen para el maíz de alta humedad: Un contenido de humedad adecuado (preferiblemente con más del 26% de humedad) y una suficiente duración en la fermentación. Por algunas razones desconocidas, el maíz de alta humedad ensilado entre 20 y 24% de humedad, resultó en una pobre eficiencia alimenticia comparado con el maíz quebrado en seco o el maíz con más humedad (Owens, 2010). El nivel de humedad y el tiempo de ensilado han sido analizados previamente (Owens y Goetsch, 1986) y demostrado tanto en vivo (Jaeger *et al.*, 2004) e *in situ* (Benton *et al.*, 2004). En este último trabajo, se encontró que la desaparición *in situ* del almidón en el rumen para el maíz de alta humedad (28% de humedad o más) incrementó rápidamente durante el primer mes de almacenamiento y siguió incrementando sustancialmente durante los siguientes 8 meses de almacenamiento, particularmente con un maíz de alta humedad más seco (Se debe tener precauciones con el maíz de alta humedad almacenado por varios meses, ya que aunque aumenta la desaparición a nivel ruminal, este puede ocasionar problemas de acidosis aun sin que la dieta no sea modificada). El maíz que fue reconstituido (maíz añadido y dejado fermentar) tuvo resultados similares en la desaparición del almidón *in situ* y en cuanto a la eficiencia alimenticia comparado con maíz que fue cosechado y procesado con alta humedad, el incremento en la digestibilidad del almidón en el maíz de alta humedad comparado con la del maíz rolado en seco parece ser debido al proceso de fermentación, no a las características de la semilla del maíz antes de ser secado en el campo. La digestión del almidón es paralela a la solubilidad del nitrógeno y este es más soluble a su vez debido al tiempo de fermentación en el maíz de alta humedad, el proceso de fermentación parece que solubiliza la proteína que restringe a las bacterias el acceso al almidón que está en el endospermo. Por lo tanto, si la actividad proteolítica es responsable de la solubilización de las proteínas del maíz, el tipo y actividad proteolítica de las bacterias presentes en los cultivos o añadidas como inóculo son los que influyen probablemente la digestión del almidón (Owens, 2010).

El grano entero de alta humedad de cosecha temprana y almacenado en bunker, es degradado rápidamente en rumen (Stock *et al.*, 1987a), mientras que reemplazando una pequeña porción de él con maíz quebrado puede mejorar en forma complementaria su eficiencia (Stock *et al.*, 1987b, Mader, *et al.*, 1991).

Sitio y grado de digestión.

La naturaleza del grano y su procesamiento pueden alterar el sitio y grado de digestión del almidón en el tubo digestivo total (Owens y Goetsch, 1986, Theurer, 1986). Para evaluar el sitio y extensión de digestión del almidón los factores que se deben evaluar son 1) el porcentaje de almidón dietario que aparentemente es digerido en el rumen, 2) el porcentaje de almidón que escapa al rumen y que es digerido en intestino, 3) la digestión del almidón en tubo digestivo total y, 4) el sitio de digestión del almidón (fracción del almidón digerido en tubo digestivo total que desaparece en rumen) (Owens y Zinn, 2005) Otros factores que intervienen con el sitio y grado de digestión del almidón son la edad del animal, la composición de la dieta, el nivel de consumo y la tasa de pasaje ruminal (Owens, 2005).

Con respecto a la naturaleza del grano, se refiere a la variedad, misma que influye la proporción de almidón (amilosa:amilopectina) y la relación de éste con la matriz proteica del germen (Owens y Goetsch, 1986; Theurer, 1986), Kreikemeier, *et al.* (1991) sugieren que se puede reducir la hidrólisis del almidón en el intestino delgado ya que al realizar infusiones abomasales de glucosa y almidón observaron un mayor porcentaje de desaparición de glucosa que de almidón, debido a que en el almidón purificado que utilizaron los gránulos de almidón poseían su matriz proteica protectora. Mientras que los métodos de procesamiento, involucran la reducción del tamaño de partícula mediante varios factores y/o combinación de factores como calor, humedad, tiempo y acción mecánica (Scott *et al.*, 2003), los cuales actúan hidratando e hinchando las regiones amorfas y cristalina del gránulo

de almidón, esta alteración en la estructura incrementa la digestión amilolítica tanto de microorganismos como de enzimas pancreáticas. El grado de aplicación de calor húmedo al grano, además de la disminución física del tamaño de partícula tiene más beneficios que la aplicación de un solo proceso (Nocek y Tamminga, 1991).

El ganado de finalización consume hasta 6 kg de almidón diario, principalmente de granos de cereales como maíz y sorgo. La digestibilidad total aparente generalmente se encuentra en un rango de 90 a 100% del consumo del almidón, con un promedio de 92.1%. La digestión ruminal del almidón tiene una digestibilidad promedio de 72.3 % del almidón consumido, el cual representa el 78.5% de la digestibilidad del tubo digestivo total. Mientras la digestibilidad aparente en intestino delgado es de 36 a 49% del almidón que entra a él, esta digestibilidad disminuye conforme se incrementa el ingreso de almidón. El almidón aparentemente digerido en el intestino grueso se encuentra en un rango de 44 a 46 % del almidón que entra en el intestino grueso (Huntington *et al.*, 2005).

Estos valores pueden ser afectados por la naturaleza del grano que es incluido en la dieta, a este respecto Philippeau *et al.* (1999b) evaluaron, *in situ*, cómo la característica de cristalinidad o dureza del grano afectó la degradación ruminal del almidón. En este estudio se compararon maíz dentado con una cristalinidad promedio de 51.4% (38.5 a 57.3%) contra maíz flint con cristalinidad promedio de 71.8 % (66.8 a 79.1%) y un contenido de almidón de 68 y 67.1% respectivamente, obteniéndose una digestibilidad mayor de almidón para el maíz dentado que para el maíz flint (61.9 vs. 46.2%). En otro estudio realizado por Philippeau *et al.* (1999a) en el cual los granos de maíz poseían una cristalinidad similar al anterior (51.7% para dentado y 66.8% para flint) muestran el mismo comportamiento pero en este caso la degradación ruminal *in situ* fue de 74% para maíz dentado vs. 70.9% del flint, mientras que la digestibilidad ruminal *in vivo* fue de 60.8% y 34.8% respectivamente, atribuyéndose los altos valores de digestibilidad *in situ* a una gran fracción rápidamente degradada, lo cual demuestra que el efecto limitante de la

matriz proteica es menos importante para el maíz dentado que para el flint, explicando así la alta digestibilidad del maíz dentado sobre el maíz flint.

El mayor sitio de digestión del almidón de los granos es el rumen, por lo que se espera que al ser procesados la digestibilidad tanto ruminal como de tubo digestivo total se vea incrementada (Owens y Goetsch, 1986), debido principalmente al rompimiento de la matriz proteica que rodea al almidón, mejorando así la eficiencia en la utilización del almidón. Por lo que el mayor efecto de un adecuado procesamiento del grano es el cambio del sitio de digestión del almidón de intestinos a rumen, con incrementos concomitantes en el porcentaje digerido en ambos sitios (Theurer, 1986).

Huntington (1997), hizo un resumen de 14 trabajos publicados entre 1986 y 1995 acerca de la influencia que tenía en la digestibilidad el nivel de procesamiento del maíz. Para el maíz rolado en seco, de alta humedad y hojueado al vapor, la digestibilidad ruminal fue de 76.2 %, 89.9 % y 84.8 % del consumo, respectivamente. La digestión post ruminal del almidón fue de 68.9%, 67.2% y 92.6% de lo que ingreso al duodeno, respectivamente, mientras que la digestibilidad del tubo digestivo total fue de 92.2%, 95.3% y 98.9% del consumo, respectivamente.

Por otra parte, Owens (2005b) hizo un resumen de ensayos publicados desde 1990 (Cuadro 3) donde se estimó el sitio de digestión del almidón para ganado en engorda.

Cuadro 3. Influencia del procesamiento del maíz en sitio y extensión en la digestión del almidón para el ganado de engorda. (Adaptado de Owens, 2005).

Método de procesamiento	Rolado seco	Alta Humedad	Hojueleado al vapor	Entero	EEM
Digestión de almidón en rumen, % de la ingesta	63.80 ^b	86.55 ^a	84.05 ^a	68.34 ^b	3.38
Desaparición postruminal del almidón, % del ingreso	72.16 ^b	93.10 ^a	94.33 ^a	52.99 ^c	4.07
Fracción del almidón digerido en rumen, % del total	70.15 ^c	87.24 ^a	84.74 ^{ab}	79.20 ^b	3.64
Digestión total del almidón, % de la ingesta	91.03 ^b	99.25 ^a	99.09 ^a	87.08 ^c	1.12
Digestión del almidón en I. delgado, % del ingreso	58.83 ^b	94.86 ^a	92.48 ^a	64.64 ^b	22.38
Digestión del almidón en I. delgado, % de la ingesta	20.08	17.18	16.39	24.50	7.62
Digestión del almidón en rumen en I. delgado, % de ingesta	83.67 ^b	99.07 ^a	98.48 ^a	86.60 ^{ab}	12.01
Digestión del almidón en I. grueso, % del ingreso	56.32 ^a	24.80 ^b	20.47 ^b	32.09 ^{ab}	22.25
Digestión del almidón en I. grueso, % de la ingesta	11.66 ^a	0.23 ^b	0.42 ^b	4.30 ^b	5.42

^{a,b,c} Medias dentro de una fila que no comparten un superíndice difieren (P <.05).

Las principales respuestas al procesamiento del grano son disminución de la densidad y el incremento de la fermentación en el rumen (Huntington, 1997). El hojueado mejora la digestibilidad en el total del tubo digestivo como resultado de un incremento tanto de la digestibilidad ruminal como postruminal (Zinn, *et al.*, 2002) Se han realizado revisiones periódicas al respecto como las presentadas por Owens y Goetsch (1986), Theurer (1986), Nocek y Tamminga (1991), Huntington (1997).

Así como la cristalinidad afecta la digestibilidad dentro de un mismo tipo de grano, la densidad del grano que fue sometido a hojueado con vapor también modifica la digestibilidad, como lo muestra el estudio realizado por Zinn (1990a) donde fueron evaluados granos hojueados con densidades de 0.42, 0.36 y 0.30 kg/L en los cuales existe un incremento en la digestibilidad ruminal y de tubo digestivo total conforme se disminuye la densidad de la hojuela, así como una disminución lineal en la digestibilidad postruminal, presentando un comportamiento similar los granos hojueados con densidad de 0.437 y 0.283 g/L evaluados por Theurer *et al.* (1999) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Influencia de la densidad de la hojuela del maíz procesado con vapor sobre la digestibilidad del almidón en rumen e intestinos de ganado de engorda. (Tomado de May *et al.*, 2008)

	<i>Densidad de hojuela Kg/L</i>				
	0.437 ^a	0.42 ^b	0.36 ^b	0.30 ^b	0.283 ^a
Consumo, g/d	4,551	3,089	3,049	3,052	4,865
Flujo a duodeno, g/d	1,108	622	532	399	752
Excreción fecal, g/d	132	46.0	27.8	10.8	47
Digestibilidad ruminal, % consumido	76.2	79.8	82.6	86.9	84.6
Digestibilidad postruminal, % consumido	21.1	18.7	16.5	12.8	14.4
Digestibilidad tubo digestivo total, % consumido	97.3	98.5	99.1	99.6	99.1

^aTheurer *et al.*, 1999 ^bZinn, 1990a

Beneficios adicionales debido al procesamiento pueden observarse ya que se incrementa la digestibilidad de otros granos o componentes de la dieta, ya que es más eficiente la digestión (evitando pérdidas de energía a causa de la fermentación en rumen e intestino grueso), y una alteración en el sitio de digestión. Si el almidón es fermentado en el rumen, los microorganismos ruminales usan la energía para sintetizar proteína que el animal podrá digerir, depositar o secretar. Por el contrario, si el almidón es digerido a nivel del intestino delgado, las pérdidas de energía durante la fermentación ruminal en forma de metano y calor metabólico se logran evitar. Esto hace el sitio de digestión (rumen ó intestino) sea un tema de interés (Owens, 2005).

Debido a que la capacidad digestiva limita la captura máxima de almidón que entra al intestino delgado, aproximadamente el 45% del almidón que entra al intestino no es absorbido como glucosa, cualquier mejoramiento en el metabolismo energético atribuible al aporte incrementado de glucosa dietaria debe considerar las pérdidas potenciales de energía asociadas a la fermentación del almidón en ciego, intestino grueso y colon en lugar del rumen (Huntington, 1997).

Digestión in vitro del maíz y su correlación con la digestión in vivo.

Se han propuesto varios métodos de laboratorio para predecir la digestión del almidón, además de la estimación enzimática de disponibilidad del almidón utilizada en los laboratorios comerciales para evaluar los granos hojueleados al vapor. Estos incluyen las pruebas de reactividad enzimática (Rodríguez *et al.*, 2001) producción de gas mediante la incubación con la levadura, evaluación microscópica de la gelatinización, el grado de acceso del almidón, reportado por Basel *et al.* (2006), que se utiliza tanto como ensilajes como en granos, y las mediciones de tamaño de partículas con granos y ensilajes que se basan en el concepto de que el almidón que se encuentra en partículas de más de $\frac{1}{4}$ del tamaño del grano (>4.25mm) del ensilado de maíz son menos digeridos *in vitro* que las partículas

más pequeñas (Ferreira y Martens, 2005). Finalmente, el análisis directo del contenido del almidón de las heces proporciona una estimación directa del total de almidón indigestible como se indica a continuación (Owens, 2010).

Si el aporte del almidón por el alimento y el aporte del almidón fecal se conocen, la digestibilidad del mismo se puede calcular. Mediante el empleo de marcadores inherentes o agregados, la digestibilidad del almidón se puede calcular en condiciones de campo utilizando un método recientemente propuesto por Zinn et. al., (2007). A su vez, los valores de energía neta de los granos se pueden predecir a partir del almidón. Esto implicaría que el almidón fecal, el cual representa una pérdida de energía, debe ser proporcional a la disponibilidad de energía a partir de almidón en rumen e intestino delgado. Para cuantificar esta relación, la digestión diaria del almidón (gramos), en el rumen e intestino delgado del ganado de engorda y del ganado lechero en producción se graficó versus el total de almidón fecal dividido por la indigestibilidad promedio del almidón en el intestino grueso ($100 - 47.8 = 52.2\%$) en todos los métodos de procesamiento, como se muestra en la figura 8.

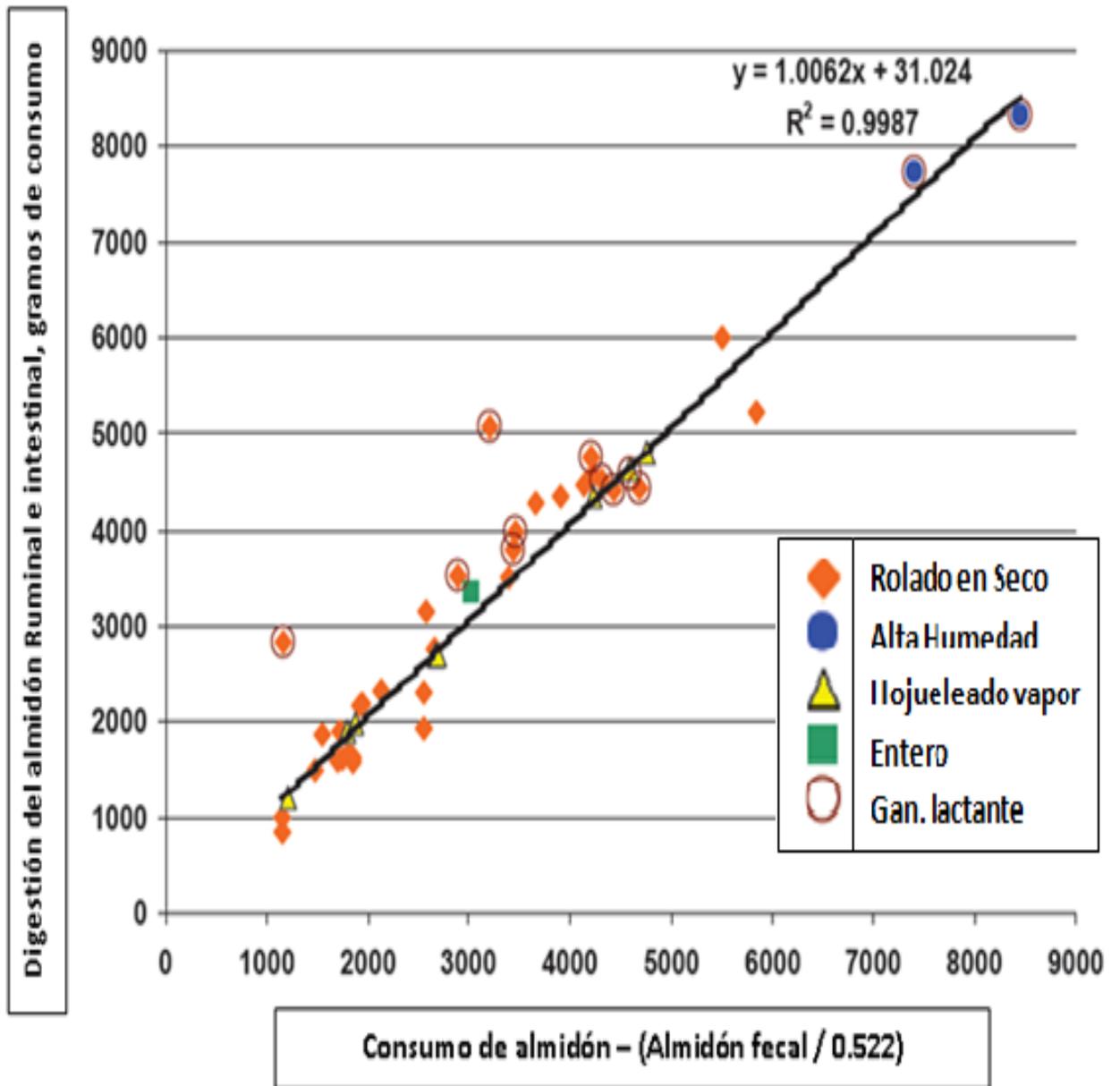


FIGURA 8. Relación entre la digestión del almidón en rumen e intestino delgado del consumo total de almidón menos la excreción fecal de almidón dividido por la indigestibilidad media del almidón (Adaptado de Owens, 2010).

La variabilidad de la muestra entre los animales y los días necesitan más estudios, pero las concentraciones de almidón fecal total por encima de 5% (materia fecal) presumiblemente reflejan un inadecuado hojueleado al vapor de los granos para la máxima digestión del almidón o la presencia de almidón en materia fecal de otras fuentes (por ejemplo, del ensilado de maíz) (Owens, 2010).

Zinn *et al.* (2007) mencionan que cuando el grano es la principal o única fuente de almidón en la dieta, la concentración del almidón fecal (AF, % de MS) en los novillos de engorda, puede servir como un indicador de la digestión total del almidón (DTA, % de consumo= $100.5 - 0.6489AF$; $n=64$, $r^2=0.91$; Zinn *et al.*, 2002). Esta relación tan cercana entre el AF y DTA fue confirmada por Corona *et al.* (2005; $DTA=102.4 - 0.72AF$; $n=16$, $r^2=0.97$). Hace algunas décadas, la excreción fecal del N fue utilizada para predecir con certeza la concentración del N dietario en las dietas a base de forraje (Holter y Reid, 1959). En épocas recientes, en un resumen de 445 pruebas de digestión, Lukas *et al.* (2005) observaron que la concentración de N (NF, % de MS) podía explicar el 82 % de la variación en la digestión de la MO de las dietas a base de forraje. La digestión del almidón puede ser predicha con precisión a partir del AF. Sin embargo, al incorporar el NF dentro del modelo, se incrementa marcadamente, la estimación de la calidad del grano y de la eficiencia en su procesamiento, cuando la digestión total del almidón excede el 95% (Zinn *et al.*, 2007).

Un procedimiento de laboratorio rápido, simple y confiable para la valoración en los cambios en la digestibilidad del almidón es esencial para la optimización del procesamiento en el grano. Muchos métodos *in vivo* y enzimáticos han sido utilizados para estimar la digestión ruminal del almidón (Ewing y Johnson, 1987 y Herrera-Saldaña *et al.*, 1990). La prueba del almidón reactivo a la amiloglucosidasa (ARA), una medición de la solubilidad del almidón, ha sido utilizada por muchos años para evaluar los cambios en la disponibilidad del almidón a nivel ruminal gracias al hojueleado al vapor. Por si sólo, este procedimiento explica

aproximadamente el 67% de la variación en la medición de la digestión ruminal del almidón. En un estudio llevado a cabo por Rodríguez *et al.* (2001), donde se evaluaron muestras de grano (maíz y sorgo rolados en seco y hojueados al vapor) de 5 experimentos (Zinn, 1988; 1990a,b; 1991 y Salinas *et al.*, 1999; Cuadro 5) con la prueba del almidón reactivo a la amiloglucosidasa (ARA, digestión enzimática de la parte soluble del almidón) combinado con una prueba de digestión enzimática *in vitro* de la parte insoluble del almidón (DAI) se encontró que se puede explicar el 78% de la variación en la digestión ruminal del almidón observada *in vivo*. De hecho, las mediciones *in vivo* e *in vitro* de la digestión ruminal del almidón fueron solo 4% menos diferentes para todos los casos excepto uno, donde lo observado y lo esperado fue diferente en 8%. Los autores proponen que la combinación de ambos métodos, tanto como de la medición de la digestión de la parte soluble como de la insoluble provee una herramienta simple para la determinación confiable de los cambios en la digestión ruminal del almidón con el maíz y el sorgo hojueado al vapor.

Cuadro 5. Digestión del almidón soluble (ARA) y digestión del almidón insoluble (DAI), y digestión ruminal del almidón observada y predicha del maíz y del sorgo hojueados al vapor y quebrado.

Tipo de Grano	Digestión Enzimática del Almidón, % ^a		Digestión Ruminal del Almidón, %	
	Soluble (ARA)	Insoluble (DAI)	Observada ^b (DRAO)	Predicha ^c (DRAP)
Maíz				
Quebrado ^d	10.8	61.1	68.3	71.0
Hojueado ^e	13.3	62.8	75.8	76.2
Hojueado ^e	19.0	59.9	78.1	80.7
Hojueado ^f	22.3	58.2	83.0	83.2
Hojueado ^g	17.3	60.9	86.5	79.5
Sorgo				
Quebrado ^h	9.1	64.7	72.0	72.1
Hojueado ^g	17.5	59.6	80.3	78.5
Hojueado ^h	28.3	53.7	86.0	87.3

^a Valores obtenidos del análisis *in vitro* con enzimas.

^b Resumen de cinco experimentos (^dZinn, 1990a; ^eZinn, 1988; ^fZinn, 1990b; ^gZinn, 1991; y ^hSalinas *et al.*, 1999)

^cDRAP = 1.32ARA +.93DAI (R² = .78; P < .01)

Adaptado (Rodríguez *et al.*, 2001)

JUSTIFICACIÓN

En estudios previos se ha demostrado que el procesamiento del maíz por hojueleado al vapor puede incrementar hasta un 18% el valor energético del mismo en comparación con los procesos en seco utilizados en dietas para la engorda de bovinos (Zinn *et al.*, 2002).

Zinn *et al.* (2011), indican que el valor alimenticio del maíz hojueleado al vapor (MHV) puede ser afectado por la intensidad del procesamiento, señalando además, que el valor de energía neta de mantenimiento (ENm) y energía neta de ganancia (ENg), a una densidad de 0.34 kg/L es equivalente a 2.40 y 1.69 Mcal/kg respectivamente, siendo estos valores 3% más altos que los señalados por las actuales tablas de valores (NRC, 2000).

Sin embargo, los estándares de producción que reflejen el procesamiento óptimo aún no están bien definidos.

La digestibilidad es uno de los factores más importantes a considerar cuando se quiere incrementar el valor nutricional de un alimento, con el procesamiento se puede alterar el sitio y la extensión de la digestión de granos, así por ejemplo, el aporte de energía disponible para los rumiantes es mayor cuando el almidón es digerido en el intestino delgado que cuando lo hace en el rumen o en el intestino grueso, este hecho se explica por la pérdida de energía como metano y calor que se produce por la fermentación microbiana en dichos sitios (Owens y Soderlund, 2007). Incluso se han señalado pérdidas de energía del 13 al 18 % de energía bruta resultado de la fermentación pregástrica (Harmon y McLeod, 2001).

En otro experimento realizado por Zinn (1990a), se determinó que reducir la densidad de la hojuela de maíz al vapor (de 0.42 a 0.36 ó 0.30 kg/L) está relacionado en forma lineal, con la disminución del pH ruminal y un incremento lineal de la digestión del almidón a nivel postruminal y del tubo digestivo total, un incremento en la digestibilidad postruminal del nitrógeno y un incremento en la digestibilidad de la materia orgánica (MO), del nitrógeno y la energía a nivel del total del tubo digestivo,

pero sin generar impacto en la calidad de la canal, ni un incremento en la ganancia diaria de peso, ni en la conversión alimenticia. Sin embargo, Sindt *et al.* (2006a) confirmaron que no hubo mejora en la digestibilidad del maíz roado al vapor, ni se mejoró el desempeño productivo con densidades menores a 0.36 kg/L. Por otra parte, en un estudio realizado por Plascencia *et al.* (2011), observaron que al disminuir la densidad de la hojuela del maíz blanco de 0.36 a 0.31 kg/L no se afectó la digestibilidad ruminal de la MO, ni el sitio y la extensión de la digestión del almidón, pero el hecho de reducir la densidad de la hojuela en el maíz blanco, aumentó la digestión postruminal (6.9%) y tendió a incrementar la digestión total aparente de la materia orgánica.

Por lo tanto es importante definir la influencia que tiene la densidad del maíz hojueleado al vapor en la digestión en el ganado de engorda y definir el nivel de procesamiento que represente tasas más favorables de dicha característica, así como evaluar las herramientas para determinar el grado de procesamiento del grano y la digestión óptima del almidón en los animales.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de diferentes densidades de hojueado al vapor del maíz (0.46, 0.41, 0.36, 0.31 y 0.26 kg/L) integradas en dietas de finalización para ganado bovino con propósito de engorda para conocer cuál es la densidad óptima del hojueado del maíz en la digestión.

Objetivos específicos

Determinar el efecto de la adición de distintas densidades de maíz hojueado al vapor (0.46, 0.41, 0.36, 0.31 y 0.26 kg/L) sobre el sitio y grado de la digestión de nutrimentos.

Determinar la relación entre la digestión del almidón *in vivo* con la concentración de almidón en heces, la reactividad enzimática *in vitro*, grosor de la hojuela y densidad de la hojuela (0.46, 0.41, 0.36, 0.31 y 0.26 kg/L).

HIPÓTESIS

La digestibilidad del maíz hojueado al vapor se incrementa con la disminución en la densidad de la hojuela en las dietas para ganado bovino de engorda en finalización.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron dos experimentos para evaluar la densidad de la hojuela (DH) en el valor alimenticio de maíz hojueado al vapor (MHV). Los tratamientos consistieron en hojuear maíz al vapor a las densidades: 0.46, 0.41, 0.36, 0.31 y 0.26 kg/L y una dieta control con maíz quebrado en seco. La dieta consistió en una dieta de finalización con 77% de maíz.

Experimento 1:

Se utilizaron seis novillos con cánulas en el rumen y duodeno proximal donde se evaluó el sitio y grado de digestión de los tratamientos. Los animales se mantuvieron en corrales individuales, el consumo de materia seca fue restringido al 2.2% de su peso vivo. Después de dos semanas de adaptación a la dieta, se tomaron muestras de alimento, rumen, duodeno y heces para determinar MS, N, FDN, energía bruta y almidón. La prueba fue analizada mediante un diseño de cuadrado latino 6 x 6. Los efectos de tratamiento se probaron mediante contrastes ortogonales para probar el método de tratamiento y polinomios ortogonales para las diferentes densidades del maíz hojueado al vapor.

Experimento 2:

Se utilizaron 12 novillos para evaluar la digestión de los diferentes tratamientos a nivel de tubo digestivo total. Los animales recibieron los mismos cuidados y alimentación como los indicados en el primer experimento. Después de dos semanas de adaptación a la dieta, se tomaron muestras de alimento y heces para determinar MS, N, FDN, energía bruta y almidón. La prueba fue analizada mediante un diseño de bloques al azar (el criterio de bloqueo fue el periodo). Los efectos de tratamiento se probaron mediante contrastes ortogonales de la misma manera que en el experimento 1.

Animales, tratamientos y procedimiento de muestreo.

Cuidado de los animales:

El cuidado animal y las técnicas de manejo estuvieron bajo supervisión del Comité de Uso y Cuidado Animal de la Universidad de California-Davis, USA. El experimento y los análisis de laboratorio se llevaron a cabo en el Desert Research and Extension Center de la Universidad de California-Davis, ubicado en el número 1050 de la calle E. Holton Rd, Holtville, California (CP 92250), Estados Unidos, a 4.5 km al oeste de la ciudad de Holtville sobre la carretera número 115, en el sur del estado de California. La zona tiene una latitud de 32°48' norte, una longitud de 115°22' oeste, una altitud de -3 m sobre el nivel del mar y condiciones desérticas. El clima de la región es desértico cálido (Bwh) con una temperatura máxima promedio de 31.1°C y una temperatura mínima promedio de 15.0 °C teniendo veranos con temperaturas diurnas superando los 35 grados Celsius prácticamente todos los días de la estación, y pueden alcanzar valores térmicos de hasta 46 °C e índice de calor superior a 60 °C cada año e inviernos con temperaturas de entre 3 y 25 °C, con una precipitación total anual de 74.5 mm y con 16 días al año con precipitaciones de más o igual a 1 mm.

Preparación de los tratamientos:

Se utilizó maíz amarillo (corn dent) hojueado al vapor. Para medir su densidad se obtuvieron muestras del grano procesado directamente por debajo de los rodillos (rodillos de 46x61 cm, 5.5 ondulaciones/cm: Memco, Mills Rolls, Mill Engineering & Machinery Co., Oklahoma, Ca.) de la máquina roladora y se utilizó una balanza manual (Medidor Peso por Bushell, de la compañía Mill & Elevatory Supply Co., Kansas City, MO).

El maíz rolado al vapor fue preparado como se menciona a continuación: Se llenó un cofre situado por encima de los rodillos a su máxima capacidad (440 kg) con maíz

entero y llevado a una temperatura constante de (102°C) usando vapor a presión atmosférica (presión del evaporador, 60 psi). El maíz fue sometido al vapor durante 20 minutos antes de comenzar el hojueado. Aproximadamente los primeros 440 kg iniciales que salieron del proceso inicial de evaporado, durante el calentamiento, no fueron utilizados en el experimento. La tensión de los rodillos fue ajustada para proveer la densidad de hojuela indicada (0.26 a 0.46 kg/L). El tiempo de retención en la cámara fue aproximadamente de 30-35 minutos. El maíz hojueado al vapor fue llevado a un piso de concreto donde se esparció y se dejó secar al sol durante 5 días previo a la preparación de la dieta. Posteriormente para la determinación de la composición química y la digestión enzimática *in vitro* del almidón, el maíz fue molido utilizando un Molino Willey usando una malla de 1mm.

Experimento 1:

Seis novillos Holstein (153 ± 11 kg) habilitados con cánulas en el rumen y duodeno proximal (Zinn y Plascencia, 1993), se vacunaron contra IBR, DVB (Tipos 1 y 2), PI3, VSRB (2 mL, SC, Bovishield Gold-One Shot), contra Clostridium (5 mL, SC, Ultrachoice 8, Pfizer, New York, NY), desparasitados con antiparasitarios con efecto interno y externo (3 mL SC, Dectomax, Pfizer, New York, NY), e inyectados con 4 mL de tuluthromicina (Draxxin, Pfizer, New York, NY) vía subcutánea como antibiótico profiláctico. Se asignaron al azar utilizando un diseño de cuadrado Latino 6x6, con la finalidad de valorar la inclusión de distintas densidades de maíz hojueado al vapor (0.46, 0.41, 0.36, 0.31 y 0.26 kg/L) en dietas de finalización para rumiantes (Se agregaron 3.5 g de óxido de cromo por kg de dieta como marcador de digesta para estimar el flujo de nutrientes, estos fueron mezclados en una premezcla que contenía urea, piedra caliza y sales minerales traza). Se utilizó una dieta basal que contenía 77% de maíz amarillo. Los tratamientos fueron los siguientes tipos e intensidades de procesados: Quebrado en seco (MQS, testigo 0.54 kg/L) y hojueado al vapor (MHV) en densidad de 0.46, 0.41, 0.36, 0.31 y 0.26 kg/L. Las características de las dietas experimentales se describen en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Composición de las dietas experimentales (Experimento 1).

	Tratamientos	
	MQS	MHV
Ingredientes, (% de MS)		
Heno de Alfalfa	4.60	4.60
Heno de Sudán	4.60	4.60
Maíz Hojueleado al vapor	-	77.20
Maíz Quebrado en seco	77.20	-
Melaza de Caña	7.50	7.50
Grasa Amarilla	3.06	3.06
Piedra Caliza	1.30	1.30
Óxido de Magnesio	0.18	0.18
Urea	1.00	1.00
Sal MT ¹	0.30	0.30
Óxido de Cromo	0.26	0.26
Composición analizada (base MS)		
EN, Mcal/kg ²		
Mantenimiento	2.12	2.23
Ganancia	1.46	1.56
PC, %	10.77	10.56
FDN, %	10.03	10.70
Ca, %	0.75	0.75
P, %	0.33	0.33

¹ Contenido de las sales minerales traza: 0.052% KI; 0.68% CoSO₄; 1.04%CuSO₄; 1.07 % MnSO₄; 1.24% ZnO₄; 3.57% FeSO₄; y 92.96% NaCl.

² Basado en los valores tabulares de EN para los ingredientes alimentados individualmente (NRC,1996), con la excepción del suplemento de grasa, al cual se le asignó valores de ENm y ENg equivalentes a 6.0 y 4.85 Mcal/kg respectivamente.

Procedimiento de muestreo:

Los novillos se alojaron en corraletas individuales (1.42 x 2.74 m²) con comederos individuales y bebederos automáticos compartidos. Los corrales situados bajo techo (indoor) contaban con piso de concreto cubierto con carpeta de neopreno. El nivel de suministro de las dietas fue del 90% de lo consumido durante la prueba de adaptación (aproximadamente 2.2% del PV), y se ofreció en forma diaria en dos porciones iguales a las 0800 y a las 2000 h. El experimento consistió en 6 períodos experimentales de 14 días (10 días para adaptación a la dieta y 4 para colección de muestras). Durante el periodo de recolección de muestras, las muestras duodenales y fecales se tomaron a cada novillo dos veces al día durante los últimos 4 días de cada periodo en los siguientes horarios: día 1, 0750 y 1350h; día 2, a las 0900 y las 1500 h; día 3, a las 1050 y las 1650 h y día 4, a las 1200 y las 1800 h. Se tomaron muestras duodenales (750 mL) y fecales (200 g) de cada novillo dos veces al día. Las muestras de cada novillo, en cada periodo de colección, se mezclaron con el propósito de formar muestras compuestas, las que se congelaron a -20° C para análisis posteriores. Durante el último día de cada periodo, mediante el uso de una bomba de vacío, una muestra de contenido ruminal se obtuvo de cada novillo a las 4 horas después de alimentarse. El último día, del último periodo experimental, se obtuvo y se mezclaron (por novillo) muestras de fluido ruminal para llevar a cabo el procedimiento para el aislamiento de bacterias ruminales por centrifugación diferencial (Bergen *et al.*, 1968).

Experimento 2:

Doce novillos Holstein (154 ± 9 kg), A los que se aplicó el mismo tratamiento profiláctico indicado en el experimento 1, se utilizaron para probar el efecto del método de procesamiento (MQS vs. MHV), y las diferentes densidades (0.54; 0.46; 0.41; 0.36; 0.31 y 0.26 kg/L) del maíz amarillo junto con cada método de procesamiento en el grado de digestión en el tubo digestivo total, utilizando un diseño de bloques al azar (criterio de bloqueo=periodo). Se agregaron 3.5 g de óxido de cromo por kg de dieta como marcador de digesta para estimación de flujo de nutrientes, estos fueron mezclados en una premezcla como se indica en el primer experimento. Se utilizó prácticamente la misma dieta que en el experimento 1. Las características de las dietas experimentales se describen en el Cuadro 7.

Procedimiento de muestreo:

Los novillos se alojaron en corraletas bajo las mismas condiciones y en las mismas instalaciones descritas en el experimento 1. El nivel de suministro de las dietas y los horarios de alimentación fueron iguales a los del primer experimento. El experimento consistió en 2 períodos experimentales de 14 días (10 días para adaptación de dieta y 4 para colección de muestras). Durante el periodo de colección de muestras fecales se tomaron a cada novillo dos veces al día durante los últimos 4 días de la misma manera que en el experimento anterior. Se tomaron muestras fecales (200 g) de cada novillo dos veces al día y se conservaron como en el primer experimento.

Cuadro 7. Composición de las dietas experimentales (Experimento 2).

	Tratamientos	
	MQS	MHV
Ingredientes, (% de MS)		
Heno de Alfalfa	4.79	4.79
Heno de Sudán	4.79	4.79
Maíz Hojueleado al vapor	-	77.20
Maíz Quebrado en seco	77.20	-
Melaza de Caña	7.00	7.00
Grasa Amarilla	3.08	3.08
Piedra Caliza	1.31	1.31
Óxido de Magnesio	0.26	0.26
Urea	1.00	1.00
Sal MT ¹	0.31	0.31
Óxido de Cromo	0.26	0.26
Composición analizada (base MS)		
EN, Mcal/kg ²		
Mantenimiento	2.16	2.23
Ganancia	1.49	1.56
PC, %	10.8	10.6
FDN, %	10.0	10.7
Ca, %	0.75	0.75
P, %	0.33	0.33

¹ Contenido de las sales minerales traza: 0.052% KI; 0.68% CoSO₄; 1.04%CuSO₄; 1.07 % MnSO₄; 1.24% ZnO₄; 3.57% FeSO₄; y 92.96% NaCl.

² Basado en los valores tabulares de EN para los ingredientes alimentados individualmente (NRC,1996), con la excepción del suplemento de grasa, al cual se le asignó valores de ENm y ENG equivalentes a 6.0 y 4.85 Mcal/kg respectivamente.

Análisis de laboratorio y cálculos.

De las muestras de maíz, se obtuvieron submuestras de 100 gramos de cada uno de los tratamientos y se procedió a colocarlos en cribas para la evaluación correspondiente al tamaño de partícula promedio de cada uno de los tratamientos, el material retenido en cada criba se calculó como el promedio geométrico del diámetro de abertura de dos cribas adyacentes mediante las siguientes fórmulas:

$$d_i = (d_u * d_o)^{0.5}$$

Dónde:

d_i = diámetro de la i -ésima criba.

d_u = diámetro de abertura de la criba a través de la cual pasaron los granos.

d_o = diámetro de abertura de la criba a través de la cual no pasaron los granos.

El tamaño promedio se calculó con base en el peso de la muestra. Esto se hizo utilizando la fórmula.

$$d_{gw} = \log^{-1} \frac{\sum (W_i \log d_i)}{\sum W_i}$$

En dónde:

d_{gw} = diámetro medio geométrico (TP).

W_i = peso de la muestra contenido en la i -ésima criba.

La desviación estándar geométrica se calculó mediante la fórmula.

$$S_{gw} = \log^{-1} \frac{[\sum W_i (\log d_i - \log d_{gw})]^2}{\sum W_i}^{0.5}$$

Dónde:

S_{gw} = Desviación estándar geométrica (Ensor *et. al.*, 1970).

El número de partículas por gramo (P/g) y la superficie de área (SA) fueron calculados a partir de TP (d_{gw}) y la desviación estándar geométrica (S_{gw}). Para estos cálculos, se consideró que los factores de una forma cúbica son $\beta_s=6$ y $\beta_v=1$. Se utilizó el valor de densidad obtenido en la prueba de S_{gw} en cada muestra.

Por otra parte para las mediciones correspondientes al grosor de la hojuela se utilizó un micrómetro (Central Tools, Co.), se tomaron 10 hojuelas integras de cada tratamiento y se dividieron por mitad para poder medirlas en el área central de la hojuela, obteniendo un promedio del grosor para cada tratamiento.

Para la prueba de reactividad enzimática, se realizó una submuestra hasta obtener 50 gramos de cada tratamiento, el cual fue molido en un molino Wiley (malla de 1 mm). La prueba del almidón reactivo a la amiloglucosidasa (ARA) fue determinado (Zinn, 1990a), con la incubación a tiempo extendido por 4 horas. Mientras tanto, la prueba de digestión enzimática *in vitro* de la parte insoluble del almidón (DAI) fue determinada como describen Rodríguez *et al.* (2001). El almidón insoluble reactivo (AIR, %) fue calculado como sigue: $AIR = (AR - ARA) / 6$, donde 6 representa el número de horas de la incubación *in vitro*. El almidón insoluble digerido (AID, %) en el rumen fue calculado como: $AID = (100 - ARA) \times [DAI / (DAI + 0.05)]$, donde 0.05 es un estimado de la tasa de pasaje (fracción por hora) del grano proveniente del rumen. Finalmente, se utilizó la siguiente ecuación para predecir la digestibilidad ruminal del almidón (DRAP): $DRAP = 1.32 (ARA) + 0.93 (ISD)$ (Rodríguez *et al.*, 2001).

Las muestras duodenales se descongelaron a temperatura ambiente hasta alcanzar una temperatura de 15°C, una vez que alcanzó el quimo intestinal esta temperatura, se homogenizó el tamaño de partícula de la muestra utilizando para ello una licuadora durante 10 s, posteriormente la totalidad de la muestra se depositó en un contenedor con capacidad de 20 L y se mezcló utilizando un homogeneizador (Fisher Products Co.). Posteriormente, una alícuota de 900 mL se depositó en un recipiente refractario para desecar la muestra a 70°C durante 72 h. Las heces se descongelaron a temperatura ambiente, se homogenizaron manualmente y una cantidad de aproximadamente 200 g se colocó en forma extendida (aproximadamente 1 cm de grosor) en papel aluminio para secarse a una temperatura de 70°C. Una vez secas, tanto las muestras de quimo intestinal como las de heces fueron trituradas y molidas para obtener un tamaño de partícula de aproximadamente 1mm.

Las muestras generadas a partir de la prueba de metabolismo se sujetaron a todos o parte de los siguientes análisis: Materia seca (MS, estufa desecando a 105°C hasta peso constante), cenizas, N kjeldhal y N amoniacal estipulada por la AOAC (1990), almidón (Zinn, 1990a), purinas (Zinn y Owens, 1986), FDN (Chai y Uden, 1988), óxido de Cr (Hill y Anderson, 1958), y energía bruta (EB) (utilizando una bomba calorimétrica adiabática).

La cantidad de materia orgánica microbiana (MOM), así como el nitrógeno microbiano (NM) que fluyen al duodeno se calculó con base en los análisis de las bacterias aisladas en el fluido ruminal, así como en las muestras obtenidas de duodeno, usando purinas como marcadores (Zinn y Owens, 1986). La materia orgánica fermentada (MOF) en rumen fue calculada mediante la resta a la materia orgánica consumida (MOC) menos la diferencia cuantitativa observada a nivel duodenal de la cantidad total de la MO, menos la MOM que ingresó a duodeno [MOF=MOC-(MO-MOM)]. El N consumido que escapó de la digestión ruminal (proteína de escape) fue considerado como el equivalente al total de N que ingresa al duodeno menos la suma de las cantidades de N amoniacal y N microbiano que fluyeron al duodeno. Se calculó el cambio en el valor del total de nutrientes digestibles (TND) a través de la fórmula calculada por Zinn *et al.* (2002) la cual se expresa: mejora en el contenido de TND, % = [(DMHV - DMQS)* % almidón]/0.88, donde DMHV y DMQS es la digestión del almidón observada a nivel de todo el tubo digestivo, % almidón es el contenido de almidón del grano y 0.88 es el valor de TND especificado por la NRC (1996) para el maíz quebrado. Por otra parte se calculó el valor de ENm del MHV y del MQS mediante la fórmula de Zinn *et al.* (2002), donde observaron la siguiente relación ($r^2 = 0.88$) entre la digestibilidad del almidón a nivel de tubo digestivo total y la ENm del maíz: ENm del maíz, Mcal/kg = -0.75 + 0.032 DTA, donde DTA = digestión total del almidón. En el caso del Experimento 2 se realizó también la valoración de la energía digestible (ED, Mcal/kg) de los tratamientos probados mediante la técnica de remplazo (Zinn y Plascencia, 1993), La cual se utilizó para este estudio:

- A) Al maíz quebrado como estándar que contiene 3.88 Mcal/kg de ED (NRC, 1996),
 - B) que las dietas experimentales son idénticas en composición, salvo por maíz con diferente densidad que reemplaza al maíz estándar en una proporción igual y
 - C) que las diferencias observadas en el contenido de la ED de las dietas son, por tanto, un resultado directo de las diferencias del contenido de la ED de los cereales que reemplazan al maíz en las dietas experimentales.

Dado que el maíz quebrado contiene 3.88 Mcal/kg de ED, el valor de ED de los cereales probados se puede calcular de la siguiente manera:

- ED, Mcal/kg del cereal prueba = [(ED observada para cada una de las dietas con el maíz a diferente densidad- ED observada para la dieta con maíz estándar)/0.7720] + 3.88.
 - Donde ED del cereal prueba = ED de las dietas observadas para MHV 0.46, 0.41, 0.36, 0.31 y 0.26 kg/L
 - 3.88 = valor de ED (Mcal/kg) indicado para el maíz quebrado.(NRC, 1996)
 - 0.7720 = nivel de inclusión de maíz en las dietas.

Posteriormente, a partir del cálculo de ED derivada de la técnica de reemplazo (Zinn y Plascencia, 1993), se calculó la ENm y ENg mediante las siguientes fórmulas ($R^2=0.988$; NRC, 1984):

- $ENm = 0.736ED - 0.661$
- $ENg = 0.877ENm - 0.41$

El cálculo de la digestibilidad a nivel ruminal, posruminal y de tubo digestivo total de las fracciones del alimento se realizó mediante las proporciones de consumo de MS y cromo, así como de las proporciones de cromo determinadas en el quimo duodenal y materia fecal.

Análisis estadístico.

Experimento 1:

Los datos fueron analizados, para un diseño de cuadrado Latino 6x6, utilizando el siguiente modelo: $Y_{ijk}: u + A_i + P_j + T_k + E_{ijk}$. Donde Y_{ijk} es la variable de respuesta, A_i es el efecto del animal, P_j es el efecto del periodo, T_k es el efecto del tratamiento, E_{ijk} es el error residual (Hicks, 1973). Tanto el animal como el componente de error se consideraron aleatorios en el modelo. Se evaluaron diferentes estructuras de varianzas-covarianzas, tomando la mejor en base al menor valor para los criterios de Akaike y Schwarz (Littell *et al.*, 1996). Los efectos de los tratamientos se compararon empleando polinomios ortogonales (Kuehl, 2001). Los contrastes a evaluar son: 1) Quebrado vs. hojueado y 2) componentes lineales, cuadráticos y cúbicos para intensidad de procesado. Los análisis se realizaron utilizando el procedimiento MIXED de SAS (SAS Inst. Inc., Cary, NC). Las comparaciones se consideraron significativas cuando el valor de probabilidad fue ≤ 0.05 y como tendencia cuando el valor de P fue >0.05 y ≤ 0.10 .

Experimento 2:

Los datos fueron analizados, para un diseño de bloques al azar (criterio de bloqueo = periodo), utilizando el siguiente modelo: $Y_{ij} = \mu + \tau_i + P_j + \varepsilon_{ij}$, donde μ es el efecto común del experimento, τ_i es el efecto del i-ésimo tratamiento, P_j es el efecto del bloque y ε_{ij} es el error experimental. (Kuehl, 2001). Tanto el animal como el componente de error se consideraron aleatorios en el modelo. Se evaluaron diferentes estructuras de varianzas-covarianzas, tomando la mejor en base al menor valor para los criterios de Akaike y Schwarz (Littell *et al.*, 1996). Los efectos de los tratamientos se compararon empleando polinomios ortogonales (Kuehl, 2001) como en el experimento 1. Los análisis se realizaron utilizando el procedimiento MIXED de SAS (SAS Inst. Inc., Cary, NC). Las comparaciones se consideraron significativas cuando el valor de probabilidad fue ≤ 0.05 y como tendencia cuando el valor de P fue >0.05 y ≤ 0.10 .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Características Físico-Químicas del maíz.

Los efectos del procesamiento del maíz en relación a sus características físicas se muestran en el cuadro 8. La mayor concentración de partículas se encontró en el rango de $<16 \text{ mm}$ y $\geq 4 \text{ mm}$, encontrando para el MQS el 83.4% de las partículas y para el MHV $89.6\% \pm 3.34\%$ del total de las partículas. El tamaño de particular mayor a 4 mm en el porcentaje del total está en 30.38 (MQS) y desde 39.66 (MHV, 0.46 kg/L) hasta 53.71 (MHV, 0.31 kg/L) para los hojueados al vapor. El MQS presentó 10.95% del total de las partículas como finas (partículas $\leq 2 \text{ mm}$, % del total) y dentro del MHV el que tuvo menor cantidad de partículas finas fue el MHV 0.41 (2.56%) y el que presentó mayor cantidad de partículas finas fue el MHV 0.31 (6.64%). La media geométrica del tamaño de particular fue menor para el MQS comparado con el maíz procesado (MHV). El número de partículas por gramo de maíz fue 1.3 veces más alto para el MQS comparado con el promedio de los tratamientos, y el MHV 0.46 (286 partículas/g) fue 13 veces más alto en concentración de partículas por gramo que el MHV 0.41 que solo tuvo 22 partículas por gramo (Cuadro 8). En cuanto al área de superficie (cm^2/g), esta fue 45% más grande para el MQS comparado con el promedio de los procesamientos para el maíz (MHV), y dentro del MHV, el MHV 0.31 ($25 \text{ cm}^2/\text{g}$) fue 79% más alto que la menor de las superficies ($14 \text{ cm}^2/\text{g}$) representada por el MHV 0.41 .

Cuadro 8. Influencia del procesamiento sobre las características físicas del maíz.

Influencia del procesamiento en la características del maíz.

Concepto	Maíz Entero	MQS	MHV ¹				
			0.46	0.41	0.36	0.31	0.26
Grosor de la Hojuela, mm			2.93	2.63	2.21	1.75	1.23
Tamaño de partícula (mm), ² % total							
16	0	0	0	0	0	0	0
8 a 16	26.26	1.67	35.67	41.88	22.32	16.83	20.81
4 a 8	73.52	30.38	39.66	42.28	50.38	53.71	52.03
2 a 4	0.21	51.36	13.84	11.08	14.22	16.76	16.55
1 a 2	0	10.95	3.59	2.56	5.61	6.64	5.9
0.5 a 1	0	3.33	3.45	1.03	3.71	3.16	2.48
0.25 a 0.5	0	1.45	2.32	0.93	3.12	1.52	1.96
<0.25	0	0.85	1.47	0.23	0.65	1.38	0.27
Media geométrica del tamaño de partícula, µm	6776	2981	5147	6386	4578	4381	4776
Área de superficie, cm ² /g	9	31	23	14	24	25	21
Partículas/g	4	226	286	22	234	223	92
Desviación Geométrica Estándar.	1.36	1.96	2.54	1.95	2.37	2.32	2.12

¹ Maíz hojueleado al vapor, procesado a densidades de 0.46, 0.41, 0.36, 0.31 y 0.26 kg/L.

² Características físicas del maíz a partir de los tratamientos procesados.

Las características químicas del maíz utilizado en las pruebas se muestran en el cuadro 9. La composición química de las muestras del maíz promedió 92.29 ± 0.01 ; 8.05 ± 0.003 ; 76.97 ± 0.03 ; 7.36 ± 0.01 y $1.27 \pm 0.002\%$ para MS, PC, almidón, FDN y cenizas, respectivamente (Cuadro 9). Los valores observados fueron notablemente más bajos que para los valores tabulares (NRC, 1996) para PC (9.8%) y FDN (10.8%), reflejando una condición genética y dependiendo del tipo de híbrido utilizado (Corona *et al.*, 2006). La proporción de almidón fue de 73.67 para el maíz quebrado en seco (MQS) y en promedio de 77.63 para los tratamientos de maíz hojueado al vapor (MHV, 0.46, 0.41, 0.36, 0.31 y 0.26 kg/L). El promedio de contenido de almidón determinado aquí fue 3.8 y 9.3 % respectivamente mayor al promedio (71%) informado por Zinn *et al.* (2002) en la evaluación de 49 híbridos de maíz amarillo producido por la empresa Pioneer, pero se encuentra dentro del rango de 61 a 78% especificado por White y Pollack (1995). La variación del contenido de almidón está estrechamente relacionada con el tipo de híbrido en cuestión, y el procesamiento térmico al que es sometido el maíz hojueado al vapor, incrementa aparentemente su contenido de almidón (Drager *et al.*, 2002; Hales *et al.*, 2010a). Últimamente se busca más contenido de almidón aunque el nivel de proteína en el grano se vea disminuido hasta en 5% (Corona *et al.*, 2006). Comparado con el maíz MQS, las muestras de MHV tuvieron más baja concentración de PC (8.30 vs. 7.99%), digestión del almidón insoluble (DAI) (60.10 vs 52.31) así como de cenizas (1.30 vs 1.27), pero más alta concentración de almidón (73.67 vs 77.63%), FDN (6.56 vs 7.52%), ARA (10.04 vs 21.73%) y digestión ruminal estimada (70.13 vs 74.05). Ya que la destrucción física de nutrientes específicos durante el hojueado es poco probable, esta diferencia está asociada probablemente con la producción de partículas finas durante el hojueado.

La digestibilidad ruminal *in-vitro* del almidón promedió 70.13 y 74.05 para MQS y MHV, respectivamente (Cuadro 9). Estos valores están de acuerdo con el promedio de las mediciones *in-vivo* para MQS y MHV (71.3 y 79.34%, respectivamente (Cuadro 10) para el experimento 1. La predicción ruminal de la digestión *in vitro* (PDR) del almidón está determinada por densidad de la hojuela en MHV ($r^2 = 0.98$, $P < 0.01$;

Figura 9). La relación entre la digestión del almidón *in vivo* (Cuadro 10) y la PDR fue alta ($r^2 = 0.765$, $P < 0.05$, Figura 10). Previamente, Rodríguez *et al.* (2001) observaron una relación del 78% ($P < 0.05$) entre la digestión ruminal *in vivo* y la PDR; en el mismo sentido Corona *et al.* (2006) observaron una relación muy alta entre la digestión del almidón *in vivo* y la PDR ($r^2 = 0.90$, $P < 0.01$).

Cuadro 9. Composición química y digestión enzimática del maíz de cada uno de los tratamientos.¹

Concepto	MQS	MH				
		0.46	0.41	0.36	0.31	0.26
MS, %	91.35	93.64	92.48	91.77	91.30	93.25
PC(N x 6.25), % de MS	8.30	8.13	8.27	8.15	7.89	7.53
Almidón, % de MS	73.67	78.80	75.16	75.27	70.19	79.73
FDN, % de MS	6.56	7.13	7.69	7.80	8.08	6.90
Cenizas, % de MS	1.30	1.50	1.41	1.31	1.23	0.90
Almidón soluble (ARA) ² , %	10.04	13.03	13.16	20.38	27.97	34.14
Digestión del almidón insoluble (DAI) ³ , %	60.10	57.18	58.50	54.20	48.35	43.35
Predicción de la digestión ruminal ⁴ , %	70.13	70.21	71.65	74.58	76.31	77.49

¹ Tratamientos = Maíz quebrado en seco vs diferentes densidades de maíz hojueleado al vapor (0.46, 0.41, 0.36, 0.31, 0.26 kg/L).

² ARA = Almidón reactivo a la amiloglucosidasa, medición de solubilización del almidón. El maíz fue molido y pasado a través de una malla No. 20 antes del proceso de digestión enzimática de 4 hrs. (Zinn, 1990a).

³ DAI= Digestión del almidón insoluble, reactividad de la amilasa al almidón insoluble. El maíz fue molido y pasado a través de una malla No. 20 antes del proceso de digestión enzimática de 6 hrs. (Rodríguez *et al.*, 2001).

⁴ Predicción de la digestión ruminal del almidón, (1.32ARA +.93DAI).

Figura 9. Relación entre la predicción de la digestión ruminal del almidón (PDR, %) y la densidad de la hojuela (DH, mm).

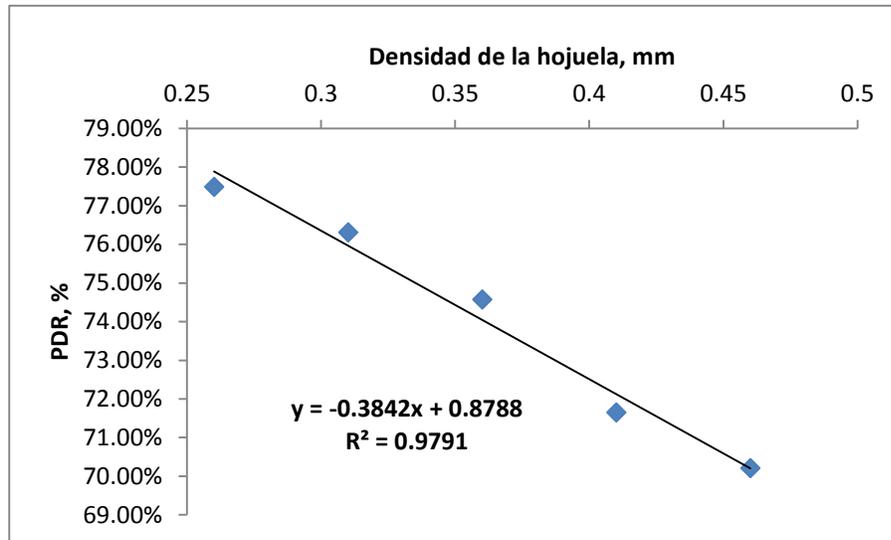
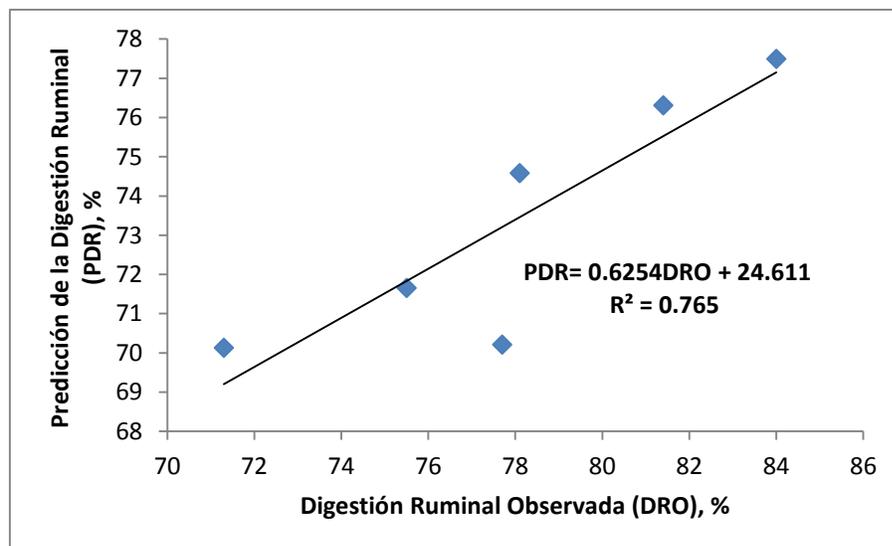


Figura 10. Relación entre la predicción de la digestión ruminal del almidón (PDR, %) y la digestión ruminal del almidón observada (DRO, %).



Digestión de nutrientes (Experimento 1, Cuadro 10).

Tipo de procesamiento en el maíz (maíz en hojuela vs. maíz quebrado).

Como se observa en el cuadro 10, El proceso de hojueleado del maíz (MHV) no afectó ($P = 0.65$) la digestión ruminal de N, promediando 61.8%, lo cual es consistente con estudios previos (Zinn, 1990a; Zinn *et al.*, 1995; Plascencia y Jose Maria, 2007; Zinn *et al.*, 2008). La fracción de proteína del maíz que no es degradable en rumen no es afectada por el hojueleado. La eficiencia microbiana a nivel ruminal promedió 24.6 g N kg⁻¹ de MO fermentada en rumen y no fue afectada ($P = 0.29$) por el tipo de procesamiento, donde se presentó 23.87 y 24.83 para quebrado y hojueleado respectivamente. De acuerdo al modelo nivel 1 de la NRC (1996), el promedio de la eficiencia microbiana esperada es de 23.0 N kg⁻¹ de MO fermentada (21.4 y 24.6 para quebrado y hojueleado respectivamente) siendo consistente con los resultados observados. Para la eficiencia proteica (g de NNA en duodeno/g de N consumido), fue mayor para MHV (11.92%, $P < 0.01$) respecto a MQS se encontró efecto de procesamiento. En trabajos anteriores se han reportado resultados diversos, en algunos no han detectado diferencias en la eficiencia proteica como causa del tipo de procesamiento (Corona *et al.*, 2006; Plascencia y Jose Maria, 2007), pero en otros estudios (Zinn *et al.*, 1995; Barajas y Zinn, 1998) se informa efecto del tipo de procesamiento (hojueleado vs. quebrado) sobre esta variable. En los casos donde se informa un aumento en la eficiencia como causa del procesamiento, fue resultado del incremento de síntesis de N microbiano en relación al aumento de la digestión de la MO en rumen.

El MHV incrementó (12.1%, $P < 0.01$) la digestión ruminal de la MO. Generalmente el maíz en hojuela mejora la digestión ruminal de la MO como consecuencia del aumento en la digestión de almidón (Owens, 2005). Comparado con el maíz quebrado, la digestión ruminal del almidón, fue mayor (11.28%, $P < 0.01$) para el maíz hojueleado. La digestión ruminal observada en este estudio para el maíz hojueleado se encuentra entre los rangos de 80 y 85% reportados por Zinn *et al.*

(2002) y Huntington (1997). Por otro lado, en dietas de finalización para ganado de engorda, la digestión ruminal para el maíz quebrado se encuentra en el rango del 68 al 76% (Zinn, 1990a; Zinn *et al.*, 1995; Cooper *et al.*, 2002; Corona *et al.*, 2006; Plascencia y Jose Maria, 2007) con un promedio de 71.5%. El maíz hojueado mostró una mayor digestión postruminal ($P < 0.01$) del almidón, MO, FDN y N tomando como base el % de cada nutriente que llega a duodeno. El aumento en la digestión postruminal con el procesado de hojuela es consistente con otros informes (Zinn *et al.*, 1995; Barajas y Zinn, 1998; Zinn *et al.*, 2008) y ha sido ampliamente discutido (Theurer, 1986; Zinn *et al.*, 2002; Harmon *et al.*, 2004). El incremento en la digestibilidad de la MO es reflejo directo del aumento en la digestión del almidón y N en este sitio. Sin embargo tomando como base el porcentaje de lo que el animal consumió, solo el N y la FDN tuvieron mejor digestión postruminal ($P < 0.01$), mientras que la MO y el almidón no reflejaron mejoras ($P = 0.48$ y $P = 0.57$, respectivamente) lo cual es consistente con trabajos previos (Theurer *et al.*, 1999; Zinn, 1990a)

La digestión a nivel del tubo digestivo total fue mayor ($P < 0.01$) para MO, almidón y N ($P < 0.05$) para las dietas que contenían maíz hojueado. La digestión del almidón en tubo digestivo total fue de 95.9, 97.3, 98.5, 99.5 99.7 y 91.4% para maíz hojueado (DH= 0.46, 0.41, 0.36, 0.31, 0.26 kg/L) y maíz quebrado respectivamente. El valor de digestibilidad a nivel del total del tubo digestivo para el maíz quebrado es un poco mayor ($\pm 6\%$) al informado por Corona *et al.* (2006), por Zinn *et al.* (2008) y por Owens y Zinn (2005). De igual forma el valor observado para maíz hojueado fue consistente a los valores observados en estudios previos (Zinn *et al.*, 2002; Owens y Zinn, 2005; Corona *et al.* 2006). Resultados de una serie de experimentos publicados en un periodo de 9 años indican que el hojuear el grano de maíz incrementa en promedio 7 unidades porcentuales (99 vs. 92%) la digestión del almidón a nivel del total del tubo digestivo (Huntington, 1997), lo que se traduce en una mejora de la energía del grano (TND) de 5.7% cuando es hojueado. Excluyendo los cambios que mejoran la utilización de la energía del grano dado por los aumentos de la digestión de los componentes libres de almidón (N y la parte de MO que no constituye el almidón, así como la disminución en la producción de

metano) se puede calcular el cambio en el valor del total de nutrientes digestibles (TND) a través de la fórmula expresada por Zinn *et al.* (2002) la cual indica: la mejora en el contenido de TND, % = $[(DTTMHV - DTTMQS) * 0.7697] / 0.88$, donde DTTMHV=0.959, 0.973, 0.985, 0.995 0.997 y DTTMQS=0.914 es la digestión del almidón observada a nivel de tubo digestivo total, 0.7697 es el contenido de almidón del grano y 0.88 es el valor de TND especificado por la NRC (1996) para el maíz quebrado. De tal forma que el hojuelear el maíz amarillo se traduce en una mejora del 3.9%, 5.2% 6.2%, 7.1% y 7.3% siendo el incremento promedio de $5.94 \pm 1.41\%$ donde este valor es 4% más conforme a lo esperado (5.7%). Por otra parte, Zinn *et al.* (2002) observaron la siguiente relación ($r^2 = 0.88$) entre la digestibilidad del almidón a nivel del total del tubo digestivo y la ENm del maíz: ENm del maíz, Mcal/kg = $-0.75 + 0.032 DTA$, donde DTA = digestión total del almidón. Aplicando lo anterior a los valores de 95.9, 97.3, 98.5, 99.5 99.7 y 91.4 % observados para MHV y MQS respectivamente, entonces se concluyó que MHV 46=2.31, MHV 41=2.36, MHV 36=2.40, MHV 31=2.43, MHV 26=2.44 Mcal/kg de ENm respectivamente, mientras que MQS aportó 2.17 Mcal/kg ENm. Estos valores representan el 0.99, 1.01, 1.03, 1.04, 1.06 y 0.97 a los valores expresados en el NRC (1996) para el maíz hojueleado y el maíz quebrado respectivamente. Los estándares actuales (NRC, 1996) indican una mejora en la ENm de 4% cuando el maíz es hojueleado, mientras que en el presente estudio se observó una mejora del 6.45%, 8.8%, 10.6%, 11.98%, y 12.44% siendo este dato en promedio (10.05%, $\pm 2.46\%$) 2.5 veces más que los datos tabulares (4%; NRC, 1996), mientras que es 1.4 veces menor que para lo estimado por Zinn *et al.*, (2002) quienes consideran que existe una mejora del 14.2%.

La intensidad de procesado del MHV:

Grado de procesado del MHV:

Al disminuir la densidad de la hojuela en MHV se incrementó (efecto lineal, $P < 0.01$) la digestión ruminal del almidón, de la FDN y el porcentaje de eficiencia proteica; así como la digestión postruminal del almidón que salió del abomaso y la digestión del almidón en el tubo digestivo total. La digestión ruminal de la MO y la digestión postruminal del N como % de lo consumido (efecto lineal, $P < 0.05$) también se incrementó conforme se disminuyó la densidad de la hojuela. Así como la digestión postruminal de la FDN consumida y la digestión de la MO (efecto lineal, $P < 0.10$) en el tubo digestivo total.

La eficiencia microbiana se incrementó hasta una densidad de 0.36, pero con menor densidad disminuyó (efecto cuadrático, $P < 0.10$).

Cuadro 10. Efecto de la densidad de la hojuela sobre las características de la digestión en el ganado (Experimento 1).

Descripción	MQS ²	MHV ¹					EEM ³
		0.46	0.41	0.36	0.31	0.26	
Consumo, g/d							
MS	3,389	3,438	3430	3,418	3,406	3,445	
MO	3,228	3,275	3,267	3,254	3,244	3,281	
FDN	420	426	425	424	422	427	
Almidón	1,803	1,829	1,825	1,818	1,812	1,833	
N	60.7	61.5	61.4	61.2	61.0	61.7	
Flujo a Duodeno, g/d							
MO ^{4,5}	1,926	1,777	1,899	1,872	1,731	1746	63.5
FDN ^{6,7}	237.4	264.8	336.9	327.9	321.9	368.2	25.5
Almidón ^{6,7}	511.8	421.7	442.7	401.0	338.5	287.5	55.1
N- No amoniacal ^{6,7}	63.4	68.8	69.7	72.9	74.4	73.2	1.5
N Microbiano ^{6,7}	41.1	46.2	44.7	48.0	51.7	50.1	1.9
N Consumido	22.2	22.5	25.0	24.9	22.7	23.09	2.1
Digestión ruminal, %							
MO ^{6,8}	53.2	60.3	55.6	57.3	62.6	62.4	1.9
FDN ^{5,6,7}	43.7	38.3	21.1	22.4	24.0	16.1	5.2
Almidón ^{6,7}	71.3	77.7	75.5	78.1	81.4	84.0	2.8
N consumido	63.2	63.6	59.4	59.5	63.0	63.7	3.3
Eficiencia Microbiana ^{9,10}	23.9	23.6	24.6	25.9	25.4	24.6	1.0
Eficiencia Proteica ^{6,7}	1.04	1.11	1.13	1.19	1.21	1.18	0.02
Excreción fecal, g/d							
MO ^{6,11}	835.6	692.0	690.6	650.6	665.0	621.5	33.8
FDN	213.4	208.6	206.3	224.3	239.7	213.2	15.7
Almidón ^{6,7}	158.2	80.2	52.2	29.1	9.4	6.1	18.4
N ⁴	21.5	16.8	19.6	18.6	18.4	17.4	1.7
Digestión postruminal, % de nutriente que sale de abomaso							
MO ⁶	61.3	65.9	68.6	70.1	67.0	69.7	2.0
FDN ^{6,12}	7.12	20.5	37.6	29.5	20.4	37.3	8.1
Almidón ^{6,7}	68.8	84.0	89.1	93.4	97.3	98.0	3.3
N ⁶	67.4	77.0	73.2	75.2	76.0	76.9	2.7

Cuadro 10. Efecto de la densidad de la hojuela sobre las características de la digestión en el ganado (Experimento 1, continuación).

Digestión postruminal, % de lo que el animal consumió.

MO ¹⁰	36.4	35.5	39.8	40.4	35.7	36.9	1.9
FDN ^{6,11}	5.8	13.2	30.8	25.0	20.33	34.6	6.2
Almidón	20.1	18.2	21.7	20.4	18.0	15.7	2.5
N ^{6,8}	73.2	88.4	86.0	93.3	95.7	94.2	3.7

Digestión en el total del tubo digestivo, %

MO ^{6,11}	76.9	81.6	81.7	82.8	82.5	83.9	1.1
FDN	49.5	51.5	51.9	47.4	44.3	50.8	3.6
Almidón ^{6,7}	91.4	95.9	97.3	98.5	99.5	99.7	0.9
N ⁴	64.8	72.9	68.6	69.7	70.1	71.9	2.8

¹ MHV = Dieta a base de maíz hojueado al vapor (0.46, 0.41, 0.36, 0.31 y 0.26 kg/L).

² MQS = Dieta a base de maíz quebrado en seco

³ Error Estándar de la Media

⁴ Efecto del procesamiento del maíz, $P < 0.05$.

⁵ Efecto cúbico, densidad de la hojuela, $P < 0.10$.

⁶ Efecto del procesamiento del maíz, $P < 0.01$.

⁷ Efecto lineal, densidad de la hojuela, $P < 0.01$

⁸ Efecto lineal, densidad de la hojuela, $P < 0.05$.

⁹ N Microbiano g/kg of MO fermentada.

¹⁰ Efecto cuadrático, densidad de la hojuela, $P < 0.10$.

¹¹ Efecto lineal, densidad de la hojuela, $P < 0.10$

¹² Efecto cúbico, densidad de la hojuela, $P < 0.05$.

Digestión de nutrientes (Experimento 2, Cuadro 11).

Tipo de procesamiento en el maíz (maíz en hojuela vs. maíz quebrado).

La digestión a nivel del total del tubo digestivo fue mayor ($P < 0.01$) para el almidón y para la MO ($P < 0.05$) en las dietas que contenían MHV, pero no hubo diferencia en la digestibilidad del N ($P = 0.49$), observando el mismo efecto para la digestión del almidón que en el experimento 1. La digestión del almidón en el tubo digestivo total fue de 94.9, 93.2, 97.05, 97.5 99.4 y 87.6% para el maíz hojueleado (DH= 0.46, 0.41, 0.36, 0.31, 0.26 kg/L) y maíz quebrado respectivamente. El valor para maíz quebrado es aproximadamente un 2% mayor al informado por Corona *et al.* (2006), por Zinn *et al.* (2008) y por Owens y Zinn (2005). De igual forma el valor observado para maíz hojueleado fue consistente a los valores observados en estudios previos (Zinn *et al.*, 2002; Owens y Zinn, 2005; Corona *et al.*, 2006). Resultados de una serie de experimentos publicados en un periodo de 9 años indican que el hojuelear el grano de maíz incrementa en promedio 7 unidades porcentuales (99 vs. 92%) la digestión del almidón a nivel del total del tubo digestivo (Huntington, 1997), lo que se traduce en un aumento de energía del grano (TND) de 5.7% cuando es hojueleado. Excluyendo los cambios que mejoran la utilización de la energía del grano dado por los aumentos de la digestión de los componentes libres de almidón (N y la parte de MO que no constituye el almidón, así como la disminución en la producción de metano) se puede calcular el cambio en el valor del total de nutrientes digestibles (TND) a través de la fórmula expresada por Zinn *et al.* (2002) la cual se expresa: mejora en el contenido de TND, % = $[(DTTMHV - DTTMQS) * 0.7697] / 0.88$, donde DTTMHV=0.949, 0.932, 0.971, 0.975 0.994 y DTTMQS=0.876 es la digestión del almidón observada a nivel del total del tubo digestivo, 0.7697 es el contenido de almidón del grano y 0.88 es el valor de TND especificado por la NRC (1996) para el maíz quebrado. De tal forma que el hojuelear el maíz amarillo se traduce en un aumento de 6.4%, 4.9% 8.3%, 8.7% y 10.3% ($7.73 \pm 2.1\%$, promedio) siendo 1.36 veces mayor conforme a lo esperado (5.7%). Por otra parte, Zinn *et al.* (2002) observaron la siguiente relación ($r^2 = 0.88$) entre la digestibilidad del almidón a nivel

del total del tubo digestivo y la ENm del maíz: $ENm \text{ del maíz, Mcal/kg} = -0.75 + 0.032 \text{ DTA}$, donde DTA = digestión del almidón en el total del tubo digestivo. Aplicando lo anterior a los valores de 94.9, 93.2, 97.05, 97.5 99.4 y 87.6 % observados para MHV y MQS respectivamente, entonces se obtiene que MHV contiene MHV 46=2.28, MHV 41=2.23, MHV 36=2.36, MHV 31=2.37, MHV 26=2.43 Mcal/kg de ENm respectivamente, mientras que MQS aporta 2.05 Mcal/kg ENm. Estos valores representan el 0.98, 0.96, 1.01, 1.02, 1.04 y 0.94 a los valores expresados en el NRC (1996) para el maíz hojueado y el maíz quebrado, respectivamente. De nueva cuenta, los estándares actuales (NRC, 1996) indican un aumento en la EN de 4% cuando el maíz amarillo es hojueado, mientras que en el presente estudio se observó un aumento del 11.2%, 8% 15.1%, 15.6%, y 18.5% siendo este dato en promedio (13.68, $\pm 4.1\%$) cercano al reportado por Zinn et al., (2002) en el cual considera que existe un aumento del 14.2% pero siendo más del triple comparado con los datos tabulares (NRC, 1996) y 1.36 veces más comparado con lo observado en el Experimento 1.

En el caso de la estimación de la energía digestible (ED Mcal/kg) de las dietas para cada tratamiento, estas se determinaron a partir del análisis en la bomba calorimétrica los siguientes resultados:

- MQS= 3.0 Mcal/kg.
- MHV0.46= 3.23 Mcal/kg.
- MHV0.41= 3.12 Mcal/kg.
- MHV0.36= 3.19 Mcal/kg.
- MHV0.31= 3.07 Mcal/kg.
- MHV0.26= 3.20 Mcal/kg.
- **PROMEDIO= 3.14 Mcal/kg.**

Posterior a esto se determinó el valor de ED (Mcal/kg) para cada uno de los tratamientos mediante la técnica de reemplazo (Zinn y Plascencia, 1993) observando los siguientes resultados:

- MHV0.46= 4.18 Mcal/kg.
- MHV0.41= 4.04 Mcal/kg.
- MHV0.36= 4.13 Mcal/kg.
- MHV0.31= 3.97 Mcal/kg.
- MHV0.26= 4.14 Mcal/kg.
- **PROMEDIO= 4.09±0.09 Mcal/kg.**

Una vez que se determinó el valor de la ED (Mcal/kg), se estimó el valor de energía neta de mantenimiento (ENm Mcal/kg) para cada uno de los tratamientos mediante la fórmula tabular ($R^2=0.988$; NRC, 1984), observando los siguientes resultados:

- MHV0.46= 2.41 Mcal/kg.
- MHV0.41= 2.31 Mcal/kg.
- MHV0.36= 2.37 Mcal/kg.
- MHV0.31= 2.26 Mcal/kg.
- MHV0.26= 2.39 Mcal/kg.
- **PROMEDIO= 2.35±0.06 Mcal/kg.**

Al finalizar se calculó el valor de energía neta de ganancia (ENg Mcal/kg) para cada uno de los tratamientos mediante la fórmula tabular ($R^2=0.988$; NRC, 1984), determinando lo siguiente:

- MHV0.46= 1.71 Mcal/kg.
- MHV0.41= 1.62 Mcal/kg.
- MHV0.36= 1.67 Mcal/kg.
- MHV0.31= 1.57 Mcal/kg.
- MHV0.26= 1.68 Mcal/kg.
- **PROMEDIO= 1.65±0.05 Mcal/kg.**

Los estándares actuales (NRC, 1996) indican un aumento en la ENm de 4% cuando el maíz es hojueado.

Mientras que en el presente estudio se observó, a partir de la técnica de reemplazo, un incremento promedio de 5% para ENm (2.24 Mcal/kg, NRC 1996 vs 2.35 Mcal/kg presente estudio) y 6.5% para ENg (1.55 Mcal/kg, NRC 1996 vs 1.65 Mcal/kg del presente estudio), siendo 2.5 veces menor conforme a lo que reportado por Zinn et al., (2002) quienes consideran que existe un aumento del 12.4% y 16% respectivamente, pero siendo sólo 1.3 veces mayor conforme a los valores tabulares de NRC (1996).

Por otra parte si comparamos los valores de ENm y ENg con los que establecen los valores tabulares (NRC, 1996), confirmamos que estos son consistentes, 2.35 vs 2.33 para ENm y 1.65 vs 1.62 para ENg.

La intensidad de procesado del MHV:

La intensidad de procesado en el MHV (DH= 0.46, 0.41, 0.36, 0.31, 0.26 kg/L) afectó linealmente ($P < 0.01$) la digestión del almidón en el total del tubo digestivo y de la FDN, siendo consistente con el experimento 1 en el caso del almidón. En este caso no hubo efecto de ningún tipo en la digestión a nivel del total del tubo digestivo de la MO ni del N.

Cuadro 11. Efecto de la densidad de la hojuela sobre las características de la digestión del tubo digestivo total en el ganado (Experimento 2).

Descripción	MQS ²	MHV ¹					EEM ³
		0.46	0.41	0.36	0.31	0.26	
Consumo, g/d							
MS	3,675	3,675	3,675	3,675	3,675	3,675	
MO	3,486	3,482	3,483	3,486	3,494	3,497	
FDN	376	392	407	410	418	385	
Almidón	2,064	2,237	2,135	2,114	2,248	2,263	
N	63.7	62.9	63.6	63.0	61.8	60.2	
EB (Mcal/d)	15.0	15.0	15.1	15.1	14.9	14.8	
Excreción fecal, g/d							
MO ⁴	837.0	628.5	730.1	671.9	758.7	631.8	51.66
FDN ^{4,5}	205.9	208.1	241.4	252.9	316.9	270.8	21.19
Almidón ^{5,6}	257.1	113.5	145.4	63.7	56.7	12.8	23.5
N	21.2	18.6	20.7	19.3	21.5	18.8	1.32
EB (Mcal/d) ^{4,7}	4.0	3.1	3.6	3.3	3.7	3.0	0.22
Digestión en el total del tubo digestivo, %							
MO ⁴	76.0	81.9	79.0	80.8	78.3	81.9	1.45
FDN ⁵	45.3	46.8	40.7	38.5	23.9	29.3	5.45
Almidón ^{5,6}	87.6	94.9	93.2	97.0	97.5	99.4	1.08
N	66.7	70.3	67.5	69.5	65.3	68.7	2.08
ED ^{4,7}	73.3	79.1	76.0	78.0	75.5	79.4	1.44
ED(Mcal/kg)	3.0	3.2	3.1	3.2	3.0	3.2	0.06

¹ MHV = Dieta a base de maíz hojueleado al vapor (0.46, 0.41, 0.36, 0.31 y 0.26 kg/L).

² MQS = Dieta a base de maíz quebrado en seco

³ Error Estándar de la Media

⁴ Efecto del procesamiento del maíz, $P < 0.05$

⁵ Efecto lineal, densidad de la hojuela, $P < 0.01$

⁶ Efecto del procesamiento del maíz, $P < 0.01$

⁷ Efecto cuadrático, densidad de la hojuela, $P < 0.1$

Relación entre las características físico-químicas de los tratamientos y la digestibilidad del almidón observada de los tratamientos.

Existe una relación directa entre la intensidad del procesamiento y el grosor de la hojuela (Zinn, 1994) y una la relación inversa entre la intensidad del procesamiento y la densidad (masa/volumen) del grano (Zinn, 1990a) generalmente, a mayor intensidad de procesamiento con vapor, es mayor la digestión del almidón y menor el pH ruminal (Plascencia y Zinn, 1996; Theurer et al., 1999).

La relación entre el grosor de la hojuela (GH, mm) y la densidad de la hojuela (DH, kg/L) no es tan estrecha ($r^2=0.74$; $DH=0.042 + 0.14GH$), esto es debido a que la densidad de la hojuela puede variar con el grado de presencia de finos presentes con la hojuela (Zinn, 1990b).

La densidad de la hojuela es el estándar de calidad más usado en el hojueleado del maíz al vapor. Esto porque puede ser medido inmediatamente al salir de la máquina roladora, justo debajo de los rodillos y de esta manera ajustar la densidad de la hojuela que se busca, en el mismo instante de hacer la medición (Zinn et al., 2002). Además, la densidad de la hojuela está altamente relacionada con los cambios en la solubilidad del almidón ($r^2= 0.76$) y la reactividad enzimática ($r^2= 0.79$) (Zinn et al., 2002).

Basados en la densidad de la hojuela (DH, kg/L), se encontró que la digestibilidad del almidón a nivel del total del tubo digestivo fue: $(DATT, \%)=96.5 + 30.2DH - 68.6DH^2$ (Fig. 11, $r^2= 0.99$) y la digestibilidad del almidón en rumen $(DAR, \%) = 92.5 - 36.6DH$ (Fig. 12, $r^2= 0.76$). Estos datos difieren en gran medida de los observados por Zinn et al. en 2002, donde determinaron, a partir de 64 experimentos que la densidad de la hojuela solo explica el 22 % de la variación en la digestión ruminal del almidón $(DAR, \%)= 118.9 - 109.3DH$; $r^2=0.22$) y sólo el 52% de la digestión del almidón a nivel del total tubo digestivo $(DATT, \%)= 107 - 25.6DH$; $r^2=0.52$).

Figura 11. Relación entre la digestibilidad del almidón en el tubo digestivo total (DATT, %) y la densidad de la hojuela (DH, kg/L).

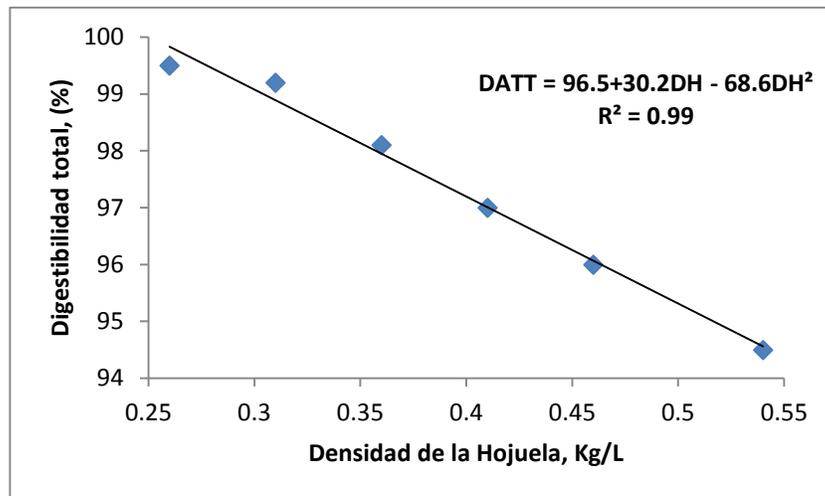
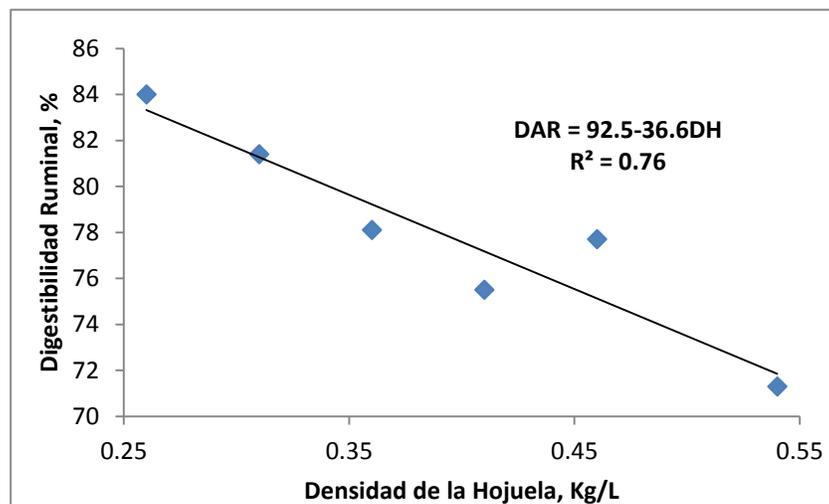


Figura 12. Relación entre la digestibilidad del almidón en rumen (DAR, %) y la densidad de la hojuela (DH, kg/L).



Basados en el grosor de la hojuela (GH, mm), se encontró que la digestión del almidón en el tubo digestivo total fue: $(DATT, \%) = 97.1 + 3.77GH - 1.43GH^2$ (Fig. 13, $r^2 = 0.99$) y la digestión del almidón en rumen $(DAR, \%) = 88.9 - 4.45GH$ (Fig. 14, $r^2 = 0.83$)

Figura 13. Relación entre la digestibilidad del almidón en el tubo digestivo total (DATT, %) y el grosor de la hojuela (GH, mm).

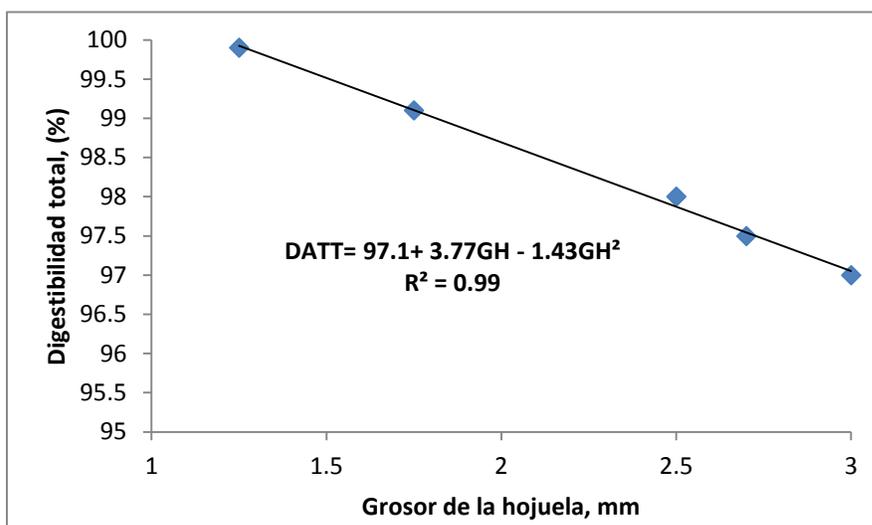
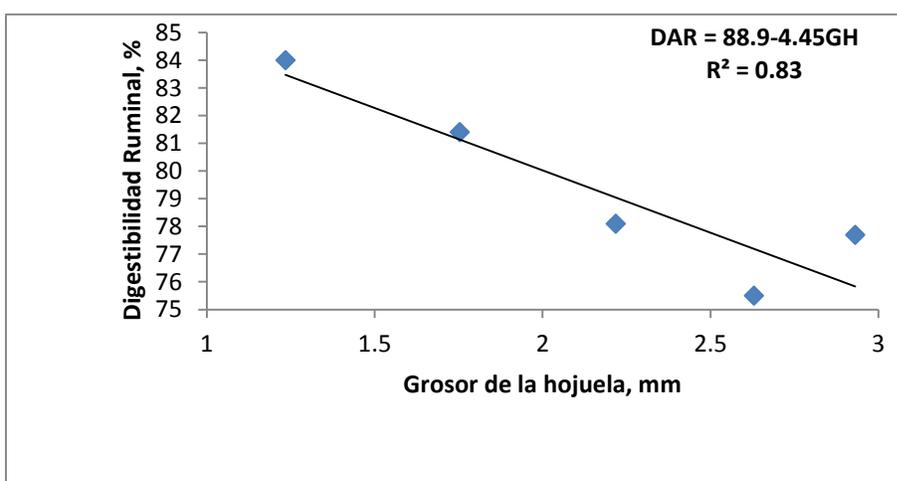


Figura 14. Relación entre la digestibilidad del almidón en el rumen (DAR, %) y el grosor de la hojuela (GH, mm).



En relación a la reactividad de la amiloglucosidasa (RAG,%), se encontró que la digestión del almidón en el tubo digestivo total fue: (DATT, %) = $90.9 + 0.695 \text{ RAG} - 0.0138 \text{ RAG}^2$ (Fig. 15, $r^2= 0.91$) y la digestión del almidón en rumen fue: (DAR, %) = $72.0 + 0.43\text{RAG}$ (Fig. 16, $r^2= 0.94$).

Figura 15. Relación entre la digestibilidad del almidón en el tubo digestivo total (DATT, %) y el almidón reactivo a la amiloglucosidasa (ARA, %).

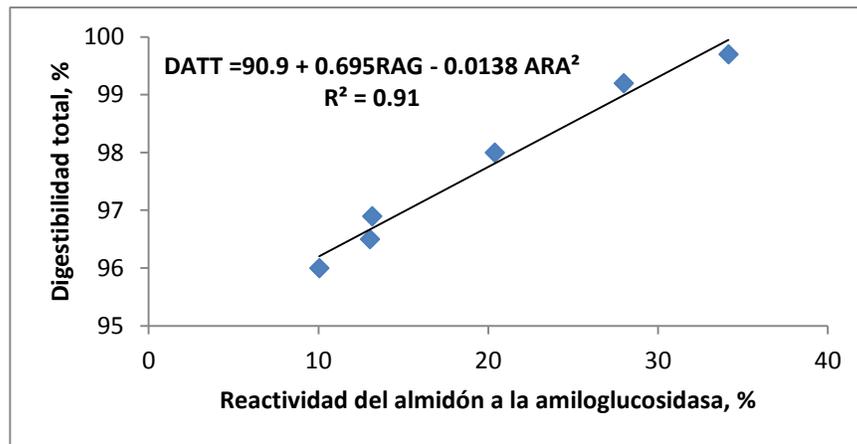
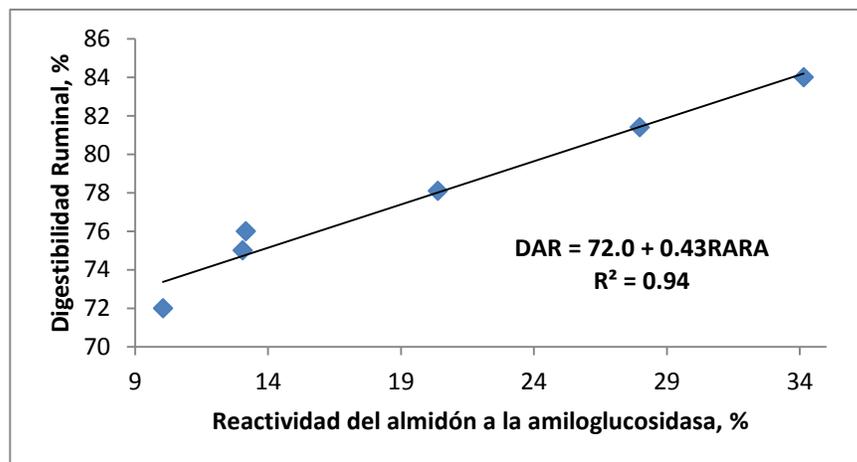


Figura 16. Relación entre la digestibilidad del almidón en el rumen (DAR, %) y el almidón reactivo a la amiloglucosidasa (ARA, %).



Mientras que basado en el almidón fecal (AF, g/d), la digestión del almidón en tubo digestivo total fue: (DATT, %) = 100.0 – 0.40 AF (Fig. 17, $r^2= 1.00$) y la digestión del almidón en rumen fue: (DAR, %) = 85.9 – 2.88AF + 0.204 AF² (Fig 18, $r^2= 0.97$).

Zinn *et al.* (2007) mencionan que cuando el grano es la principal o única fuente de almidón en la dieta, la concentración del almidón fecal (AF, % de MS) en los novillos de engorda, puede servir como un indicador de la digestión total del almidón (DATT, % de consumo=100.5 – 0.6489AF; n=64, $r^2=0.91$; Zinn *et al.*, 2002). Esta relación tan cercana entre el AF y DTA se confirmó por Corona *et al.* (2005); DATT=102.4 – 0.72AF; n=16, $r^2=0.97$) y comparado con los resultados del presente experimento se observó que este resultado es consistente con los observados por Zinn *et al.* (2007) y por Corona *et al.* (2005).

Figura 17. Relación entre la digestibilidad del almidón en el tubo digestivo total (DATT, %) y el almidón fecal (AF, % MS).

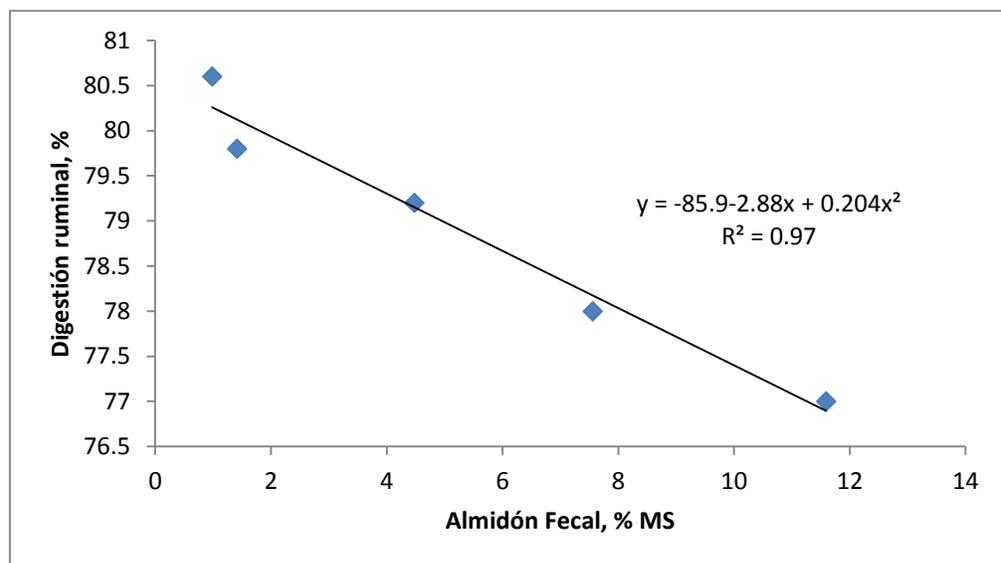
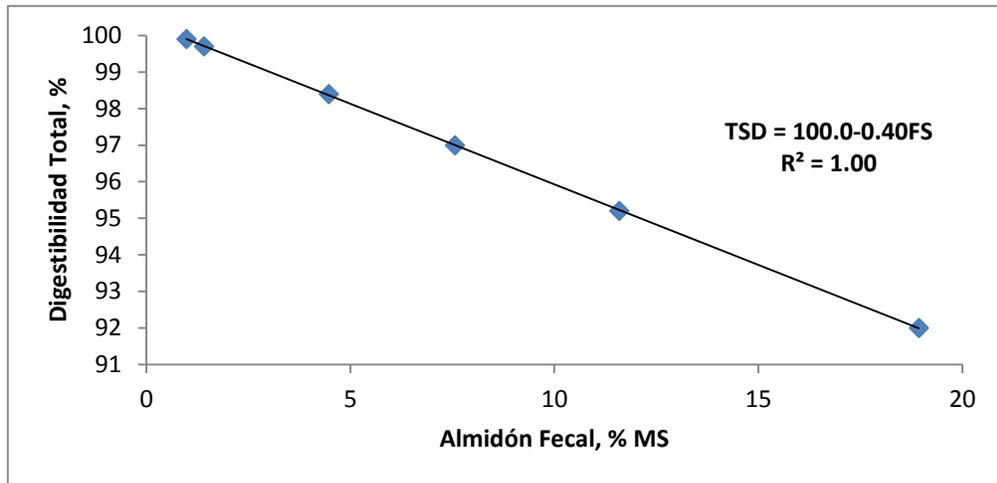


Figura 18. Relación entre la digestibilidad del almidón en el rumen (DAR, %) y el almidón fecal (AF, % MS).



CONCLUSIONES.

1. Comparado con dietas que contienen MQS, en las dietas con MHV se observó un incremento en la digestión del almidón ruminal (11.28%, $P<0.01$), postruminal (34.24%, $P<0.01$) y de tubo digestivo total (7.42%, $P<0.01$).
2. La densidad óptima está entre 0.36 y 0.31 kg/L, ya que a 0.26 disminuye la eficiencia microbiana hasta en un 5.28% ($P<0.10$), eficiencia proteica (2.54%, $P<0.01$) y la digestión ruminal de la MO (0.32%, $P<0.05$) y de la FDN (49.7%, $P<0.01$). Pero con base a la excreción fecal del almidón 0.31 es la densidad más adecuada.
3. Al disminuir la densidad de la hojuela del MHV de 0.46 kg/L hasta 0.26 kg/L se incrementa la digestión del almidón *in vivo* hasta un 3.96% ($P<0.01$) e *in vitro* hasta en un 10.37%.
4. El proceso de hojueleado del maíz incrementa $6.83\pm 1.94\%$ promedio del total de nutrientes digestible promediando los resultados de ambos experimentos. Mientras que en base a la técnica de reemplazo se encontró un incremento del 5 % promedio en la ENm y un incremento del 6.5% promedio en la ENg cuando el maíz amarillo es hojueleado al vapor. La medición del almidón fecal es el mejor método para predecir la digestión del almidón a nivel del rumen ($r^2= 0.97$) y del tubo digestivo total ($r^2= 1.00$) en el ganado alimentado con dietas a base de MHV.
5. La medición del grosor de la hojuela es la herramienta más sencilla, confiable y práctica para determinar el óptimo procesamiento del maíz hojueleado al vapor.
6. Se requieren estudios complementarios para evaluar el efecto del procesamiento en el maíz hojueleado al vapor relacionado a productividad en pruebas de comportamiento y calidad de la canal.

BIBLIOGRAFÍA.

- AOAC, 1990. Official methods of analysis. 14th ed. Assoc. Offic. Anal. Chem. Arlington, VA.
- Armstrong D. G., and D. E. Beever. (1969). Post-abomasal digestion of carbohydrate in the adult ruminant. Digestion in the abomasum and intestine of the ruminant. Proc. Nutr. Soc. Vol 28: 121-131
- ASERCA, (2014). Reporte diario de precios de contado de maíz en diversos mercados internacionales. Recuperado el 23 de Marzo del 2014.
De: http://www.infoaserca.gob.mx/fisicos/mz_pci.asp
- Barajas, R., and R. A. Zinn. (1998). The feeding value of dry rolled steam-flaked corn in finishing diets for feedlot cattle: influence of protein supplementation. J. Anim. Sci. 76:1744-1752. Proc. West. Sect. Am. Soc. Anim. Sci.57:392-394.
- Basel, H. M., P.C. Hoffman, and R. D. Shaver. (2006). Degree of starch access: an enzymatic method to determine starch degradation potential of corn grain and corn silage. Anim. Feed Sci. Tech. 128(1):96-107.
- Bauer, M. L., D. L. Harmon, D. W. Bohnert, A. F. Branco, and G. B. Huntington. (2001). Influence of alpha-linked glucose on sodium-glucose cotransport activity along the small intestine in cattle. J. Anim. Sci; 79; 1917-1924.
- Bengochea, W. L., G. P. Lardy, M. L. Bauer, and S. A. Soto-Navarro. (2005). Effect of grain processing degree on intake, digestion, ruminal fermentation, and performance characteristics of steers fed medium-concentrate growing diets. J. Anim. Sci. 83:2815-2825.

- Benton, J. R., T. J. Klopfenstein, and G. E. Erickson. (2004). In situ estimation of dry matter digestibility and degradable intake protein to evaluate the effects of corn processing method and length of ensiling. *J. Anim. Sci.* 82 (Suppl. 1): 463.
- Benton, J. R., T. J. Klopfenstein, and G. E. Erickson. (2005). Effects of corn moisture and length of ensiling on dry matter. Digestibility and rumen degradable protein. Nebraska Beef Report MP-83A. Recuperado el 18 de Abril del 2014. In: <http://beef.unl.edu/beefreports/2005.pdf>.
- Bergen, W. G., D. B. Purser, and J. H. Cline. (1968). Effect of ration on the nutritive quality of rumen microbial protein. *J. Anim. Sci.* 27:1497-1501.
- Buleón, A., P. Colonna, V. Planchot, and S. Ball. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*; 23; 85-112.
- Burrin, D. G., R. A. Stock, and R. A. Britton. (1988). Monensin level during grain adaptation and finishing performance in cattle. *J. Anim. Sci.* 66: 513.
- Carrera, J. (2003). Producción y aplicación de las enzimas industriales. *Revista de biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*. No. 1: 9-15.
- Carro M.D., C. Valdés, M. J. Ranilla and J. S. González. (2000). Effect of forage to concentrate ratio in the diet of ruminal fermentation and digesta flow kinetics in sheep. *J. Anim. Sci*; 70:127-134.
- Castro, N. S. (1999). Características morfológicas, fisiológicas y bioquímicas, asociadas a la resistencia a la sequía en sorgo para grano. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México. 256.

- Castrillo, C. M. Leinz, J. Gasa, and J. A. Guada. (1992). The effect of increasing the proportion of barley straw in pellet concentrate diets given to lambs on rumen outflow rate and degradation of protein supplements. *Anim. Prod.* 54: 59-66.
- Chai, W., and P. Uden. (1998). An alternative oven method combined with different detergent strengths in analysis of neutral detergent fiber. *Anim. Feed Sci. Technol.* 74:281-288.
- Corona, L., Owens F. N., and Zinn R. A., (2006). Impact of corn vitreousness and processing on site and extent of digestion by feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 84: 3020-3031.
- Corona, L., S. Rodríguez, R. A. Ware, and R. A. Zinn. (2005). Comparative effect of whole, ground, dry-rolled and steam flaked corn on digestion and performance in feedlot cattle. *Prof. Anim. Sci.* 21; 200-206.
- Correa, C. E. S., R. D. Shaver, M. N. Pereira, J. G. Laurer and K. Kohn. 2002. Relationship between corn vitreousness and ruminal in situ starch degradability. *J. Dairy Sci.* 85:3008-3012.
- Cheng, K. J., T. A. McAllister, J. D. Poop, A. N. Hristov, Z. Mir, and H. T. Shin. (1998). A review of bloat in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 76; 299-308.
- Cheng, K. J., C. W. Forsberg, H. Minato, and J. W. Costerton. (1991). Microbial ecology and physiology of feed degradation within the rumen. In: physiological of digestion and metabolism in ruminants: Proceeding of the Seventh International Symposium on Ruminant Physiology, Sendai, Japan. pp. 594-624.

- Church, D. C. (1993). Cap. Los Carbohidratos en la nutrición de los rumiantes. En D.C. Church, (Ed.). El rumiante: Fisiología Digestiva y nutrición. pp. 305-337. Zaragoza, España. Editorial Acriba.
- Crop Science, (2012). Breeding maize with high amylose content; Genotypic material. Recuperado: 20 de Agosto del 2014 <http://cropscience.ch/?p=644>
- Defoor, P. J., M. L. Galyean, G. B. Salyer, G. A. Nunnery, and C. H. Parsons. (2002). Effects of roughage source and concentration on intake and performance by finishing heifers. J. Anim. Sci. 80:1395-1404.
- Dombrink-Kurtzman, M.A., and C. A. Knutson. (1997). A study of Maize endosperm harness in relation to amylase content and susceptibility to damage. Cereal Chem. 74:776-780.
- Drager, C.D., Dew P. F., Brown M. S. and N. A. Cole. (2002). The effect of degree of corn processing on the chemical composition of corn. En: Proc. Plains Nutr.Council Spring Conf. Publ. p. 126. AREC02-20, Texas AgriLife Res.. and Ext. Center,Amarillo, TX.
- Dreher, M. L., C. J. Dreher, and J. W. Berry. (1984). Starch digestibility of foods: A nutritional perspective. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 20: 47-71.
- Elizalde, J. C., N. R. Merchen, and D. B. Faulkner. (1999). Supplemental cracked corn for steers fed fresh alfalfa: I. Effects on digestion of organic matter, fiber and starch. J. Anim. Sci. 77:457-466.

- Evers A. D. and D. J. Stevens. (1985). Starch damage. En Y. Pomeranz (Ed.) Advances in cereals Science Technology. (pp 321-349). St. Paul, MN. American Association of Cereal Chemists.
- Ewing, D. L., and D. E. Johnson. (1987). Corn particle starch digestion, passage and size reduction in beef steers: A dynamic model. J. Anim. Sci.64:1194.
- Ensor, W. L., H. H. Olson, and V. F. Colebrander. (1970). A report: Committee on classification of particle size in feedstuffs. J. Dairy Sci. 53; 689-690.
- Glimp, H. A, S. P. Hart, and D. VonTungeln. (1989). Effect of altering nutrient density (concentrate to roughage ratio) and restricting energy intake on rate, efficiency and composition of growing lambs. J. Anim. Sci. 67:865
- Gray, G. M. (1992). Starch digestion and absorption in nonruminants. J. Nutr. 122; 172-177.
- Fassio A., Cozzolino D., Bonjour V., Pascal A., Condón F., Delucchi I. (2000). Maíz: variabilidad genética y usos alternativos del grano. (pp 18-20). Recuperado el 20 de Agosto del 2014. De: <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219240807140223.pdf>
- FAO. (1993). El maíz en la nutrición humana. Recuperado el 17 de Marzo del 2014. De: http://www.fao.org/documents/show_cd.asp?url_file=/docrep/T0395500.htm.f
- Ferraris, R. P., P. P. Lee, and J. M. Diamond. (1989). Origin of regional and species differences in intestinal glucose uptake. Am. J. Physiol. 257: 689-G697.

- Ferreira, G., and D. R. Martens. (2005). Chemical and physical characteristics of corn silage and their effects on in vitro disappearance. *J. Dairy Sci.* 88: 4414-4425.
- French, D. (1973). Chemical and physical properties of starch. *J. Anim. Sci.* 37:1048-1061.
- Fushiki, T., and K. Iwai. (1989). Two hypothesis on the feedback regulation of pancreatic enzyme secretion. *FASEB J.* 3: 121-124.
- Fushiki, T., H. Kajiura, S. Fukuoka, K. Kido, T. Semba, and K. Iwai. (1989). Evidence for an intraluminal mediator in rat pancreatic enzyme secretion: Reconstitution of the pancreatic response with dietary protein, trypsin and the monitor peptide. *J. Nutr.* 119: 622-630.
- Garrett, W. N. (1971). Energetic efficiency of beef and dairy steers. *J. Anim. Sci.* 32:451.
- Gibbon, B. C., X. Wang, and B. A., Larkins. (2003). Altered starch structure is associated with endosperm modification in quality-protein maize. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 100, 15329-15334.
- González, A. M., y Y. Z. Castañeda. (2008). *Biocombustibles, Biotecnología y Alimentos: Impactos Sociales para México. De Argumentos, UAM-X Año 21, Núm. 57. México, Nueva Época.*
- Gorocica-Buenfil, M. A., and S. C. Loerch. (2005). Effect of cattle age, forage level and corn processing on diet digestibility and feedlot performance. *J. Anim. Sci.* 83:705-714.

- Hahn, D. H., L. W. Rooney, and C. F. Earp. (1984). Tannins and phenols of sorghum. *Cereal Foods World* 29:776.
- Hales, K. E., N.A. Cole , M. L. Galyean and A. B. Leytem (2010a). Nutrient concentrations and proportions in particle size fractions of corn steam flaked to different bulk densities. *Prof. Animal Sci.* 26:511-519.
- Harmon, D. L. (1992). Dietary influences on carbohydrases and small intestinal starch hydrolysis capacity in ruminants. *J. Nutr.* 122:203-210.
- Harmon, D. L. (1993). Nutritional Regulation of Postruminal Digestive Enzymes in Ruminants. *J. Dairy Sci.* 76:2102-2111.
- Harmon, D.L., and K.R. McLeod. (2001). Glucose uptake and regulation by intestinal tissues: Implications and whole-body energetics. *Journal of Animal Science*, 79:E59-E72.
- Harmon, D. L., R. M. Yamka and N. A. Elam. 2004. Factors affecting intestinal starch digestion in ruminants: A review. *Can. J. Anim. Sci.* 84:309-318
- Hediger, M. A., and D. B. Rhoads. (1994). Molecular physiology of sodium glucose transporter. *Physiol. Rev.* 74:993-1026.
- Herrera-Saldaña, R. E., J. T. Huber and M. H. Poore. (1990). Dry matter, crude protein and starch digestibility on five cereal grains. *J. Dairy Sci.* 73:2386-2393.
- Hicks, C. R. (1973). *Fundamental Concepts in the Design of Experiments*. New York: Holt, Rinehart and Winston

- Hicks, R. B., F. N. Owens, D. R. Gill, J. J. Martin, and C. A. Strasia. (1990). Effects of controlled feed intake on performance and carcass characteristics of feedlot steers and heifers. *J. Anim. Sci.* 68:233.
- Hill, F.N., and D.L. Anderson. (1958). Comparison of metabolizable energy and productive determinations with growing chicks. *J. Nutr.* 64:587-603.
- Hill, T. M., S. P. Schmidt, Russell, E. E. Thomas, and D. F. Wolfe. (1991). Comparison of urea treatment with established methods of sorghum grain preservation and processing on site and extent of starch digestion by cattle. *J. Anim. Sci.* 69: 4570-4576.
- Hoffman, P. C., and R. D. Shaver. (2008). Corn Biochemistry. Factors related to Starch Digestibility in Ruminants. Dept. of Dairy Science, University of Wisconsin Madison. Recuperado el 23 de Marzo del 2014.
De:<http://www.uwex.edu/ces/dairynutrition/documents/CornBiochemistryE-1b.pdf>
- Holter, J. A., and J. T. Reid. (1959). Relationship between the concentration of crude protein and apparently digestible protein in forage. *J. Anim. Sci.* 18: 1339-1349.
- Huntington, G. B. (1997). Starch utilization by ruminants: from basics to the bunk. *J. Anim. Sci.* 75:852-867.
- Huntington, G. B. D. L. Harmon, and C.J. Richards. (2006). Sites, rates, and limits digestion and glucose metabolism in growing cattle. *J. Anim. Sci.* 84: E14-E24.

- Huntington, G. B., C. Richards, and D. Harmon. (2005). Sites, rates and limits of starch digestion and glucose metabolism in grow cattle. *J. Anim. Sci.* 83 (Suppl.1):72.
- Jaeger, S. L., C. N. Macken, G. E. Erickson, T. J. Klopfenstein, W. A. Fithian, and D. S. Jackson. (2004). The influence of corn kernel traits on feedlot cattle performance. Publicado en Nebraska Beef Report 2004. pp. 54-57.
- Johnson, A., R. Hurwitz, and N. Kretchmer. (1977). Adaptation of rat pancreatic amylase and chymotrypsinogen to changes in diet. *J. Nutr.* 107:87-96.
- Joy, M. T., E. J. DePeters, J. G. Fadel, and R. A. Zinn. (1997). Effects of corn processing on the site and extent of digestion in lactating cows. *J. Dairy Sci.* 80:2087-2097.
- Karr, M. R. (1984). Comparison of "wet" grain wet processing methods for finish cattle. En: Feed Grain Utilization Symposium. p 90. Texas Tech University, Lubbock.
- Kellens, R. O., and D. C. Church. (2001). Feed processing. En: *Livestock Feeds and Feeding*. p 198. Prentice Hall, New Jersey, NY.
- Kotarski, S. F., R. D. Waniska, and K. K. Thurn. (1992). Starch hydrolysis by the ruminal microflora. *J. Nutr.* 122:178-190.
- Krehbiel, C. R., R.A. Briton, D. L. Harmon, J. P. Peters, R. A. Stock, and H. E. Grotjan. (1996). Effects of varying levels of duodenal or midjejunal glucose and 2-deoxyglucose infusion on small intestinal disappearance and net portal glucose flux in steers. *J. Anim. Sci.* 74:693-700.

- Kreikemeier, K. K., D. L. Harmon, J. P. Peters, K. L. Gross, C. K. Armendariz, and C. R. Krehbiel (1990). Influence of dietary forage and feed intake on carbohydrase activities and small intestinal morphology of calves. *J. Anim. Sci.* 68:2916-2929.
- Kreikemeier, K. K., D. L. Harmon, R. T. Brandt Jr., T. B. Avery, and D. E. Johnson. (1991). Small intestinal starch digestion in steers: Effect of various levels of abomasal glucose, corn starch and corn dextrin infusion on small intestinal disappearance and net glucose absorption. *J. Anim. Sci.* 69:328-338.
- Kuehl, Robert O. (2001). *DISEÑO DE EXPERIMENTOS*. México, DF. International Thomson.
- Kumar, R., and M. Sigh. (1984). Tannins, their adverse role in ruminant nutrition. *J. Agr. Food Chem.* 32: 447.
- Lardy, G. (2013). Feeding Corn to Beef Cattle. Animal Science Department, AS1238, North Dakota State University, Fargo North Dakota, USA. Recuperado el 14 de Abril del 2014.
De: www.ag.ndsu.edu/pubs/ansci/beef/as1238.pdf
- Littell, R. C., G. A. Milliken, W. W. Stroup, and R. D. Wolanger. (1996). SAS system for mixed models. Cary, NC: SAS Institute
- Loerch, S. C. (1990). Effects of feeding growing cattle high concentrate diets at a restricted intake on feedlot performance. *J. Anim.* 68: 3086-3095.
- Lofgreen, G. P., and W. N. Garrett. (1968). A system for expressing net energy requirements and feed values for growing and finishing beef cattle. *J. Anim. Sci.* 27:793.

- Lukas, M., K. H. Sudekum, G. Rave, K., Friedel and A. Susenbeth. (2005). Relationship between fecal crude protein concentration and diet organic matter digestibility in cattle. *J. Anim. Sci.* 83: 1332-1344.
- Mader, T. L., J. M. Dahlquist, R. A. Britton, and V. E. Krause. (1991). Type and mixture of high-moisture corn in beef cattle finishing diets. *J. Anim. Sci.* 69:3480-3486.
- May D. G. (2008). Evaluación del maíz blanco (*Zea Mays L.*) hojueado con vapor y quebrado en seco, utilizado en dietas de finalización para bovinos de engorda: Digestión de nutrimentos. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, BC.
- McAllister, T. A., H. D. Bae, G. A. Jones, and C.J. Cheng. (1994). Microbial attachment and feed digestion in the rumen. *J. Anim. Sci.* 72: 3004-3018.
- McAllister, T.A., R. C. Phillipe, L. M. Rode, and K. J. Cheng. (1993). Effect of the protein matrix on the digestion of cereal grains by ruminal microorganisms. *J. Anim. Sci.* 71:205-212.
- Mendoza, M.G.D., R.A. Britton, and R.A. Stock. (1993). Influence of ruminal protozoa on site and extent of starch digestion and ruminal fermentation. *J. Anim. Sci.* 71: 1572-1578.
- Mitjavila, S., C. Lacomber, G. Carrera, and R. Derache. (1977). Tannic acid and oxidized tannic acid on the functional state of rat intestinal epithelium. *J. Nutr.* 47:498.

- Murphy, T. A., and S. C. Loerch. (1994). Effects of restricted feeding of growing steers on performance, carcass characteristics and composition. *J. Anim. Sci.* 72:2497-2507.
- Nocek, J. E, and S. Tamminga. (1991). Site of digestión of starch in the gastrointestinal tractor dairy cows and its effect on milk yield and composition. *J. Dairy Sci.* 74:3598-3625.
- NRC (National Research Council). (1984). *Nutrient Requirements of Beef Cattle.* (6thP. d) Washington D.C. USA. Ed. National Academy Press.
- NRC (National Research Council). (1996). *Nutrient Requirements of Beef Cattle.* 7th. Washington D.C. USA. National Academy Press.
- NRC (National Research Council). (2000). *Nutrient Requirements of Beef Cattle.* 7th Revised Ed. Washington D.C. USA. National Academy Press.
- Orskov, E. R. (1986). Starch digestion and utilization in ruminants. *J. Anim. Sci.* 63: 1624-1633.
- Ortega, C. M. E., and M. G. Mendoza. (2003). Starch digestion and glucose metabolism in the ruminant: a review. *Interciencia.* 28; 380-386.
- Owens, F. N. (2005). Corn grain processing and digestion. Pioneer Hi-Bred International, Inc. Johnston, IA. Presented at the 66th Minnesota Nutrition Conf., St. Paul MN. Sep. 20-21, 2005. Recuperado el 18 de Abril del 2014. De:<http://www.ddgs.umn.edu/prod/groups/cfans/@pub/@cfans/@ansci/documents/asset/ddgs-techinfo-pro-17.pdf>

Owens, F. N. (2010). Impact of grain processing and quality on holstein steer performance. Pioneer Hi-Bred International, Inc. Johnston, IA. Recuperado el 12 de Abril.

De:

<http://fyi.uwex.edu/wbic/files/2010/11/Impact-of-Grain-Processing-and-Quality-on-Holstein-Steer-Performance.pdf>

Owens, F. N. and L. A. Goetsch (1986). Cap. Digesta passage and microbial protein synthesis. En: L. P. Milling, W. L. Grovum and A. Dobson (Ed) Control of Digestion and Metabolism in Ruminants. pp 196-223. Englewood Cliffs, NJ. Ed. Prentice-Hall.

Owens, F., M. Hinds, and S. Soderlund. (2002). Roughage levels and sources in feedlot diets. Pp (1-19). Colorado Nutrition Roundtable, ARPAS meeting.

Owens, F. N., D. S. Secrist, W. J. Hill and D. R. Gill (1997). The effect of grain source and grain processing on performance of feedlot cattle: a review. J. Anim. Sci. 75: 868-879.

Owens, F. N. and R. A. Zinn. (2005). Corn grain for cattle: Influence of processing on site and extent of digestion. Proc. 19th Southwest Nutr. Conf. Phoenix, Arizona. p 86. Recuperado el 17 de Abril del 2014.

De: <http://animal.cals.arizona.edu/swnmc/papers/2005/>

Owens, F., and S. Soderlund. (2007). Getting the most out of your dry and high-moisture corn. Proc. 4-State Dairy Nutrition & Management Conference. Dubuque, Iowa. June 14.

Pethes, G., J. Bokori, P. Rudas, V. L. Frenyo, and S. Fekete. (1985). Thyroxine, triiodothyronine, reverse-triiodothyronine, and other physiological

characteristics of periparturient cows fed restricted energy. *J. Dairy Sci.* 68:1148.

Philippeau, C., C. Martin, and B. Michalet-Doreau. (1999a). Influence of grain source on ruminal characteristics and extent of digestion in beef steers. *J. Anim. Sci.* 77:1587-1596.

Philippeau, C., F. Le Deschault de Monredon, and B. Michalet-Doreau. (1999b). Relationship between ruminal degradation and the physical characteristics of corn grain. *J. Anim. Sci.* 77:239-243.

Plascencia, A. and A. V. Jose Maria. (2007). Influence of cracked, coarse grind or fine grind of corn on digestion and rumen function in steers fed a 73% corn-based diet. *J. Anim. Vet. Adv.* 118-122.

Plascencia, A., A. Arellano, M. A. López-Soto, D. May, y R. A. Zinn. (2002). Estudio Comparativo sobre el sitio y la tasa de digestión de la fracción nitrogenada y del almidón de cuatro cereales procesados con vapor utilizados con dietas para bovinos de engorda. *Vet. Mex.* 33:4.

Plascencia, A., R. M. Bermúdez, M. Cervantes, L. Corona, H. Dávila-Ramos, M. A. López-Soto, D. May, N. G. Torrentera, and R. A. Zinn. (2011). Influence of processing method on comparative digestion of white corn versus conventional steam-flaked yellow dent corn in finishing diets for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 89: 136-141.

Plegge, S. D. (1987). Restricting intake of feedlot cattle. En: F. N. Owens (Ed.) *Symposium Proceedings: Feed Intake by Beef Cattle.* MP-121:297. Oklahoma Agric. Exp. Sta.

- Pratt, R. C., J. W. Paulis, K. Miller, T. Nelsen, and J. A. Bietz. (1995). Association of zein classes with maize kernel hardness. *Cereal Chem.* 72 (2):162-167.
- Preston, R. L., A. C. Brake, P. T. Karnezos, A. G. Matches, and Y. Xiong (1993). Near infrared reflectance and gelatinization as measures of starch availability in steam flaked sorghum grain. *Tex. Tech Univ. Agric. Sci. Tech. Rep.* 327: 189-190.
- Pritchard, R. H. (1995). Why are they using programmed feeding?. *Southwest Nutr. Mgt. Conf.*: 27. University of Arizona, Tucson. Proc.
- Rabobank, (2014). *Agri Commodity Markets Outlook (2014), Lower prices as stock build.*
Recuperado el 18 de Marzo del 2014.
https://www.rabobank.com/downloads/research/Rabobank_Agri_Commodities_Outlook2014.pdf
- Richards, C.J., and B. Hicks. (2007). Processing of corn and sorghum for feedlot cattle. *Vet Clin Food Anim.* 23: 207-221.
- Robutti, J. L., S. F. Borrás and G. H. Eyherabide. (1997). Zein composition of mechanically separated coarse and fine portions of maize kernels. *Cereal Chem.* 74(1):75-78.
- Rodríguez, S., J. F. Calderón, and R. A. Zinn. (2001). Variation in ruminal starch digestion due to dry rolling versus steam flaking corn and sorghum can be reliably predicted based on changes in starch solubility and 6-h amylase reactive insoluble starch. *Proc., Western Section, ASAS.* Vol. 52.

- Rodríguez F. M. (2010). Efecto del grano de sorgo (*sorghum bicolor* (L.). Moench) germinado y ensilado en dietas para bovinos. Tesis de Maestría, UNAM.
- Rooney, L. W., and R. L. Pflugfelder. (1986). Factors affecting starch digestibility with special emphasis on sorghum and corn. J. Anim. Sci. 63:1607-1623.
- Russell J. R., A. W. Young, and N. A. Jorgensen. (1981). Effect of dietary corn starch intake on pancreatic amylase and intestinal maltase and pH in cattle. J. Anim. Sci. 52; 1177-1182.
- Salinas, J., E. G. Alvarez and R.A. Zinn. (1999). Influence of tempering on the feeding value of steam-flaked sorghum for feedlot cattle. Proc. West. Sect. Am. Soc. Anim. Sci. 50: 325-330
- Scott, T. L., C. T. Milton, G. E. Erickson, T. J. Klopfenstein and R. A. Stock. (2003). Corn processing method in finishing diets containing wet corn gluten feed. J. Anim. Sci. 81:3182-3190.
- Secrist, D. S., W. J. Hill, F. N. Owens and S. D. Welty. (1995). Effects of corn particle size on feedlot steer performance and carcass characteristics. pp 99-104. Animal Science Research Report. Oklahoma State University. Recuperado el 18 de Abril del 2014.
De: <http://www.ansi.okstate.edu/research/1995rr/17.pdf>.
- Secrist, D. S., W. J. Hill, F. N. Owens, D. R. Gill and S. D. Welty. (1996). Rolled or whole corn for feedlot steers being limit or ad libitum feed. pp 173-180. Animal Science Research Report. Oklahoma State University. Recuperado el 18 de Abril del 2014.
De: <http://www.ansi.okstate.edu/research/1996rr/29.pdf>.

(SFA)-SAGARPA, (2011). Perspectivas de largo plazo para el sector agropecuario de México 2011-2020, Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios Recuperado el 23 de Marzo del 2014.

De: <http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Documents/SAGARPA/Perspectivas-Largo-Plazo-2011-2020.pdf>

Shirazi-Beechey, S.P. Wood, I. S., Dyer, J., Scott, D. and King, T. P. (1995). Cap. Intestinal sugar transport in ruminants. En Ruminant Physiology: Digestion, Metabolism, Growth and Production. Pp 115-132. Stuttgart: Enke-Verlag, Germany. Ed. W. V. Endelghart.

Sindt, J. J., J. S. Drouillard, E. C. Titgemeyer, S. P. Montgomery, E. R. Loe, B. E. Depenbusch, and P. H. Walz. (2006a). Influence of steam-flaked corn moisture level and density on the site and extent of digestibility and feeding value for finishing cattle. J. Anim. Sci. 84:424-432.

Sindt, J. J., J. S. Drouillard, S. P. Montgomery, and E. R. Loe. (2006b). Factors influencing characteristics of steam-flaked corn and utilization by finishing cattle. J. Anim. Sci. 84:154-161.

Situación Actual y Perspectiva de la Producción de Maíz en México 1996-2012. Recuperado el 23 de Marzo del 2014. De: <http://www.siap.gob.mx/>

Stock, R. A., D. R. Brink, R. T. Brandt, J. K. Merrill and K. K. Smith. (1987 a) Feeding combinations of high moisture corn and dry corn to finishing cattle. J. Anim. Sci. 65:282-289.

Stock, R. A., D. R. Brink, R. A. Britton, F. K. Goedeken, M. H. Sindt, K. K. Kreikemeier, M. L Bauer and K. K. Smith (1987 b). Feeding combinations of

high moisture corn and dry-rolled grain sorghum to finishing cattle. *J. Anim. Sci.* 65:290.

Stock, R. A., Sindt, M. H., Parrot J. C., F. K. Goedeken (1990). Effects of grain type, roughage level and monensin level on finishing cattle performance. *J. Anim. Sci.* 68: 3441-3455.

Streeter, M. N., Wagner D. G., Hibberd C. A. and F. N. Owens (1990). Comparison of corn with four sorghum grain hybrids: site and extent of digestion in steers. *J. Anim Sci.* 68: 3429-3440.

Streeter, M. N., Wagner D. G., and F. N. Owens (1989). Combination of high moisture harvested sorghum grain and dry-rolled corn: Effects on site and extent of digestion in beef heifers. *J. Anim Sci.* 67: 1623-1633.

Streeter, M. N., Wagner D. G., Owens F. N. and Hibberd C. A. (1991). The effect of pure and partial yellow endosperm sorghum grain hybrids on site and extent of digestion on beef steer. *J. Anim Sci.* 69: 2571-2584.

Swanson, K. C., C. J. Richards, and D. L. Harmon. (2002). Influence of abomasal infusion of glucose or partially hydrolyzed starch on pancreatic exocrine secretion in beef steers. *J. Anim. Sci.* 80: 1112-1116.

Tester, R. F., J. Karkallas, and X. Qi. (2004). Starch: composition, fine structure and architecture. *J. Cereal Sci.* 39: 151-165.

Theurer, C. B. (1986). Grain processing effects on starch utilization by ruminants. *J. Anim. Sci.* 63:1649-1662.

- Theurer, C. B., O. Lozano, Alio A., Delgado-Elorduy A., Sadik M., Huber J. T. and Zinn R. A. (1999). Steam-processed corn and sorghum grain flaked at different densities alter ruminal, small intestinal, and total tract digestibility of starch by steers. *J. Anim Sci.* 77: 2824-2831.
- Thomison, P. (1991). Speciality corns: waxy, high-amilose, high-oil and high-lysine corn. Ohio State University Extension. Recuperado el 18 de Abril del 2014.
De: <http://ohioline.osu.edu/agf-fact/0112.htm>.
- Thorne, M. J., L. U., Thomson, and D. J. A. Jenkins, (1983). Factors affecting starch digestibility and the glycemic response with special reference to legumes. *Amer. J. Clin. Nutr.* 38: 481-488.
- Turrent A. F., T. A. Wise, E. Garvey. (2012). Factibilidad de alcanzar el potencial productivo de maíz de México, GDAE Working paper No. 12-03. Recuperado el 18 de Abril del 2014.
De: <http://www.ase.tufts.edu/gdae/Pubs/wp/12-03TurrentMexMaize.pdf>
- Van Hellen, R. W., T. A. Wilson, G. E. Mitchell, G. T. Schelling, and R. E. Tucker (1978). Bovine amylase, insulin and glucose response to high and low concentrate diets. *J. Anim. Sci.* 47: 445.
- Van Soest, P. J. (1982). *Nutritional Ecology of the Ruminant*. Pp (73-79). Corvallis, OR. USA. Ed. O & B Books, Inc.
- Van Soest, P. J. (1986) *Soluble Carbohydrates*. Pp 73-79. Cornell Nutrition Conference For Feed Manufacturers, Syracuse, NY. USA.

- Wall J. S. and W. M. Ross (1970). Sorghum Production and Utilization. Pp 121-140. Westport CT. USA. Ed. AVI Publishing Company.
- Ward, C. F., and M. L. Galyean. (1999). The relationship between retrograde starch as measured by starch availability estimates and in vitro dry matter disappearance of steam-flaked corn. Burnett Ctr. Internet Prog. Rep. Recuperado el 24 de Marzo del 2014.
De: http://www.astf.ttu.edu/burnett_center/progress_reports/.
- Welch, J. G. (1982). Rumination, particle size and passage from the rumen. J. Anim. Sci. 54: 885-894.
- Welch, J. G. (1986). Physical parameters of affecting passage from the rumen. J. Dairy Sci. 69: 2750-2754.
- White, P. J., and L. M. Pollack. (1995). Corn as a food source in the United States; Part II. Processes, products, composition, and nutritive values. Cereal Foods World 40:756–762.
- Williams A.G., and G.S. Coleman. (1997) The rumen protozoa. In The rumen Microbial Ecosystem. 2nd Ed. P.N. Hobson and C.S. Stewert, Ed. Chapman and Hall, London, UK.; 73-139.
- Wright, E. M. (1993). The intestinal Na⁺ /glucose contratransporter. Annu. Rev. Physiol. 55:575-589.
- Xiong Y. S., S. J. Bartle, and R. L. Preston. (1990). Improved enzymatic method to measure processing effects and starch availability in sorghum grain. J. Anim. Sci. 68: 3861.

- Zinn R. A. (1987). Influence of lasalocid and monensin plus tylosin on comparative feeding value of steam flaked versus dry rolled corn in diets for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 65: 256-266.
- Zinn, R. A. (1988). Influence of tempering on the comparative feeding value of rolled and steam-flaked versus dry rolled corn diets for feedlot cattle. *J. Anim Sci.* 65:256.
- Zinn, R. A. (1990a). Influence of flake density on the comparative feeding value of steam flaked corn for feedlot cattle. *J. Anim Sci.* 68:767.
- Zinn, R. A. (1990b). Influence of steaming time on site of digestion of flaked corn in steers. *J. Anim Sci.* 68:776.
- Zinn, R. A. (1991). Comparative feeding value of steam flaked corn and sorghum in finishing diets supplemented with or without sodium bicarbonate. *J. Anim Sci.* 69:905-916.
- Zinn, R. A. (1994). Influence of flake thickness on the feeding value of steam rolled wheat for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 72:21-28.
- Zinn, R. A., C. F. Adam and M. S. Tamayo. (1995). Interaction of feed intake level on comparative ruminal and total tract digestion of dry-rolled and steam flake corn. *J. Anim. Sci.* 73:1239-1245.
- Zinn, R. A., E. D. Álvarez, M. F. Montañó, A. Plascencia, and J. E. Ramírez. (1998). Influence of tempering on the feeding value of rolled corn in finishing diets for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 76:2239-2246.

- Zinn, R. A. and R. Barajas. (1997). Comparative ruminal and total tract digestion of a finishing diet containing fresh vs. air-dry steam-flaked corn. *J. Anim. Sci.* 75:1704-1707.
- Zinn, R. A., A. Barreras, Corona L., Owens F. N. and Plascencia A. J. (2011). Comparative effects of processing methods on the feeding value of maize in feedlot cattle. *National Research Reviews.* 24: 183-190.
- Zinn, R. A., A. Barreras, L. Corona, F. N. Owens, and R. A. Ware. (2007). Starch digestion by feedlot cattle: Prediction from analysis of feed and fecal starch and nitrogen. *J. Anim. Sci.* 85: 1727-1730.
- Zinn, R. A., and J. L. Borques, (1993). Influence of sodium bicarbonate and monensin on utilization of a fat supplemented, high energy growing-finishing diet by feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 71: 18-25.
- Zinn R. A., F. N. Owens, and R. A. Ware. (2002) Flaking corn: Processing mechanics, quality standards, and impacts on energy availability and performance of feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 80: 1145-1156.
- Zinn, R. A., and F. N. Owens. (1986). A rapid procedure for purine measurement and its use for estimating net ruminal protein synthesis. *Can. J. Anim. Sci.* 66:157-166.
- Zinn, R. A., and A. Plascencia. (1993). Interaction of whole cottonseed and supplemental fat on digestive function in cattle. *J. Anim. Sci.* 71:11-17.

Zinn, R. A., J. Salinas, M. F. Montaña, and L. Corona. (2008). Influence of tempering and steaming time requirements of Flaked Corn for feedlots cattle diets. *J. Anim. and Vet. Advances*. 7 (1): 68-76.