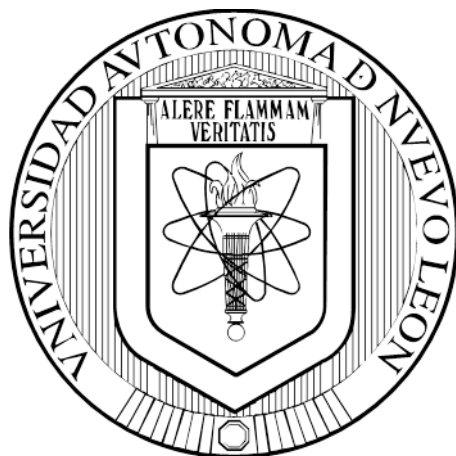


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**  
**FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA**



**TESIS**

**PRODUCCIÓN, DENSIDAD Y DISPONIBILIDAD *IN VITRO* DEL  
ALMIDÓN DE MAÍZ Y SORGO A VARIAS VELOCIDADES DE  
ROLADO AL VAPOR**

**PRESENTA**

**EMANUEL RAMOS ACEVEDO**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER  
EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIA ANIMAL**

**JULIO, 2016**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**TESIS**

**PRODUCCIÓN, DENSIDAD Y DISPONIBILIDAD *IN VITRO* DEL  
ALMIDÓN DE MAÍZ Y SORGO A VARIAS VELOCIDADES DE  
ROLADO AL VAPOR**

**PRESENTA**

**EMANUEL RAMOS ACEVEDO**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER  
EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIA ANIMAL**

**JULIO, 2016**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA



PRODUCCIÓN, DENSIDAD Y DISPONIBILIDAD *IN VITRO* DEL ALMIDÓN DE  
MAÍZ Y SORGO A VARIAS VELOCIDADES DE ROLADO AL VAPOR

Aprobación de tesis por el comité particular de  
Emanuel Ramos Acevedo

PhD. Jorge R. Kawas Garza

Director de Tesis

Dr. Fernando Garza Cázares  
Asesor

Dr. Héctor Fimbres Durazo  
Asesor

MC. Gustavo Moreno Degollado  
Asesor

Dr. Argelio Santos Haliscak  
Asesor

## **DEDICATORIA**

A Dios, por permitirme concluir un grado más de estudios. Si bien el aprendizaje se adquiere de manera individual, el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional fue gracias al apoyo de mis padres, Sr. Miguel Ramos Gaitán y Sra. Rosalva Acevedo Pérez, que me han inculcado honestidad, trabajo y perseverancia.

A mi esposa Claudia Méndez Pérez que ha estado a mi lado dándome su amor, y por su linda manera de apoyarme siempre. Por ser mi impulso para superarme cada vez más de manera personal y profesional, ya que es el espejo en el cual me quiero reflejar, por su gran corazón y sus virtudes infinitas.

Mis hermanos Edgar y Cinthia Guadalupe Ramos Acevedo por motivarme a seguir estudiando.

Por lo anterior, y por su incondicional e invaluable apoyo, que ha hecho que mis logros sean cada vez mayores les dedico esta tesis de Maestría en Ciencia Animal.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero quiero agradecer al posgrado conjunto de las Facultades de Agronomía y Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por las oportunidades brindadas, para la realización de mi Maestría en Ciencia Animal.

Quiero expresar mi agradecimiento al PhD Jorge R. Kawas Garza, por su apoyo y consejos otorgados, durante la realización la de tesis.

Extiendo mis agradecimientos a la empresa AQUA Laboratorios, S.A. de C.V., en particular a la QFB Marisol Galván, por el apoyo en los análisis de laboratorio.

Al Laboratorio de Nutrición Animal de La Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia y al Centro de Investigación en Producción Animal de la UANL por permitirme usar sus instalaciones y por el apoyo brindado a lo largo de todo este proyecto de investigación.

A MNA de México, S.A. de C.V., por el apoyo brindado para obtener las muestras de los granos hojueados, y en particular a su personal, al MVZ. Rene Alvarado, a la MVZ. Karla Costilla y a el MVZ. Carlos García.

También agradezco al Dr. Fernando Garza Cazares, Dr. Héctor Fimbres Durazo, Dr. Argelio Santos Haliscak y al MC. Gustavo Moreno Degollado, por formar parte de mi comité de Tesis, así como por sus invaluables sugerencias y el interés para la revisión de esta tesis.

Mi gratitud es para todos los maestros del Posgrado Conjunto de las Facultades Agronomía y Medicina Veterinaria y Zootecnia que contribuyeron en mi formación como Maestro en Ciencias, ya que gracias a su valiosa enseñanza fue posible concluir una Maestría en Ciencia Animal.

## **ABREVIATURAS**

**CEBD:** Calorimetría de escaneo de barrido diferencial

**CNF:** Carbohidratos no fibrosos

**CIPA:** Centro de Investigación en Producción Animal

**DIVMS:** Digestibilidad in vitro de la materia seca

**EE:** Extracto etéreo

**ENg:** Energía neta de ganancia

**ENm:** Energía neta de mantenimiento

**FDA:** Fibra en detergente ácido

**FDN:** Fibra en detergente neutro

**G:** Gramos

**GAD:** Gelatinización del almidón digestible

**GDP:** Ganancia diaria de peso

**Lbs:** Libra

**Mcal:** Mega caloría

**Min:** Minuto

**MO:** Materia orgánica

**MS:** Materia seca

**PC:** Proteína cruda

**RPM:** Revoluciones por minuto

**RV:** Rolado al vapor

**Ton:** Tonelada

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÍNDICE DE CUADROS.....</b>                                | <b>X</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>                                | <b>XI</b> |
| <b>RESUMEN.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>                                     | <b>5</b>  |
| 1.1. Objetivos.....  | 7         |
| 1.2. Hipótesis.....  | 7         |
| <b>REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>                           | <b>8</b>  |
| 2.1. Los granos de cereal en la nutrición animal.....        | 8         |
| 2.2. Componentes morfológicos del sorgo.....                 | 8         |
| 2.2.1. Endospermo.....                                       | 8         |
| 2.2.2. Propiedades del almidón.....                          | 10        |
| 2.2.3. Gelatinización y retrogradación del almidón.....      | 11        |
| 2.2.4. Digestión ruminal del almidón.....                    | 13        |
| 2.2.5. Proteína.....   | 13        |
| 2.2.6. La fibra como componente del grano.....               | 14        |
| 2.2.7. Los taninos como componentes del grano.....           | 15        |
| 2.3. Maíz y sus componentes morfológicos.....                | 16        |
| 2.3.1. Factores modificadores de la digestión del grano..... | 16        |
| 2.3.2. El pericarpio.....                                    | 17        |

|   |    |
|---|----|
| 2.3.3. Tamaño del germen.....   | 17 |
| 2.3.4. El almidón.....  | 18 |
| 2.3.5. La proteína.....   | 19 |
| 2.4. Métodos de procesamiento de los granos.....                        | 20 |
| 2.4.1. Procesamiento en seco.....                                       | 20 |
| 2.4.2. Grano con alta humedad.....                                      | 21 |
| 2.4.3. Grano rolado al vapor.....                                       | 21 |
| 2.5. Impacto del procesamiento en el valor nutritivo de un grano.....   | 22 |
| 2.5.1. Efecto en la disponibilidad del almidón.....                     | 22 |
| 2.5.2. Efecto en la eficiencia energética.....                          | 24 |
| 2.6. Variables que tienen efecto en el proceso de rolado del grano..... | 25 |
| 2.6.1. La densidad del grano rolado.....                                | 25 |
| 2.6.2. La humedad del grano en la gelatinización del almidón....        | 25 |
| 2.6.3. El proceso de remojar el grano.....                              | 26 |
| 2.6.4. El proceso de cocimiento del grano.....                          | 27 |
| 2.7. Procedimientos para determinar disponibilidad del almidón.....     | 27 |
| 2.7.1. En grano rolado .....  | 27 |
| 2.7.2. En las heces.....  | 28 |
| 2.8. La digestión.....  | 29 |
| 2.8.1. La digestibilidad.....   | 29 |
| 2.8.2. Digestibilidad aparente.....                                     | 30 |



|   |           |
|---|-----------|
| 2.8.3. Digestibilidad verdadera.....                        | 30        |
| 2.8.4. Coeficiente de digestibilidad.....                   | 30        |
| 2.9. Técnicas para medir la digestibilidad del almidón..... | 31        |
| <b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>                            | <b>33</b> |
| 3.1. Ubicación e instalaciones.....                         | 33        |
| 3.2. Diseño experimental.....                               | 33        |
| 3.3. Muestreo y procesamiento de los granos.....            | 34        |
| 3.4. Análisis químicos de las muestra.....                  | 35        |
| 3.5. Cálculo de la disponibilidad del almidón.....          | 37        |
| 3.6. Degradabilidad <i>in vitro</i> de la materia seca..... | 38        |
| 3.6.1. Manejo y alimentación.....                           | 38        |
| 3.6.2. Alimentación y obtención del líquido ruminal.....    | 38        |
| 3.7. Análisis estadístico.....                              | 39        |
| <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>                          | <b>40</b> |
| 4.1. Experimento 1 - Maíz Rolado.....                       | 40        |
| 4.2. Experimento 2 - Sorgo Rolado.....                      | 50        |
| <b>CONCLUSIÓN.....</b>                                      | <b>60</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>                                    | <b>61</b> |

## ÍNDICE DE CUADROS

|  |    |
|--|----|
| Cuadro 1. Amperaje, densidad de rolado y producción de maíz rolado a varias velocidades (rpm) de rolado.....   | 42 |
| Cuadro 2. Solubles de almidón y almidón disponible de maíz rolado a varias velocidades (rpm) de rolado.....  | 45 |
| Cuadro 3. Densidad, humedad, solubles de almidón y almidón disponible de maíz rolado al vapor a 0 y 10 minutos después de salir de la roladora.....                      | 46 |
| Cuadro 4. Digestibilidad <i>in vitro</i> de la materia seca (DIVMS) y de la fibra detergente neutro (DIVFDN) de grano de maíz a varias velocidades de rolado (RPM).....  | 48 |
| Cuadro 5. Amperaje, densidad de rolado y producción por hora de sorgo rolado a varias velocidades (rpm) de rolado.....   | 51 |
| Cuadro 6. Digestibilidad <i>in vitro</i> de la materia seca (DIVMS) y de la fibra detergente neutro (DIVFDN) de grano de sorgo a varias velocidades de rolado (RPM)..... | 56 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Producción (kg/h) de maíz a varias velocidad de rolado al vapor.....  | 43 |
| Figura 2. Producción (kg/h) de sorgo a varias velocidad de rolado al vapor..... | 52 |

## RESUMEN

Debido al alto contenido de almidón (>72%) de los granos de cereal, estos son la principal fuente de energía en las dietas para ganado de engorda en corral. El objetivo de este estudio fue relacionar la concentración de solubles de almidón de sorgo y maíz rolados, obtenidos mediante una técnica enzimática (glucoamilasa) *in vitro*, con la degradabilidad *in vitro* del almidón usando líquido ruminal, para estimar la disponibilidad del almidón, con el propósito de establecer un procedimiento para control de calidad de granos rolados al vapor. En el experimento 1, se utilizaron 168 muestras de maíz, mientras que en el experimento 2, se utilizaron 84 muestras de sorgo. El proceso de rolado se llevó a cabo usando una roladora marca R&R Machine Works, con rodillos de 24" de diámetro x 48" de largo, con el grano pasando a través de un cocedor, durante un tiempo de 45 minutos, a una temperatura de 100°C. Después de iniciado el proceso de rolado, el equipo fue ajustado a diferentes velocidades de rolado (15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 rpm). Las muestras se obtuvieron en tres posiciones de los rodillos (izquierda, centro y derecha), para determinar la densidad del grano rolado al vapor a los 0 y a los 10 minutos de haber salido de la roladora. Las muestras se llevaron al laboratorio para analizar el contenido de solubles de almidón usando una técnica analítica reportada por el Beef Cattle Research Center, Kansas State University, usando una glucoamilasa en solución buffer (150 unidades enzima/ml; pH 4.5). Para determinar la digestión ruminal *in vitro* se utilizó una vaquilla fistulada en el rumen para obtener líquido ruminal como inóculo. La técnica de degradación *in vitro* fue la recomendada por Mehrez and Ørskov (1977), modificada para las condiciones *in vitro* condiciones establecidas para el aparato Ankom Daisy II<sup>®</sup>. En el Experimento 1, Conforme aumento la

velocidad de la roladora de 15 a 45 rpm, el amperaje aumentó linealmente ( $P < 0.001$ ) de 22.0 a 28.6. La producción de maíz rolado aumentó de 5.8 toneladas por hora a 15 rpm, a 11.2 toneladas por hora a 35 rpm, sin cambio en producción a más velocidad de rolado. La densidad del maíz rolado cambió cuadráticamente ( $P < 0.001$ ), llegando a un máximo de 396 g/L a 30 rpm, sin un cambio posterior. Los solubles de almidón aumentaron cuadráticamente ( $P = 0.05$ ) con un aumento en la velocidad de rolado para llegar a un máximo de 5.53% a las 40 rpm, reduciéndose significativamente a los 45 rpm. La DIVMS se redujo de 83.8% a 15 rpm, a un mínimo de 80.1% a 25 rpm, aumentando posteriormente a 86.2% a 45 rpm. Lo mismo ocurrió con la DIVFDN, reduciéndose de 54.1% a 15 rpm, a un valor mínimo de 44.0% a 25 rpm, volviendo a aumentar a un máximo de 65.2% a 45 rpm. En el experimento 2, se midieron amperaje, la densidad de rolado y la producción de sorgo a siete velocidades de rolado. El amperaje aumentó linealmente ( $P < 0.001$ ) con el aumento de la velocidad de la roladora, a un máximo de 73 amperes. La producción de sorgo rolado aumentó linealmente ( $P < 0.001$ ) de 5.0 toneladas por hora a las 15 rpm a 13.2 toneladas por hora a las 45 rpm. Las densidades de rolado aumentaron linealmente ( $p < 0.001$ ) de 336 g/L a 15 rpm a 425 g/L a 45 rpm, inmediatamente después de salir de la roladora. A los 10 minutos después de salir de la roladora, la densidad de rolado aumentó de 300 g/L a las 15 rpm a 395 g/L a las 45 rpm. La DIVMS aumento cuadráticamente ( $P < 0.043$ ) aumentando inicialmente de 86.6% a 15 rpm a 89.0% a 20 rpm, con un pequeño descenso posteriormente. La DIVFDN obteniéndose valores que variaron ( $p > 0.05$ ) de 75.2% a 86.9%.

**Palabras clave:** Digestibilidad, *in vitro*, maíz, sorgo, almidón, rolado al vapor.

## ABSTRACT

Due to the high starch content (>72%) of cereal grains, these are the main source of energy in the diet of feedlot cattle. The objective of this study was to obtain a relationship between the soluble starch concentration of steam-flaked sorghum and corn, obtained using an enzymatic (glucoamylase) *in vitro* technique, with the *in vitro* starch degradation in rumen fluid, to estimate rumen starch availability, with the purpose of establishing a quality control procedure for steam-flaked grain. In experiment 1, 168 corn samples were collected, whereas in experiment 2, 84 sorghum samples were obtained. The steam-flaking process was conducted using an R&R Machine Works steam-flaking machine with rolls measuring 24" in diameter x 48" long, with grain passing through a cooker during 45 minutes, at a temperature of 100°C. After starting the steam-flaking process, the equipment was set to different velocities (15, 20, 25, 30, 35, 40 and 45 rpm). Samples were obtained at three different positions of the rollers (left, center and right), to determine grain steam-flaking density at 0 and 10 minutes after coming out of the steam-flaker. The samples were analyzed for soluble starch using the technique reported by the Beef Cattle Research Center, Kansas State University, using a glucoamylase in buffer solution (150 enzyme units/ml; pH 4.5). To determine the *in vitro* ruminal digestion, rumen fluid obtained from a fistulated heifer was used as the inoculum. The *in vitro* degradation technique was that recommended by Mehrez and Ørskov (1977), modified for *in vitro* conditions using the Ankom Daisy II<sup>®</sup> device. In Experiment 1, as the steam-flaker speed increased from 15 to 45 rpm, the amperage increased linearly ( $p < 0.001$ ) from 22.0 to 28.6. Steam-flaked corn production increased from 5.8 ton/h at 15 rpm to 11.2 ton/h at 35 rpm, with no change in production with a faster speed. The steam-flaking

density of corn changed quadratically ( $P < 0.001$ ), reaching a maximum of 396 g/L at 30 rpm, without further change. The soluble starch concentration increased quadratically ( $P = 0.05$ ) with an increase in rolling speed to reach a maximum of 5.53% at 40 rpm, decreasing significantly at 45 rpm. The IVDMD decreased from 83.8% at 15 rpm, to a minimum of 80.1% at 25 rpm, increasing subsequently to 86.2% at 45 rpm. A similar trend was observed for IVNDFD, decreasing from 54.1% at 15 rpm, to a minimum of 44.0% at 25 rpm, increasing again to a maximum of 65.2% at 45 rpm. In experiment 2, variables measured were amperage, sorghum production and flaking density at seven rolling speeds. The amperage increased linearly ( $P < 0.001$ ) with increased rolling speed, to a maximum of 73 amperes. The rolled sorghum production increased linearly ( $P < 0.001$ ) from 5.0 tons per hour at 15 rpm to 13.2 tons per hour at 45 rpm. Steam-flaking density increased linearly ( $p < 0.001$ ) from 336 g/L at 15 rpm to 425 g/L at 45 rpm, immediately after coming out of the steam-flaking machine. Ten minutes after leaving the steam-flaking machine, the density increased from 300 g/L at 15 rpm to 395 g/L at 45 rpm. The IVDMD initially increased quadratically ( $P < 0.043$ ) from 86.6% at 15 rpm to 89.0% at 20 rpm, with a small subsequent decrease. The IVNDFD values obtained ranged ( $p > 0.05$ ) from 75.2% to 86.9%.

**Keywords:** Digestibility, *in vitro*, corn, sorghum, starch, steam flaking.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción de carne en México representan un sector económico importante. En los corrales de engorda se ofrecen dietas a base de sorgo y maíz como principales componentes de la dieta del ganado, debido a su alto contenido de energía, en relación con el precio. Por lo tanto, es común encontrar porcentajes de inclusión de 50 a 80% de grano, aportando hasta el 80% del total de la energía de la ración de finalización, y hasta un 35% de la proteína cruda de la dieta.

Cuando un grano representa una proporción importante de la dieta, es importante tener conocimiento de sus características de digestión y de su utilización. Varios estudios sobre el uso de granos de maíz y sorgo rolados al vapor en la nutrición de ganado en corral han sido publicados (Xiong *et al.*, 1990), mostrando una amplia variación en cuanto a la utilización de estos granos en las dietas consumidas por el ganado de engorda. Por mencionar un ejemplo, en gran medida, la variación en la digestibilidad del almidón es debida principalmente a la variación entre los diferentes tipos de grano, los métodos de procesamiento utilizados para el grano entero y la influencia de ciertos factores como la humedad, calor y presión, que son componentes esenciales del proceso del rolado al vapor (Owens *et al.*, 1997).

Debido a que el almidón es el principal componente de los granos de cereal, es importante entender lo que sucede en el rumen. La amplia variación en las características de fermentación de los granos de cereal en el rumen se podría atribuir a los métodos analíticos que se utilizan para la evaluación de la alimentación (Huhtanen, 2006). Fox *et al.* (2004) utiliza una fracción de la tasa de digestión del almidón como una característica importante de la alimentación. Las técnicas *in situ*



se han utilizado ampliamente para determinar una fracción de la tasa de digestión ruminal del almidón, presentándose grandes diferencias en la tasa de digestión entre almidones de diferentes cereales. Sin embargo, estas diferencias no se pueden evaluar *in vivo* utilizando el consumo de materia seca y/o producción de leche o carne. Las técnicas *in situ* tienen varias limitantes, que incluyen pérdidas primarias y secundarias de la materia que es fraccionada, así como diferencias entre el nivel de actividad microbiana dentro de la bolsa (*in situ*) y en el medio ruminal; estos factores pueden sobre o subestimar la digestibilidad ruminal del almidón (Seinbjornsson, 2006).

Por otro lado, las técnicas de digestión *in vitro* son una alternativa para la investigación de la degradabilidad del almidón, ya que tiene algunas ventajas sobre el método *in situ*. Notoriamente, no hay pérdida de partículas y es aplicable a diferentes fracciones del grano, así como a todo el grano. Sistemas automatizados generan y registran una mayor cantidad de datos con mayor precisión, por lo que es posible el uso de modelos más exactos en la evaluación de parámetros de digestión de los granos. Por esta razón, la eficiencia de la digestión del almidón por los rumiantes es de gran importancia para mejorar la eficiencia alimenticia, y como consecuencia, la relación costo:beneficio (Orskov *et al.*, 1986).

## **1.1 Objetivos**

- (1) Determinar los efectos de la velocidad de la roladora con la producción, la densidad y la digestibilidad *in vitro* de la materia seca de sorgo y maíz rolados.
- (2) Utilizar la concentración de solubles de almidón obtenidos mediante una técnica enzimática *in vitro* para determinar la disponibilidad del almidón de granos de maíz y sorgo, mediante su relación con la digestibilidad *in vitro* con líquido ruminal
- (3) Establecer un procedimiento para estimar la disponibilidad del almidón de granos hojueados de maíz y sorgo para el control de calidad en las engordas de ganado.

## **1.2 Hipótesis**

Los solubles de almidón obtenidos mediante una técnica enzimática *in vitro* pueden ser usados para estimar con precisión la disponibilidad del almidón de granos de maíz y sorgo rolados al vapor.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Los granos de cereal en la nutrición animal

Los granos difieren ampliamente en contenido de almidón; los granos de maíz, trigo y sorgo tienen el más alto contenido de almidón, siguiendo la avena y la cebada. Sin embargo, aun cuando existe disponibilidad de éste, el consumo puede estar limitado por su calidad (bajo contenido en nutrientes) ya que pueden aportar hasta un 80% de la energía disponible en la ración (Huntington, 1997).

### 2.2. Componentes morfológicos del sorgo

El grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) se obtiene de la remoción o eliminación de las demás partes de la planta de esta gramínea (en sus variedades e híbridos de éstas), con el fin de ser utilizado como ingrediente en los alimentos para animales. Los granos de sorgo, son considerados granos desnudos puesto que pierden sus envolturas durante la cosecha. Estos granos, están constituidos por tres componentes: el pericarpio (capa protectora que los recubre), el embrión o germen, y el tejido de almacenamiento o endospermo. De los tres componentes, la mayor proporción del peso del grano lo constituye el endospermo, el cual puede variar entre un 80 a 85%, mientras que el germen oscila entre 7 y 12%, y el pericarpio no supera el 8% (Huntington, 1997).

#### 2.2.1. Endospermo

El endospermo está conformado por áreas bien diferenciadas: una córnea o vítrea y otra harinosa, las que a su vez están rodeadas por una zona periférica o sub-aleurona (Kotarski *et al.*, 1992), conocido como endospermo periférico. La proporción

de cada uno de dichos componentes varía según el híbrido que se considere. El endospermo, tanto vítreo como harinoso, está compuesto por gránulos de almidón, la matriz proteica y los cuerpos proteicos, y la porción de cada uno de ellos, así como su tamaño, dependen del lugar en donde se ubiquen, ya sea en la porción vítrea o harinosa. La naturaleza y la composición química de la matriz proteica tienen un profundo efecto sobre las características físicas del endospermo y la exposición de los gránulos de almidón a la digestión enzimática (Rowe *et al.*, 1999).

Los granos de sorgo generalmente tienen una mayor proporción de endospermo periférico que el maíz. La zona del endospermo periférico es extremadamente dura, densa y resistente a la entrada del agua. Dicha área está compuesta de varias capas de células que contienen mayor cantidad de cuerpos proteicos (prolaminas) y gránulos de almidón más pequeños que los del endospermo córneo. Como consecuencia de la alta concentración de cuerpos proteicos en el área periférica, el almidón prácticamente no está disponible para la degradación enzimática (Sullins *et al.*, 1975).

Las diferencias en la estructura del endospermo periférico del grano puede afectar la digestibilidad en mayor proporción que cualquier otro factor (Sullins *et al.*, 1974). La alteración a esta zona es la que generaría la respuesta al procesamiento y el consecuente aumento en la digestión de los nutrientes (Rooney *et al.*, 1986).

Los gránulos de almidón en los endospermos periférico y córneo están rodeados por cuerpos proteicos y se encuentran embebidos en una densa y continua matriz proteica. El endospermo harinoso localizado en el centro del grano, posee gránulos de almidón más grandes y en mayor cantidad que los otros endospermos, y la matriz proteica que los rodea es discontinua y con menor cantidad de cuerpos

proteicos. Además, dicho endospermo, presenta espacios de aire por el menor empaquetado de los gránulos de almidón, los cuales son más susceptibles a acciones externas como el procesamiento de los granos o la digestión (Huntington *et al.*, 1997).

### **2.2.2. Propiedades del almidón**

El principal componente químico de los granos de sorgo es el almidón, el cual puede variar entre un 70 a 80% de la materia seca del grano. Además, los granos presentan pequeñas cantidades de pectinas y azúcares simples, los cuales junto con el almidón componen los carbohidratos no-estructurales del grano (Nocek *et al.*, 1991).

Los granos de almidón están compuestos por dos moléculas principales, amilosa y amilopectina. La proporción de ambas en los gránulos determina la tasa y la extensión de la digestión. La amilosa es un polímero lineal compuesto de unidades de D-glucosa unidas por enlaces tipo  $\alpha$ -1,4. A pesar de esto, se ha descubierto que la amilosa puede presentar un pequeño número de ramificaciones las cuales no superan el 1 a 2% de la molécula. La proporción de la amilosa en el almidón puede variar entre un 0 a 30%, dependiendo de la especie y la variación genética dentro de la especie. Generalmente, los cereales poseen entre un 20 a 30% de amilosa, pero existen los denominados granos tipo waxy o cerosos donde la cantidad de amilosa es muy pequeña o prácticamente no está presente (Rooney *et al.*, 1986).

La amilopectina es un polímero ramificado y comprende entre el 70 y 80% del almidón de los granos. Está formada por una cadena lineal de unidades  $\alpha$ -1,4-D-glucosa y ramificaciones  $\alpha$ -1,6 cada 20 o 30 moléculas de glucosa, las que

constituyen entre 4 o 5% del número total de uniones de la amilopectina. La cantidad de ramificaciones puede variar entre genotipos de una misma especie y cada una de ellas tiene una longitud de aproximadamente 20 unidades de glucosa.

Las moléculas de amilosa y amilopectina permanecen juntas mediante enlaces de hidrogeno. La proporción de amilosa y amilopectina varía entre granos y está determinada genéticamente. Las diferencias entre los contenidos de amilosa y amilopectina pueden afectar tanto la digestibilidad del almidón, así como también las propiedades de procesamiento de los granos. La amilosa se disuelve con cierta dificultad en agua y se precipita en butanol, mientras que la amilopectina es la fracción del almidón más soluble en agua o en solución acuosa de butanol.

La digestibilidad del almidón es inversamente proporcional al contenido de amilosa (Rooney *et al.*, 1986), por lo cual los granos de sorgo y maíz con mayor contenido de amilosa serían menos digestibles. Una de las teorías por la cual la amilosa se hidroliza menos puede ser debido a que está orientada hacia el interior de las moléculas de amilopectina de manera tal que incrementaría los enlaces hidrogeno de las moléculas y por lo tanto limitaría tanto el hinchamiento de los gránulos de almidón, así como la hidrólisis enzimática.

### **2.2.3. Gelatinización y retrogradación del almidón**

Los métodos de elaboración que emplean combinaciones de calor, humedad y procesamiento mecánico para romper la estructura que envuelve al endospermo, se dan para exponer los gránulos de almidón y producir diversos grados de gelatinización del almidón. La gelatinización se produce cuando se aplica suficiente energía para romper los enlaces intermoleculares en las áreas cristalinas

comprendidas en el grano (Lund, 1984). Durante la gelatinización, los gránulos de almidón absorben agua, se hinchan y liberan amilosa, pierden birrefringencia y se vuelven más susceptibles al ataque enzimático. La gelatinización comienza en las áreas amorfas y finalmente con la penetración de calor y humedad se da la hinchazón (Rooney *et al.*, 1986).

El enfriamiento de los gránulos de almidón después de la gelatinización puede dar lugar a la retrogradación, procesos por el cual los gránulos se re-asocian y liberan agua ligada. Los enlaces de hidrogeno se reforman (re-estructuran) dentro de la amilosa y amilopectina, sin embargo, el almidón no regresa completamente a su estructura cristalina original (nativa). Varios factores pueden influir en la retrogradación, incluyendo el contenido de humedad, temperatura, agentes aglutinantes y la concentración del almidón en el grano (Rooney *et al.*, 1986). La retrogradación crea un endurecimiento similar a la unión de los segmentos del almidón que disminuye la porosidad de la matriz interna del almidón, limita la rehidratación y la penetración enzimática (Zinn *et al.*, 2002).

La medición del grado de gelatinización es utilizada a menudo para determinar la eficiencia de los procesos de fabricación de alimentos, ya que los procesamientos de alimentos comúnmente monitorean los cambios en la viscosidad para estimar el grado de gelatinización (Lund *et al.*, 1984). Se han investigado varios métodos para monitorear el grado de gelatinización en granos rolados al vapor, como la susceptibilidad enzimática (Xiong *et al.*, 1990b), el potencial de fermentación (Xiong *et al.*, 1990), pérdida de birrefringencia, el espesor de la hojuela y la densidad aparente de la hojuela. La densidad aparente de la hojuela es la más utilizada para

medir la extensión y consistencia de la hojuela durante el proceso de rolado por su bajo costo (Zinn *et al.*, 2002).

#### **2.2.4. Digestión ruminal del almidón**

Los microorganismos presentes en el rumen, como bacterias, protozoos y hongos, tienen la capacidad de transformar la celulosa, hemicelulosa y pectina presentes en los granos, en ácidos grasos volátiles, que son la principal fuente de energía para los rumiantes, y además, permiten la utilización de fuentes de nitrógeno no-proteico, para su conversión en proteína microbiana y la síntesis de vitaminas hidrosolubles como la B<sub>12</sub> (Orskov *et al.*, 1986).

#### **2.2.5. Proteína**

Un segundo componente que se encuentra en mayor proporción en el grano son las proteínas, y la concentración de las mismas aumenta desde el centro del endospermo hacia el exterior, por lo que se podría afirmar que el área que rodea a la periferia del endospermo contiene la mayor concentración de proteínas. Seckinger y Wolf (1973) reportaron que el endospermo córneo posee dos veces más proteína que el harinoso.

En el sorgo existen cuatro tipos de proteínas que exhiben diferencias respecto a sus propiedades físicas, actividad biológica y calidad nutricional. Según lo propuesto por las mismas, se pueden clasificar de acuerdo a su solubilidad en distintos solventes en:

- (1) Albúminas – solubles en agua.
- (2) Globulinas – solubles en soluciones salinas.



- (3) Prolaminas – solubles en alcohol.
- (4) Glutelinas – solubles en diluyentes alcalinos.

Las proteínas predominantes en el grano de sorgo son las prolaminas, también denominadas kafirinas y se encuentran principalmente en el endospermo. Las kafirinas son deficientes en aminoácidos esenciales como lisina (Seckinger, 1973), metionina y triptófano, lo que determina la baja calidad nutricional de las proteínas del grano de sorgo. Existe una estrecha asociación entre la cantidad total de proteína del grano y el de kafirinas. Por esto, a pesar de que el nivel de proteína aumenta, la calidad nutricional del grano disminuye. De igual forma, Taylor *et al.* (1984) encontraron que al aumentar la cantidad total de proteínas en el grano, la fracción que más se incrementó fueron las kafirinas.

Las glutelinas son las segundas proteínas en orden de importancia respecto a la cantidad presente en el grano, y junto con las prolaminas, forman parte de las proteínas de reserva del mismo. La matriz proteica está formada principalmente por glutelinas, mientras que los cuerpos proteicos están constituidos por kafirinas. Por último, las albúminas y globulinas se encuentran en pequeñas cantidades; en el grano forman parte de las enzimas y otras sustancias biológicamente activas y principalmente se encuentran ubicadas en la capa de aleurona.

#### **2.2.6. La fibra como componente del grano**

El pericarpio de maíz contiene una alta concentración de pared celular (60% de fibra en detergente neutro), principalmente hemicelulosa (54% de la materia seca). La forma física (procesamiento) y el nivel de consumo del pericarpio pueden afectar la utilización de la energía, ya que puede no estar disponible para la

utilización por parte de los microorganismos del rumen. Van Soest (1994) propone un descuento en el valor nutritivo de 18% para el pericarpio de maíz.

El sorgo contiene aproximadamente 10.9% de fibra en detergente neutro (FDN), 5.9% de fibra en detergente ácido (FDA), y 5% de hemicelulosa (HEM= FDN-FDA), mientras que el maíz contiene 9.5% de FDN, 3.4% de FDA y 6.1% de HEM (NRC, 2001).

### **2.2.7. Los taninos como componentes del grano**

En los granos de sorgo existen compuestos fenólicos que pueden afectar su color, apariencia y calidad nutricional. Dichos compuestos pueden ser clasificados en base a su composición química en tres grupos: ácidos fenólicos, flavonoides y taninos. Los ácidos fenólicos se encuentran en todos los tipos de sorgos, mientras que los flavonoides no son siempre detectados. Los taninos se concentran en la testa de la semilla (parte del pericarpio), la cual es un tejido altamente pigmentado, aunque también se han encontrado, pero en menor medida, en el endospermo del grano (Rooney *et al.*, 1986).

Los ácidos fenólicos no tienen efecto sobre la calidad nutricional del grano; solo pueden causar un color indeseable en los alimentos cuando son procesados bajo condiciones alcalinas. Al igual que los ácidos fenólicos, los flavonoides, en el caso en que se hallen presentes, no parecen tener efectos sobre la digestibilidad ni en la palatabilidad de los granos. Por otro lado, los efectos anti-nutricionales de los taninos incluyen la disminución de la digestibilidad de las proteínas, la tasa de crecimiento y de la eficiencia de conversión en bovinos. Por otra parte, los taninos también son considerados como inhibidores del crecimiento bacteriano (Hahn *et al.*,

1984). Los taninos del grano de sorgo pueden disminuir el ataque por pájaros e inhibir el desarrollo de hongos previo a la cosecha, pero también reducen la digestión *in vitro* e *in vivo* de la proteína (Cabral-Filho *et al.*, 2004).

### **2.3. Maíz y sus componentes morfológicos**

Las componentes morfológicas del grano de maíz (*Zea mays L.*) difieren considerablemente en su composición química. La cubierta seminal o pericarpio se caracteriza por un elevado contenido de fibra (aproximadamente 87% FDN), la que a su vez está formada principalmente por hemicelulosa (67%), celulosa (23%) y lignina (0.15%). El endospermo, en cambio, contiene un nivel elevado de almidón (87%), aproximadamente 8% de proteínas y un contenido de extracto etéreo relativamente bajo.

#### **2.3.1. Factores modificadores de la digestión del grano**

Con granos menos vítreos (avena, cebada, triticale, arroz y trigo), en borregos y animales jóvenes que mastican el alimento intensamente, y con bajos niveles de forraje en la dieta, la extensión de la digestión del almidón generalmente es bastante alta para granos no procesados. Sin embargo, para maíz y sorgo, la reducción en el tamaño de partícula, ya sea por el animal o por procesamiento mecánico antes de ofrecerlos al animal, generalmente se incrementa la digestibilidad del almidón.

Los efectos negativos asociados con el consumo de forraje (interacciones del grano con el forraje), en el que un aumento en el consumo de forraje deprime la digestión de almidón, es evidente con granos enteros o rolados. Con altos consumos de alimento y con dietas altas en forraje, aumenta la tasa de paso de las partículas

grandes de maíz por el tracto gastrointestinal, las cuales no son totalmente digeridas (Wylie *et al.*, 1990).

### **2.3.2. El pericarpio**

Es la cubierta de la semilla del grano de maíz que sirve para protegerlo de la humedad, insectos y las infecciones por hongos que obstaculizarían la germinación. Aunque el pericarpio comprende sólo alrededor del 4.7% del peso del grano de maíz, este contiene casi la mitad de la FDN del núcleo (promedio de 10% FDN). Para la digestión del endospermo amiláceo, la cubierta de la semilla debe ser fracturada para permitir que la humedad, los microbios y enzimas puedan entrar. Incluso después del rolado en seco, el pericarpio puede permanecer unido a almidón vítreo, lo que evitaría la entrada de la microflora del rumen y el ataque enzimático. La adherencia del pericarpio al endospermo puede limitar la fermentación o la digestión. La mayor parte de aceite y cenizas se encuentra en el germen mientras que el pericarpio contiene la mayoría de la FDN (Jaeger *et al.*, 2004).

### **2.3.3. Tamaño del germen**

Aunque una disminución en el tamaño relativo del germen reduce el contenido de cenizas y de FDN del grano, el germen lleva la mayor parte del aceite y una gran proporción de los aminoácidos esenciales del grano de maíz. Por consiguiente, la reducción del tamaño del germen no mejora el valor de energía neta del grano porque el contenido de aceite se reduce, también reduciendo la concentración de la mayoría de aminoácidos esenciales (Zinn *et al.*, 1990).

#### **2.3.4. El almidón**

El almidón dentro del grano de maíz está presente como amilopectina (en una estructura multiramificada) o amilosa, la cual es una estructura lineal y es menos digerida por las enzimas. La amilosa puede comprender desde 2% hasta aproximadamente 70% (alta amilosa) del almidón total debido a diferencias genéticas. Típicamente, los híbridos de maíz tienen de 24 a 30% de almidón presente como amilosa, y su fermentación puede ser restringida a un número limitado de cepas bacterianas (Wang *et al.*, 1999).

Con la exposición al calor y la humedad, los gránulos de almidón se hinchan y forman geles. A este proceso se le conoce como gelatinización del almidón. Los gránulos de almidón con alto contenido de amilosa resisten la hinchazón. Con el enfriamiento y el almacenamiento del almidón gelatinizado, ocurre la retrogradación (insolubilización y precipitación espontánea del almidón).

Del 25 a 80% del almidón (duro o vítreo) está presente en la córnea. En el endospermo es donde los gránulos de almidón están densamente empaquetados dentro de una matriz de proteína muy lentamente degradable. El maíz amarillo normalmente contiene aproximadamente el 50% de endospermo vítreo. Considerando que el maíz blanco puede contener el 80% del endospermo vítreo, el almidón restante está depositado en el endospermo harinoso suave como gránulos sueltos adheridos a las paredes celulares del endospermo (Owens, 2002). La tasa y grado de digestión de los gránulos de almidón aislados en el endospermo harinoso del grano de maíz es rápida. Por lo tanto, las limitaciones principales para el tipo y grado de digestión de híbridos de maíz (*in situ*) están asociados con el grado de vitrosidad (Corona *et al.*, 2006). Los híbridos harinosos generan más partículas finas

durante la molienda y éstas pueden salir rápidamente del rumen, aumentando el almidón pos-ruminal. Sin embargo, las partículas finas del endospermo harinoso son fermentadas rápidamente aumentando el riesgo de acidosis.

Jaeger *et al.* (2004) observaron que los híbridos de maíz con una mayor proporción de almidón harinoso fueron más eficientemente utilizados ( $r = 0.83$ ) cuando se rolaron al vapor. Corona *et al.* (2006) mencionaron que las diferencias en la digestión del almidón entre híbridos de maíz se deben a la vitrosidad cuando fueron rolados en seco, pero no cuando se rolaron al vapor.

### **2.3.5. La proteína**

Después del almidón, las proteínas constituyen el siguiente componente químico del grano de maíz, 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 (Huntington, 1997).

La proteína aporta energía y hace referencia al perfil de aminoácidos presente en un alimento; y es preciso conocer sus limitaciones en ambos sentidos. Cuando la proteína se utiliza como fuente de energía, se puede generar una pérdida de aproximadamente un 20 a 25%. Esto es debido a la escasa habilidad del organismo para desdoblar la urea que se forma en la desaminación de los aminoácidos. Cuando sumamos ésta más la pérdida de la digestión incompleta, aproximadamente un 60 a 65% de la energía potencial de la proteína de los alimentos se pierde durante la digestión.

## **2.4. Métodos de procesamiento de los granos**

Mientras que Rowe *et al.* (1999) resumieron las respuestas específicas a las diversas técnicas de procesamiento del grano que pueden limitar el sitio y el grado de digestión, Kaiser (1999) y Loerch y Gorocica-Buenfil (2007) mencionaron las ventajas económicas y las limitaciones de alimentar con grano entero (sin procesamiento mecánico) al ganado.

Para exponer más superficie a la digestión y fracturar el pericarpio, la mayoría de los cereales son rolados o molidos antes de ser ofrecidos al ganado. Para ganado en finalización, el grano de maíz seco es rolado o quebrado obteniéndose de 4 a 10 partículas por grano, pero para vacas en lactancia, se utiliza una molienda mucho más fina. Sorprendentemente, en algunas pruebas con ganado en confinamiento, la digestibilidad del almidón y la energía neta son mayores para granos enteros que para rolados (Owens *et al.*, 1997). Esto puede ser atribuido a la mayor retención ruminal para el grano de maíz entero con respecto al rolado. Con ensilaje de maíz maduro, también, algunos granos de maíz enteros pueden ser encontrados en heces a menos que el grano haya sido adecuadamente procesado durante la cosecha para quebrar los granos o partículas de maíz.

### **2.4.1. Procesamiento en seco**

El grano molido en seco consiste en reducir el tamaño de la partícula del grano mediante el uso de un molino de martillos o de rodillos. El tamaño adecuado de la partícula geométrica del grano molido en seco es un tema poco estudiado para la engorda en corral. Algunos estudios se han realizado con grano rolado en seco, en donde Secritst *et al.* (1995) reportaron para el maíz, el tamaño geométrico adecuado

de las partículas es de 1500 micras. Para el caso del sorgo, Kessen *et al.* (1997) reportaron una mejor utilización del grano con un tamaño geométrico de 1000 micras con ganado de engorda.

#### **2.4.2. Grano con alta humedad**

Existen varios métodos para procesar el grano húmedo. De manera comercial solo se utilizan dos métodos, el método de cosechar el grano húmedo (28-32% de agua), el cual se conserva mediante la fermentación, y el método que consiste en cocer el grano para después rolarlo y aplastarlo mediante su paso por rodillos, el cual se conoce como hojueleado (rolado al vapor). Existen otros métodos húmedos, como el grano reconstituido o acondicionado con humedad, pero son más del área académica e investigación, y se utilizan en pequeña escala (Cooper *et al.*, 2002).

#### **2.4.3. Grano rolado al vapor**

Es importante utilizar fuentes de energía que permitan lograr una buena sincronización entre la degradación de las fracciones de energía y el nitrógeno a fin de optimizar la síntesis de proteína microbiana y su posterior uso a nivel intestinal, para así optimizar el uso del alimento por parte del ganado bovino (Huntington *et al.*, 1997).

El procesamiento del grano en hojuelas consiste en cocer el grano con vapor a una temperatura de 100° C durante 45 minutos. Posteriormente, el grano cocido pasa a través de dos rodillos. El grano adquiere la forma de hojuela con una humedad aproximada de 21%. La humedad del grano rolado depende del periodo que pasa después de salir de la roladora; esto se debe a la pérdida de vapor de agua.



Los efectos del procesamiento en el sitio y la extensión de la digestión del almidón variará con las condiciones del procesamiento (humedad del grano, distancia entre rodillos, y tiempo expuesto al vapor) como ha sido discutido por Zinn *et al.* (2002). El principal factor que limita la extensión de la digestión, ya sea en el rumen o en el intestino delgado, es la superficie expuesta al ataque microbiano o enzimático.

## **2.5. Impacto del procesamiento en el valor nutritivo de un grano**

La principal razón del procesamiento del maíz es para aumentar su valor alimenticio. El “valor alimenticio” es una función compleja del contenido de nutrientes, las características físicas y químicas que afectan la digestibilidad, aceptabilidad (palatabilidad) y las interacciones asociativas con el proceso digestivo. Por consiguiente, los métodos de procesamiento que podrían mejorar la digestión, no se reflejan en una mejora en el desempeño productivo. Por lo tanto, los métodos de procesamiento se seleccionan económicamente más para mejorar la digestibilidad y la palatabilidad, sin afectar negativamente el pH ruminal y causar una disfunción digestiva (Sindt *et al.*, 2004).

### **2.5.1. Efecto en la disponibilidad del almidón**

La disponibilidad del almidón a nivel ruminal se encuentra fuertemente influenciada por la solubilidad y fermentación de las proteínas. El tipo y cantidad de proteínas de almacenamiento en el grano determina su solubilidad. Las prolaminas o kafirinas, al ser insolubles en el líquido ruminal, afectarían en forma negativa la disponibilidad de almidón para la degradación bacteriana. El endospermo periférico

que presentan los granos, con gran contenido de cuerpos proteicos y por consiguiente de prolaminas, es la principal barrera que deben atravesar las bacterias ruminales, sobre todo cuando el grano no se ha procesado.

Siempre que la digestión ruminal del almidón se incrementa, el aporte de almidón post-ruminal se reduce. Sin embargo, la digestión post-ruminal del almidón que deja el abomaso es numéricamente mayor para maíz húmedo que para granos rolados en seco. La molienda del grano a un tamaño de partícula muy fino incrementa la digestión del almidón. Sin embargo, los beneficios en la digestión del almidón del molido fino son considerablemente menores que aquellos obtenidos con fermentación o con procesamiento con calor (Firkins *et al.*, 2001). No obstante, el rolado fino o molido incrementa el valor nutritivo de los granos más vítreos para novillos (Brethour *et al.*, 1990) y vacas en lactancia (Bush *et al.*, 1972).

Para vacas en lactancia, menos del 60% del almidón digerido en el tracto digestivo ocurre en el rumen en todos los métodos de procesamiento (excepto para el maíz de alta humedad), con lo que gran parte del almidón se digiere en el intestino delgado o se fermenta en el intestino grueso. La importancia de la digestión post-ruminal se incrementa cuando la extensión de la digestión ruminal es baja y más almidón fluye al intestino. Debido a las reducidas pérdidas de metano y calor, el almidón digerido en el intestino delgado fue considerablemente de mayor valor energético que el almidón fermentado en el intestino grueso. Sin embargo, el impacto que el sitio de digestión tiene en la eficiencia energética del animal está relacionado con el grado en el cual el almidón es digerido en el intestino delgado (Huntington *et al.*, 2006).

Rowe *et al.* (1999) mencionan que procesando el grano de maíz para mejorar la digestión ruminal también mejora la digestión post-ruminal del almidón que fluye al intestino. Esto también apoya el concepto que factores similares (tamaño de partícula y encapsulamiento de proteína) limitan la digestión del almidón en ambos sitios.

### **2.5.2. Efecto en la eficiencia energética**

La eficiencia energética es mayor cuando la glucosa entra en el abomaso o intestino delgado que cuando la glucosa entra en el rumen (Huntington *et al.*, 2006). Cuando el esqueleto de carbono y la energía de la glucosa desaparecen en el intestino delgado, y si este proporciona energía útil para el rumiante, ha sido ampliamente debatido, ya que la recuperación de la glucosa en el sistema porta nunca es completo.

Varios estudios han indicado que la síntesis de grasa es mayor cuando la glucosa se infunde post-ruminalmente (Armstrong *et al.*, 1968; Rust, 1992; McLeod y Harmon, 2007). Armstrong *et al.* (1968) observaron que el 54% de la energía obtenida de la infusión en el rumen, se convierte en grasa mientras que el 71% de la glucosa que entra en el abomaso se almacena como grasa.

En rumiantes, la deposición de grasa en el omento se ha incrementado con la infusión de glucosa en el abomaso de ovejas (Rust, 1992) o el intestino delgado del ganado (McLeod y Harmon, 2007). La glucosa adicionada al alimento no aumento el peso del tejido magro o de la canal, pero en vez de eso, aumento la masa intestinal.

Un incremento del almidón que pasa del rumen sin degradarse causa una reducción de la energía disponible para la síntesis de proteína microbiana que es necesaria en becerros en crecimiento y vacas lecheras de alta producción. Si es

fermentado en el intestino grueso, debemos esperar pérdidas fecales de nitrógeno y energía. No obstante, cambiando el sitio de digestión del almidón desde el rumen al intestino delgado reducirá las pérdidas de metano y la acidez del rumen. Esto último permitirá mantener un pH más elevado y óptimo para la digestión de la fibra. En resumen, en cuatro estudios en los que Zinn *et al.* (2002) compararon el grano rolado al vapor con el rolado en seco, se observó que el rolado al vapor tuvo una mejora de los valores de EN de 15.9 a 25.9%.

## **2.6. Variables que tienen un efecto en el proceso de rolado del grano**

Los principales factores que afectan el procesamiento de los cereales son, densidad de la hojuela, humedad del grano, tiempo y humedad del remojo del grano y cocimiento del grano (Xiong *et al.*, 1991).

### **2.6.1. La densidad del grano rolado**

La variable más importante que afecta la disponibilidad del almidón es el espesor de la hojuela. En estudios resumidos por Owen y Zinn (2005), el rolado a baja densidad aumento la digestión del almidón en todos los sitios, en particular en el intestino delgado.

### **2.6.2. La humedad del grano en la gelatinización del almidón**

Los granos de cereal rolados con alta humedad se degradan más rápido en el rumen (Stock *et al.*, 1987a, b) que los rolados en seco. Los granos hojueleados con alta humedad mejoran el desempeño y la eficiencia alimenticia del ganado (Ladely *et al.*, 1995). McDonough *et al.* (1997) informaron que la adición de humedad al grano

entero antes de ser procesado, mejora la estructura de la hojuela y el grado de gelatinización del almidón, además de reducir las partículas finas y el polvo.

Para que el almidón de un grano se gelatinice, se requiere un proceso de humedad y calor. Para el proceso de gelatinización se requiere un porcentaje de agua mayor al 30% y una temperatura entre 70 a 80°C, valor que dependerá de la fuente de origen del almidón. Durante el proceso, se romperán los puentes de hidrogeno intermoleculares de las partes amorfas de los gránulos de almidón, lo que provoca el hinchamiento por una absorción progresiva e irreversible de agua, que finalmente se une a la estructura.

Después de que la parte amorfa se ha hinchado, la parte cristalina inicia un proceso similar, disminuyendo el número y tamaño de las partes ordenadas. Un grano gelatinizado ha perdido orden a nivel molecular. El estudio de los cambios en la micro-estructura de los almidones durante el proceso de gelatinización se realiza mediante distintas técnicas que tratan de estimar el orden interno de los gránulos. Una de las técnicas más usada es la Calorimetría de Escaneo Barrido Diferencial (Differential Scanning Calorimetry; DSC), que determina la temperatura y el rango en el cual suceden los cambios de estado y flujo de calor involucrado. Marchat y Blanshard (1978) encontraron que durante la gelatinización ocurren tres procesos: difusión del agua dentro del grano, desaparición de la birrefringencia, y expansión del grano. También se han desarrollado técnicas calorimétricas para comparar la pérdida de estructura física del almidón al gelatinizarse.

### **2.6.3. El proceso de remojar el grano**

La absorción de humedad suaviza el grano, lo que reduce el tiempo de procesamiento y el gasto de energía para producir una hojuela de calidad. Además, la mayor absorción de humedad puede mejorar la resistencia o integridad de la hojuela, y la reducción de formación de polvo y finos (McDonough *et al.*, 1998).

#### **2.6.4. El proceso de cocimiento del grano**

Al pasar el grano cocido por los rodillos, se rompe la matriz de la proteína, la cual mantenía la estructura globular del almidón. El almidón que está gelatinizado es rápidamente fermentado en el rumen. Sin embargo, la amilosa en granos expandidos puede endurecerse para formar almidón resistente a la digestión, si el grano es enfriado lentamente (Ward y Galyean, 1999).

### **2.7. Procedimientos usados para determinar disponibilidad del almidón**

#### **2.7.1. En grano rolado**

La digestibilidad de un alimento se define como la proporción del alimento que no es excretado en las heces y se supone por lo tanto, que ha sido absorbido. Generalmente la digestibilidad se representa por el coeficiente de digestibilidad expresando en % de la MS (Mc Donald *et al.*, 1979).

Se han propuesto varios métodos de laboratorio para predecir la digestión del almidón, además de la estimación enzimática de disponibilidad de almidón utilizada en los laboratorios comerciales para evaluar granos rolados al vapor. Estos incluyen producción de gas mediante la incubación con una levadura, evaluación microscópica de gelatinización, el grado de acceso del almidón el cual se utiliza tanto con ensilajes como con granos (Basilea *et al.*, 2006), 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 1/4" del tamaño del grano (> 4.25 mm) del maíz ensilado son menos digeridas *in vitro* que las partículas más pequeñas (Ferreira y Mertens, 2005).

En la industria de procesamiento de alimentos (Varriano-Marston *et al.*, 1980; Marconi *et al.*, 2004) emplearon un método de laboratorio relativamente sencillo titulado gelatinización del almidón digestible (DSG; digestible starch gelatinization) para evaluar las propiedades físico-químicas de los alimentos húmedos ricos en almidón. Con esta técnica de laboratorio, se puede cuantificar el grado de gelatinización del almidón mediante la siguiente fórmula:

$$\text{DSG (g/kg almidón)} = \text{Almidón recuperado} / \text{almidón total} \times 1000$$

### **2.7.2. En las heces**

Zinn *et al.* (2002) mencionan que el mejor método de laboratorio para calificar la calidad del grano procesado es mediante la determinación del contenido de almidón en las heces, ya que se ha reportado una importante correlación entre este parámetro y la digestibilidad del almidón; un nivel por debajo del 5%, se considera adecuado.

Si el aporte de almidón por el alimento y la excreción de almidón fecal se conocen, la digestibilidad del mismo se puede calcular. Mediante el empleo de marcadores internos o externos (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 de la digestibilidad del almidón. Esto implicaría que el almidón fecal,

el cual representa una pérdida de energía, debe ser inversamente proporcional a la disponibilidad de energía a partir de almidón en el rumen e intestino delgado. La estimación directa de la digestibilidad del almidón en condiciones de campo puede ser muy útil para evaluar la veracidad de los índices de laboratorio, así como la eficacia de los métodos de procesamiento de granos empleadas por los productores (Zinn *et al.*, 2007).

## **2.8. La digestión**

La digestión comprende todas las modificaciones que sufre el grano al pasar a través del tracto digestivo y que lo preparan para ser absorbido y utilizado por los microorganismos (Huntington, 1997). La digestión es el proceso por el cual los alimentos son modificados en su composición física y química y reducidos a compuestos más sencillos por los microorganismos, para poder ser absorbidos y metabolizados. La mayoría de estos compuestos son solubles en agua y pueden ser absorbidos por la membrana mucosa que recubre el tracto digestivo.

### **2.8.1. La digestibilidad**

La digestibilidad de los componentes químicos de un grano se define como la proporción que no es excretada en las heces, y por lo tanto, se asume que han sido absorbidos. Esto es representado por el coeficiente de digestibilidad que es expresado en porcentaje de materia seca. Es por esto, que la palabra digestibilidad es normalmente utilizada para indicar que los compuestos nutricionales y sustancias afines a los granos son absorbidos desde el sistema digestivo, una vez que han



actuado las enzimas digestivas y que los microorganismos desdoblan estos compuestos.

Es posible determinar el valor potencial de un grano para suplementar un determinado nutriente mediante análisis químicos, sin embargo, el valor real que tiene para el ganado es inferior, ya que durante los procesos de digestión, absorción y metabolismo se generan pérdidas (Orskov *et al.*, 1986).

### **2.8.2. Digestibilidad aparente**

Es la fracción de la ingesta que no se puede recuperar en las heces. En la mayoría de los estudios de digestión se acepta que toda la materia que aparece en las heces es parte del grano que no es digestible. Sin embargo, Las heces contienen algunos productos del organismo, como residuos de jugos digestivos, células muertas, y mucosa de las membranas que recubre al sistema digestivo y desechos. Además, las heces contienen microorganismos vivos y muertos, y fracciones del grano (digestible) que no fueron digeridos (Orskov *et al.*, 1986).

### **2.8.3. Digestibilidad verdadera**

Se refiere a la digestibilidad aparente menos la fracción que representa a los compuestos endógenos. La digestibilidad verdadera de los granos es siempre más baja que la digestibilidad aparente ya que parte de las heces son de origen metabólico (Orskov *et al.*, 1986).

### **2.8.4. Coeficiente de digestibilidad**

Se refiere al total de los nutrientes encontrados en las heces que son restados del total de nutrientes ofrecidos al animal, la diferencia considerada como la digestibilidad aparente. Esta diferencia se multiplica por cien para convertirla en porcentaje (coeficiente de digestión =  $\text{Nutrientes digeridos} / \text{total de nutrientes consumidos} \times 100$ ) (Orskov *et al.*, 1986).

## **2.9. Técnicas para medir la digestibilidad del almidón**

El valor nutritivo de los granos de cereal dependerán del tipo y calidad de nutrientes digestibles que se encuentran disponibles para el animal por unidad de tiempo, y el valor nutritivo estará en función de proporción, consumo, velocidad, grado de digestibilidad, y la eficiencia con que son utilizados los nutrientes por el ganado. Por esta razón, el conocimiento de la digestibilidad del almidón es de gran importancia para la nutrición y alimentación de los animales.

Debido a la importancia que representa la variable digestibilidad, existen numerosos métodos para determinarla, los cuales podemos agrupar en digestibilidad *in vivo*, *in vitro* e *in situ* (Orskov *et al.*, 1986). La determinación *in vivo* de la digestibilidad del grano es un proceso algo laborioso y que por consecuencia, en algunos casos es costoso, ya que se requiere la alimentación y manejo de animales. Por esta razón, se han establecido algunos métodos de laboratorio para su determinación, las cuales simulan con ayuda de equipo de laboratorio, la digestión de los granos de cereal que ocurre de manera natural en el sistema digestivo de los rumiantes. A partir del método *in vitro* que desarrollo Van Soest (1994), fue desarrollado el sistema Daisy<sup>®</sup> (ANCOM), el cual permite incubar simultáneamente 100 muestras de grano independientes, que son distribuidas en cuatro frascos de

vidrio, donde se controla el calor de manera uniforme y una agitación constante durante la incubación por 48 horas consecutivas. De este modo, la digestibilidad aparente tendrá repetitividad, y será reproducible y uniforme, logrando evaluar la digestibilidad de los granos y otros alimentos en forma rápida, simple y con menor cantidad de recursos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. Ubicación e instalaciones

Dos estudios se llevaron a cabo para evaluar la disponibilidad del almidón de granos de maíz y sorgo rolados al vapor. Muestras de sorgo y maíz rolados fueron obtenidas de una engorda localizada en el estado de Nuevo León. Para el estudio de digestibilidad *in vitro*, líquido ruminal fue obtenido a través de la fistula ruminal de una becerro, en el Centro de Investigación en Producción Animal (CIPA) de la Universidad Autónoma de Nuevo León, ubicado en el municipio de Linares, Nuevo León.

### 3.2. Diseño experimental

En el *experimento 1*, se obtuvieron 168 muestras de maíz rolo al vapor. El diseño experimental para el estudio fue un diseño completamente al azar para 7 tratamientos (velocidades de la roloadora de 15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 rpm). Se obtuvieron 4 muestras para cada velocidad de rolo del grano, cada una incluyendo 3 sub-muestras en las posiciones izquierda, centro e derecha del rodillo, cuyos resultados se promediaron. La densidad del rolo al vapor se determinó inmediatamente después de colectar las muestras de la roloadora. Los solubles de almidón en el laboratorio comercial AQUA LAB y la digestibilidad *in vitro* se determinó en el Laboratorio de Nutrición Animal de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.

En el *experimento 2*, se obtuvieron 84 muestras de sorgo rolo al vapor. El diseño experimental para el estudio fue un diseño completamente al azar para 7 tratamientos (velocidades de la roloadora de 15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 rpm). Se

obtuvieron 4 muestras para cada velocidad de rolado del grano, cada una incluyendo 3 sub-muestras en las posiciones izquierda, centro y derecha del rodillo, cuyos resultados se promediaron.

### **3.3. Muestreo y procesamiento de los granos**

El proceso de rolado se llevó a cabo con dos roladoras marca R&R Machine Works, con rodillos de 24" de diámetro x 48" de largo. El proceso de rolado se inició con el cocimiento al vapor del grano a través de un cocedor, durante un tiempo de 45 minutos a una temperatura de 100°C, para permitir que el vapor, la humedad y el calor penetren en el grano, incrementando la gelatinización. Debido a los ajustes que se hacen a diario, la densidad del rolado podrá variar considerablemente, dependiendo de factores como la humedad del grano seco o humedad después del remojo.

El proceso de rolado se llevó a cabo inmediatamente después de que el grano pasara por el cosedor, pasando después por la roladora en donde fue aplanado entre dos rodillos corrugados de gran diámetro. Después de iniciado el proceso de rolado, el equipo fue ajustado a diferentes velocidades de rolado, iniciando con 15 rpm, y terminando con 45 rpm. Las muestras se obtuvieron en tres posiciones de los rodillos (izquierda, centro y derecha).

Para medir la densidad (g/litro) de las muestras se usó un medidor de densidad manual y también se pesó el material que cupo en el medidor de un litro. Posteriormente, las muestras de grano rolado fueron llevadas al laboratorio para determinar la humedad, el contenido de solubles de almidón, y la digestibilidad *in vitro* del almidón.

Los siguientes parámetros fueron considerados dentro procedimiento de rolado de los granos al vapor:

- (1) El grano pasó por un proceso de limpieza antes de ser almacenado, remojado, cocido y rolado.
- (2) Las corrugaciones usadas por pulgada en el rodillo fueron de 14 a 16 para rolar ambos, sorgo y maíz.
- (3) La humedad del grano de remojo que se obtuvo fue entre 19 y 20%, dejando el grano en tolvas de remojo, junto con un surfactante, durante 8 a 10 horas antes del cocimiento.
- (4) La humedad de la hojuela que se buscó fue de 21 a 22%.
- (5) La caldera se operó con una presión de 6 a 6.5 kg (normalmente 6 kg, y si el grano seco contiene demasiada humedad, 6.5 kg).
- (6) La temperatura del cocedor fue de 100°C.
- (7) La cantidad de surfactante que se utilizó fue de aproximadamente 110 ml (3 oz) por tonelada de grano.
- (8) Se mantuvo un tiempo de cocimiento del grano de 45 minutos.
- (9) Se acondicionó (calentó) el grano durante 15 minutos antes de iniciar el proceso de rolado (para obtener una efectividad máxima después de 30 minutos de haber iniciado el proceso de hojueleado).

#### **3.4. Análisis químicos de las muestras**

Después de medir la densidad (g/L) del grano rolado al vapor en la engorda, las muestras se llevaron a AQUA LAB para determinar la humedad del grano rolado al vapor (%) y el contenido de solubles de almidón. La disponibilidad de almidón del

grano rolado fue estimada mediante una relación de estas variables con la disponibilidad del almidón mediante una técnica analítica reportada por el Beef Cattle Research Center, Kansas State University.

Para determinar la humedad del grano rolado al vapor, las muestras se colocaron en una estufa de aire forzado a una temperatura de 105° C durante 12 horas, se dejaron enfriar en un desecador, y posteriormente se pesaron en una balanza de plataforma con una precisión de 1 gramo. Las muestras de grano fueron molidas a través de una malla de 1 mm en un molino Wiley para su análisis posterior. Los análisis se llevaron a cabo por triplicado para determinación de materia seca (MS) y proteína cruda (AOAC, 1997). La proteína cruda (PC) fue calculada como  $N \times 6.25$ . El contenido de cenizas se obtuvo después de la combustión de las muestras de grano a 600°C para calcular el contenido de materia orgánica ( $MO = MS - \text{cenizas}$ ). La fibra en detergente neutro, fibra en detergente ácido y lignina en detergente ácido fueron determinados de acuerdo a procedimientos reportados por Van Soest (1991), usando bolsas de filtración (F57) con un analizador de fibra Ankon® modelo A200. Una amilasa resistente al calor fue usada para facilitar la filtración de los residuos de fibra. La PC de la fibra en detergente neutro (CPDN; CP asociada con la FDN, como por ciento de la MS) y la PC de la fibra en detergente ácido (CPDA; CP asociada a la FDA, como por ciento de la MS) fueron determinadas. La hemicelulosa fue estimada como la diferencia entre FDN y FDA. El contenido de los carbohidratos no-fibrosos (CNF) fue calculado como sigue:

$$CNF = MS - (PC + EE + \text{cenizas} + FDN)$$

### 3.5. Calculo de disponibilidad del almidón

Para determinar los solubles de almidón y la disponibilidad del almidón de granos de maíz y sorgo, el contenido de solubles de almidón fue obtenido usando una técnica analítica reportada por el Beef Cattle Research Center, Kansas State University, usando una glucoamilasa (*Aspergillus niger*) en solución buffer (150 unidades enzima/ml; pH 4.5). Los materiales y equipos utilizados en la técnica fueron: un baño de vapor marca Fisher Scientific modelo Isotemp 25 y un refractómetro modelo RHB-10ATC con escala de 0 a 10 grados Brix. El procedimiento fue:

- (1) Se agregó 25 ml de una solución de glucoamilasa (*Aspergillus niger*) a un litro de acetato de sodio al 0.1 M.
- (2) Se usó un refractómetro calibrado para cada preparación de solución de enzima que se utilizó: se colocaron varias gotas de mezcla buffer sobre el prisma del refractómetro, después se tomó una lectura de la concentración de solubles (%) en el refractómetro que debe indicar 0% de solubles.
- (3) Una vez calibrado el refractómetro se procedió a realizar el análisis de disponibilidad de almidón de la siguiente manera:
- (4) Se determinó la humedad de la muestra en una estufa de aire forzado a 105°C, se calentó el baño de vapor a 55°C para calentar la solución enzimática.
- (5) Se agregaron 25 gramos de la muestra en un vaso de precipitado de 250 ml.
- (6) Posteriormente, se agregaron 100 ml de la solución enzimática precalentada y se mezcló.
- (7) Se incubo la muestra en el baño de vapor por 15 minutos. Después de 1 minuto de incubación, se mezcló el contenido, y a los 5 minutos, se agito la muestra por segunda vez.



- (8) Después de que paso el tiempo de incubación, la muestra se filtró en papel Whatman #1.
- (9) Una vez filtrada la muestra, se colocaron tres gotas de la solución filtrada en el prisma del refractómetro y se puso la cubierta sobre la solución evitando la formación de burbujas.
- (10) Finalmente, se registraron los valores observados como contenido de solubles (%).

### **3.6. Digestibilidad *in vitro* de la materia seca**

#### **3.6.1. Manejo y alimentación**

Para llevar a cabo el proceso de digestión *in vitro* se utilizó una vaquilla fistulada en el rumen para tomar líquido ruminal como fuente de inóculo. La vaquilla fue fistulada en el rumen, y una vez que esta se recuperó y adapto a la fistula, se prosiguió a alimentar a la vaquilla con una dieta de finalización durante 15 días, la cual contenía 14% de proteína (base seca), compuesta de heno de pasto Klein, sorgo, pasta de soya, melaza, minerales, vitaminas y monensina sódica. Una vez que la vaquilla fue adaptada a la dieta durante un periodo de 15 días, se prosiguió a obtener una muestra de líquido ruminal para usarse como inóculo.

#### **3.6.2. Alimentación y obtención del líquido ruminal**

Las muestras de granos de sorgo (84) y maíz (168) fueron evaluadas para determinar la degradabilidad *in vitro*. Fluido ruminal fue colectado de un bovino fistulado en el rumen, consumiendo una dieta de engorda a base de maíz o sorgo, dependiendo del estudio que se esté llevando a cabo. La dieta de engorda tuvo

aproximadamente 14.5% de proteína cruda, 2.1 Mcal ENm/kg y 1.45 Mcal ENg/kg. La técnica de degradación *in vitro* fue la recomendada por Mehrez and Ørskov (1977), modificada para las condiciones *in vitro* establecidas para el aparato Ankom Daisy II<sup>®</sup>. Dos sub-muestras (0.3 g cada una) de cada muestra de grano rolado y una muestra blanco fueron introducidas en bolsas Ankom<sup>®</sup> las cuales fueron identificadas previamente. Las muestras fueron incubadas 48 horas, teniendo 2 muestras para cada tiempo de incubación para determinar digestibilidad *in vitro* de la materia seca.

### **3.7. Análisis estadístico**

Las variables de producción, densidad de rolado, humedad del rolado, solubles de almidón, almidón disponible, y digestibilidad *in vitro* de la materia seca y de la FND fueron analizadas con un diseño completamente al azar con 7 tratamientos (15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 rpm) usando el programa SPSS<sup>®</sup> (versión 16.0 para Windows<sup>®</sup>). Polinomios ortogonales se usaron para determinar los efectos lineal y cuadrático de las variables en respuesta a un incremento en las rpm de la roladora. El método Tukey fue usado para la comparación de medias.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Experimento 1 – Maíz rolado

En el Cuadro 1, se presentan las medias de tratamiento para las variables amperaje, densidad de rolado y producción para maíz. Conforme aumentaron la velocidad de la roladora de 15 a 45 rpm, el amperaje aumentó linealmente ( $P < 0.001$ ) de 22.0 a 28.6. La producción de grano rolado aumentó de 5.8 toneladas por hora a 15 rpm, a 11.2 toneladas por hora a 35 rpm (Figura 1), sin cambio en producción a más velocidad de rolado. Este aumento representa 1.93 veces más producción de grano rolado al vapor con la velocidad más alta de 45 rpm. El acondicionamiento del grano mejora la eficiencia del proceso de rolado. En el proceso de rolar al vapor el grano, se remoja (humecta) el grano usando un surfactante y agua. La humedad del grano aumenta hasta 20% antes de entrar al cocedor, para posteriormente ser tratado con vapor y pasar por rodillos. En el proceso de rolar grano al vapor, la penetración de humedad suaviza al grano, lo que reduce el tiempo de procesamiento y el gasto de energía para producir una hojuela de calidad (McDonough *et al.*, 1997).

El remojo del grano antes de rolar aumenta la gelatinización y la digestibilidad de la materia seca y la eficiencia alimenticia. El acondicionamiento del grano de maíz con vapor durante 67 minutos incrementó la humedad de la hojuela en un 3%, al compararlo con 34 a 47 minutos (Zinn, 1990a), no observando una mejora en la digestibilidad del almidón de maíz con el acondicionamiento con vapor durante más de 34 minutos. La mayor absorción de humedad puede mejorar la resistencia o integridad de la hojuela, y reducir la formación de polvo y finos. Zinn (1990b) y

Theurer *et al.* (1999) reportaron que un aumento del grado de procesamiento al adicionar humedad, aumenta la susceptibilidad a las enzimas y la disponibilidad del almidón en los granos rolados al vapor.

El tratamiento hidrotérmico con calor y humedad cambia las propiedades físico químicas de los almidones, al facilitar las interacciones de las cadenas de almidón amorfas y cristalinas. El grado de estos cambios es influenciado por la composición de almidón, contenido de humedad y la temperatura durante el procesamiento del grano y por la organización de las cadenas de amilosa y amilopectina dentro de los gránulos de almidón (Firkins *et al.*, 2001). Con grano rolado a baja densidad, aumenta la digestión del almidón en todos los sitios del tracto gastrointestinal, principalmente en el intestino delgado (Owen y Zinn, 2005).

La densidad de rolado cambió cuadráticamente ( $P < 0.001$ ), llegando a un máximo de 396 g/L a 30 rpm, sin un cambio posterior. La disponibilidad del almidón está altamente correlacionada con la densidad de hojuela. Entre menor es la densidad del grano rolado, mayor va a ser su cocimiento, y consecuentemente, la digestibilidad del almidón.

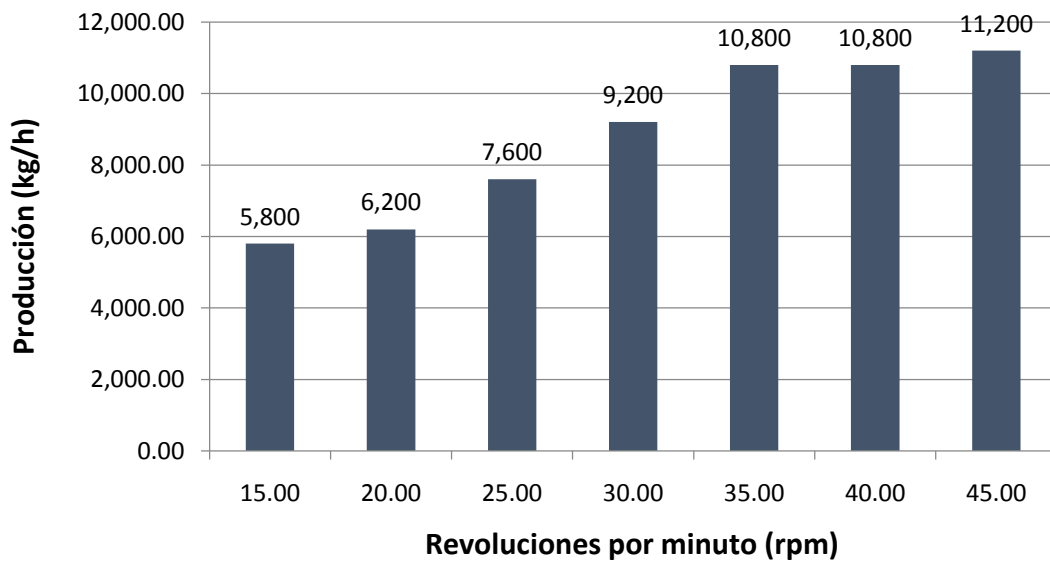
En el proceso de rolar granos, cuando se adiciona humedad, la degradación en el rumen será mayor a la degradación de los granos rolados en seco, y se tendrá un mejor desempeño del ganado debido a una mejor eficiencia alimenticia. McDonough *et al.* (1997) mencionan que el mayor porcentaje de humedad, que pueda ser alcanzado mediante la adición de más agua durante el cocimiento al vapor, mejorara la estructura y el grado de gelatinización del almidón. Esto era de esperarse puesto que la matriz de proteína que envuelve los gránulos de almidón es

Cuadro 1. Amperaje, densidad de rolado y producción de maíz rolado a varias velocidades (rpm) de rolado.

| Variable                 | Revoluciones por minuto |                   |                    |                     |                   |                   |                   | EE   | P       |            |
|--------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|---------|------------|
|                          | 15                      | 20                | 25                 | 30                  | 35                | 40                | 45                |      | Lineal  | Cuadrática |
| Amperaje                 | 22.0 <sup>c</sup>       | 22.8 <sup>c</sup> | 24.0 <sup>bc</sup> | 25.3 <sup>abc</sup> | 29.2 <sup>a</sup> | 28.6 <sup>a</sup> | 28.6 <sup>a</sup> | 1.11 | < 0.001 | 0.418      |
| Densidad de rolado (g/L) | 366 <sup>c</sup>        | 380 <sup>bc</sup> | 380 <sup>bc</sup>  | 396 <sup>a</sup>    | 392 <sup>ab</sup> | 394 <sup>ab</sup> | 392 <sup>ab</sup> | 3.69 | < 0.001 | < 0.001    |
| Producción (ton/h)       | 5.8                     | 6.2               | 7.6                | 9.2                 | 10.8              | 10.8              | 11.2              | 0.45 | 0.001   | 0.110      |

<sup>a,b,c</sup> valores con diferentes letras difieren entre sí (P < 0.05).

Figura 1. Producción (kg/h) de maíz a varias velocidad de rolado al vapor



mayor en el sorgo que en el maíz. Por lo tanto, las limitaciones principales para el tipo y grado de digestión de híbridos de maíz (*in situ*) están asociados con el grado de vitrosidad (Corona *et al.*, 2006).

En el Cuadro 2, se presentan las medias de solubles de almidón y el almidón disponible estimado para maíz a varias velocidades de rolado. Los solubles de almidón aumentaron cuadráticamente ( $P = 0.05$ ) con un aumento en la velocidad de rolado para llegar a un máximo de 5.53% a las 40 rpm, reduciéndose significativamente a los 45 rpm. El almidón disponible, debido a que se calcula usando el porcentaje de solubles de almidón, tuvo una tendencia similar ( $P = 0.064$ ). Xiong *et al.* (1991) reporta que si el proceso de rolado es eficiente la disponibilidad del almidón del grano será de 70% del total del almidón en promedio. Para nuestro estudio el cálculo de almidón disponible fue de 71% con 40 rpm.

En el Cuadro 3, se presenta la densidad de rolado, la humedad, los solubles de almidón y el almidón disponible del maíz rolado a 0 y 10 minutos de haber salido de la roladora. Todas las variables cambiaron ( $P < 0.001$ ) a los 10 minutos de haber salido de la roladora. Con la pérdida de humedad, la densidad de rolado se redujo, mientras que la concentración de solubles de almidón aumentó. Consecuentemente, la medición de estas variables debe llevarse a cabo inmediatamente saliendo de la roladora. Algunos estudios realizados por Zinn (1990b) y Brown *et al.* (2000) sobre el efecto de la densidad de rolado de maíz, reportan una mejor relación costo beneficio cuando se baja la densidad del maíz de 360 a 310 g/L. Ellos también acondicionaron el grano, agregando agua y surfactantes en un 7.5%, antes de rolar el grano. Sin embargo, no encontraron alguna diferencia en el consumo al compararlo con grano que no se

Cuadro 2. Solubles de almidón y almidón disponible de maíz a varias velocidades (rpm) de rolado.

| Variable                | Revoluciones por minuto |                    |                    |                    |                   |                   |                   | EE    | P      |            |
|-------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|--------|------------|
|                         | 15                      | 20                 | 25                 | 30                 | 35                | 40                | 45                |       | Lineal | Cuadrática |
| Solubles de almidón (%) | 4.30 <sup>bc</sup>      | 4.30 <sup>bc</sup> | 4.38 <sup>bc</sup> | 4.35 <sup>bc</sup> | 4.73 <sup>b</sup> | 5.53 <sup>a</sup> | 4.11 <sup>c</sup> | 0.147 | 0.005  | 0.051      |
| Almidón disponible (%)  | 66.9 <sup>bc</sup>      | 66.8 <sup>bc</sup> | 67.1 <sup>bc</sup> | 67.0 <sup>bc</sup> | 68.3 <sup>b</sup> | 71.0 <sup>a</sup> | 66.3 <sup>c</sup> | 0.50  | 0.004  | 0.064      |

<sup>a,b,c</sup> valores con diferentes letras difieren entre sí ( $P < 0.05$ ).



Cuadro 3. Densidad, humedad, solubles de almidón y almidón disponible de maíz rolado al vapor a 0 y 10 minutos después de salir de la roladora.

| Variable                | Tiempo post-rolado (min) |      | EE   | P <sup>1</sup> |
|-------------------------|--------------------------|------|------|----------------|
|                         | 0                        | 10   |      |                |
| Densidad (g/L)          | 386                      | 370  | 1.8  | < 0.001        |
| Humedad (%)             | 16.9                     | 14.7 | 0.17 | < 0.001        |
| Solubles de almidón (%) | 4.49                     | 5.05 | 0.07 | < 0.001        |
| Almidón disponible (%)  | 67.5                     | 69.4 | 0.24 | < 0.001        |

<sup>1</sup> Valores de probabilidad menor a 0.05, difieren entre sí.

acondiciono. Zinn *et al.* (2002) reportó que el alimentar al ganado con granos rolados al vapor que se acondicionaron previamente con agua y surfactante en un 7.5%, el consumo adicional de esta humedad no mostro una interacción con la densidad del grano en cuanto a rendimiento del ganado. Sin embargo, este autor menciona que disminuir la densidad de rolado de 390 a 310 g/L incremento la ganancia diaria de peso en 4.5% y la eficiencia de alimentación en un 3%.

Hales *et al.* (2010) evaluaron los efectos de la densidad aparente de grano de maíz rolado al vapor a densidades de 283, 335 y 386 g/L, en dietas con 6 o 10 % de heno de alfalfa picada. La densidad con la que se obtuvo mayor ganancia de peso fue de 335 g/L.

En el Cuadro 4, se presentan las digestibilidades *in vitro* de la MS y de la FDN a varias velocidades de rolado. La DIVMS se redujo de 83.8% a 15 rpm, a un mínimo de 80.1% a 25 rpm, aumentando posteriormente a 86.2% a 45 rpm. Lo mismo ocurrió con la DIVFDN, reduciéndose de 54.1% a 15 rpm, a un valor mínimo de 44.0 % a 25 rpm, volviendo a aumentar a un máximo de 65.2% a 45 rpm.

La DIVMS de los granos rolados al vapor se ha evaluado por diferentes autores. (Corona *et al.*, 2006) reportan que el grano de maíz rolado al vapor con una densidad de 373 g/L vs rolado en seco tiene una mayor digestibilidad del almidón (85.6 vs 99.3%) y una digestibilidad de la materia seca de (73.9 vs 82%); en contraste con los valores en nuestro estudio los valores de DIVMS reportados por Corona *et al.*, 2006 son aproximados a los que obtuvimos cuando el grano se rolo a 15 rpm con una densidad de 366 g/L. Hales *et al.* (2010) evaluaron los efectos de la

Cuadro 4. Digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS) y de la fibra detergente neutro (DIVFDN) de grano de maíz a varias velocidades de rolado (RPM).

| Variable   | Revoluciones por minuto |                    |                   |                   |                     |                    |                   | EE   | P      |            |
|------------|-------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|--------------------|-------------------|------|--------|------------|
|            | 15                      | 20                 | 25                | 30                | 35                  | 40                 | 45                |      | Lineal | Cuadrática |
| DIVMS (%)  | 83.8 <sup>c</sup>       | 84.3 <sup>bc</sup> | 80.1 <sup>d</sup> | 80.2 <sup>d</sup> | 84.5 <sup>abc</sup> | 86.0 <sup>ab</sup> | 86.2 <sup>a</sup> | 0.42 | <0.005 | <0.001     |
| DIVFDN (%) | 54.1 <sup>b</sup>       | 53.8 <sup>b</sup>  | 44.0 <sup>c</sup> | 47.0 <sup>c</sup> | 53.3 <sup>b</sup>   | 64.8 <sup>a</sup>  | 65.2 <sup>a</sup> | 1.42 | <0.001 | <0.001     |

a,b,c,d valores con diferentes letras difieren entre sí (P < 0.05).

densidad aparente de grano de maíz rolado al vapor a densidades de 283, 335 y 386 g/L, y con dietas de 6 o 10% de heno de alfalfa picada en La DIVMS y el pH ruminal a 6, 12, 18 y 24 h de incubación. Donde se obtuvo un incremento en el pH ( $p < 0.01$ ) fue cuando se aumentó la densidad de 283 a 386 g/L, con incubaciones de 6 y 12 h. Comparando el tiempo de incubación más largo (24 h) del estudio, ellos encontraron valores para DIVMS de 78.7, 80.1 y 76.7% para cada densidad evaluada. Leibovich *et al.* (2009) midieron la DIVMS en un periodo de incubación de 24 h. en dietas que contenían 75% de grano de maíz rolado al vapor o rolado en seco a 387 g/L, más 15% de grano seco de destilería. Los autores no encontraron una interacción de la DIVMS entre el método de procesamiento y el añadir DDG ( $p = 0.57$ ). Sin embargo, los valores que reportan son mayores para DIVMS con dietas de grano rolado al vapor que con rolado en seco ( $p = 0.01$ ) (64.6 vs 68.5%).

En general, la mayoría de la digestión del almidón ocurre en el rumen. Un aproximado de 50 a 90% del consumo total de almidón por el rumiante desaparecerá antes de llegar al duodeno. Esta digestión se lleva a cabo principalmente por las bacterias del rumen al consumir las partículas del grano rolado. Rolar el grano al vapor aumenta la digestibilidad ruminal del almidón más para sorgo (19 unidades porcentuales) que para maíz (13 unidades porcentuales) (Karr, 1984). Algunos investigadores como (Orskov, 1986; Owen *et al.*, 1986; Theurer. 1986) han estudiado el proceso de utilización del almidón por los rumiantes. En un estudio realizado por Theurer *et al.* (1996) sugiere que la digestión ruminal del almidón de maíz y sorgo es de 80% y 85%, respectivamente, para ganado de engorda alimentado dietas altas en granos. Sin embargo, en un trabajo realizado por Huntington (1997) reporta

coeficientes de digestibilidad del almidón en granos de maíz rolado al vapor, de 84.8% en rumen, 92.6% post-rumen y un 98.9% en el total del tracto digestivo. En contraste con los resultados obtenidos por (Owens y Zinn, 2005), los valores de desaparición post-ruminal del almidón de granos con alta humedad en abomaso (84%), rolado a vapor (82%), rolado en seco (80%), y el grano de maíz entero (29%). La baja digestión post-ruminal del almidón de maíz entero es debido a que el tamaño de partícula grande reduce la digestión post-ruminal del almidón en el abomaso, el almidón que escapa a la digestión ruminal tendrá un valor muy limitado para el ganado. Owens *et al.* (1986), reportó digestibilidad ruminal del almidón en promedio de 59% para el maíz entero, 78% para el maíz molido, y 83% para el maíz rolado al vapor. Estas diferencias en la fermentación ruminal del almidón pueden afectar el requerimiento para la proteína degradada en rumen. Es por ello, que la capacidad de masticación es muy importante para la digestibilidad del almidón ya que la fermentación ruminal no inicia hasta que la cutícula del grano de maíz es destruida.

#### **4.2. Experimento 2 – Sorgo rolado**

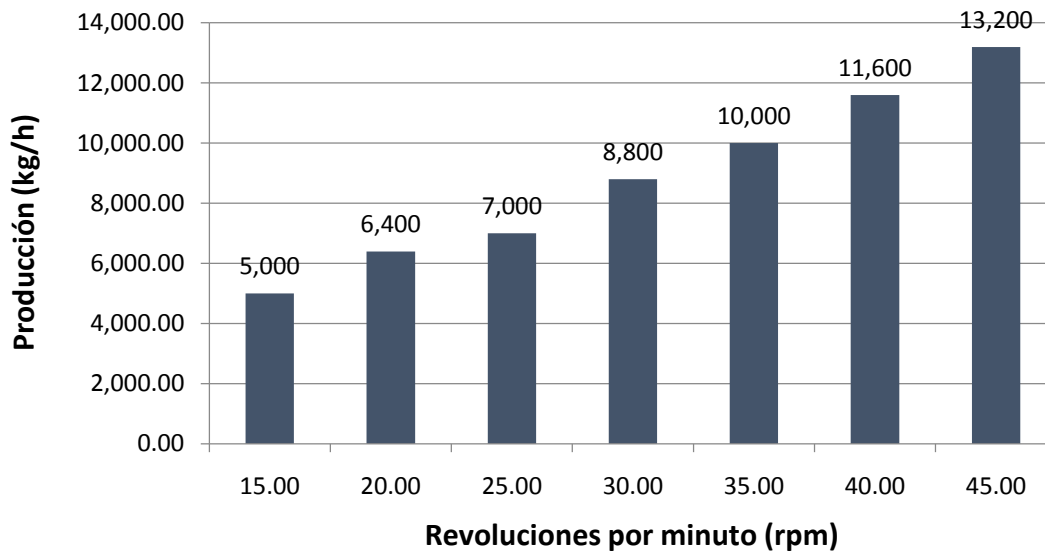
En el Cuadro 5, se presenta el amperaje, la densidad de rolado y la producción de sorgo a siete velocidades de rolado. El amperaje aumentó linealmente ( $P < 0.001$ ) con un aumento de la velocidad de la roladora a un máximo de 73 amperes. La producción de rolado aumentó linealmente ( $P < 0.001$ ) de 5.0 toneladas por hora a las 15 rpm a 13.2 toneladas por hora a las 45 rpm (Figura 2).

Cuadro 5. Amperaje, densidad de rolado y producción por hora de sorgo rolado a varias velocidades (rpm) de rolado.

| Variable                 | Revoluciones por minuto |                   |                   |                   |                    |                    |                   | EE   | P       |            |
|--------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|------|---------|------------|
|                          | 15                      | 20                | 25                | 30                | 35                 | 40                 | 45                |      | Lineal  | Cuadrática |
| Amperaje                 | 43.0 <sup>g</sup>       | 46.0 <sup>f</sup> | 50.0 <sup>e</sup> | 53.0 <sup>d</sup> | 69.0 <sup>b</sup>  | 67.2 <sup>c</sup>  | 73.0 <sup>a</sup> | 0.06 | < 0.001 | < 0.001    |
| Densidad de rolado (g/L) |                         |                   |                   |                   |                    |                    |                   |      |         |            |
| 0 minutos                | 336 <sup>c</sup>        | 363 <sup>c</sup>  | 396 <sup>b</sup>  | 402 <sup>b</sup>  | 411 <sup>b</sup>   | 425 <sup>ab</sup>  | 454 <sup>a</sup>  | 7.84 | < 0.001 | 0.264      |
| 10 minutos               | 300 <sup>d</sup>        | 323 <sup>d</sup>  | 361 <sup>c</sup>  | 366 <sup>bc</sup> | 366 <sup>bc</sup>  | 395 <sup>ab</sup>  | 425 <sup>a</sup>  | 7.37 | < 0.001 | 0.731      |
| Producción (ton/h)       | 5.0 <sup>e</sup>        | 6.4 <sup>de</sup> | 7.0 <sup>d</sup>  | 8.8 <sup>c</sup>  | 10.0 <sup>bc</sup> | 11.6 <sup>ab</sup> | 13.2 <sup>a</sup> | 0.37 | < 0.001 | 0.179      |

a,b,c,d,e,f,g valores con diferentes letras difieren entre si (P < 0.05).

Figura 2. Producción (kg/h) de sorgo a varias velocidad de rolado al vapor



Las densidades de rolado de sorgo aumentaron linealmente ( $P < 0.001$ ) de 336 g/L a 15 rpm a 425 g/L a 45 rpm, inmediatamente después de salir de la roladora. A los 10 minutos después de salir de la roladora, la densidad de rolado aumentó de 300 g/L a las 15 rpm a 395 g/L a las 45 rpm. Los resultados de otros estudios coinciden en la gran variación del almidón presente en el sorgo. La densidad de la hojuela puede tener un efecto en el desempeño de los animales al incrementar su eficiencia alimenticia. Swingle *et al.* (1999) llevaron a cabo un estudio donde se roló sorgo a densidades de 32, 28, 24 y 20 lb/bu, lo que corresponde a 400, 350, 300 y 250 g. Los autores observaron que un mayor procesamiento de rolado (menor densidad de hojuela) incrementaba la disponibilidad del almidón *in vitro* y la disponibilidad del almidón en el sistema digestivo. Un mayor incremento se obtuvo cuando se redujo la densidad de rolado de 32 a 28 lb/bu (400 a 350 g/L). Con densidades menores a 28 lb/bu se redujo la ganancia diaria de peso promedio durante el periodo de engorda. Los costos de electricidad se incrementaron linealmente a medida que disminuía la densidad de la hojuela. En referencia a la respuesta de los animales y los costos la de energía para producción de grano rolado, para estos autores, la densidad óptima de la hojuela fue de 28 lb/bu. Theurer *et al.* (1999) encontraron resultados similares para la disponibilidad del almidón al comparar el sorgo rolado al vapor a 32, 28 y 22 lb/bu. En ambos estudios, la digestibilidad del almidón en el rumen fue de 81% del consumo total del almidón. Estos datos sugieren que la matriz de proteína que envuelve al almidón en el sorgo es una barrera para su posterior degradación. Xiong *et al.* (1991) estudió el proceso de rolar al vapor sorgo a tres densidades diferentes (34, 28 y 22 lb/bu) para



determinar el efecto que esto tiene en el desarrollo del ganado en corral. Se observó un mayor desarrollo del ganado cuando el sorgo se rolo a 22 lb/bu. Sin embargo, dentro del mismo estudio se midió la durabilidad de la hojuela y los resultados fueron mejores cuando se rolo a 28 lb/bu en comparación con las densidades de 34 o 22 lb/bu. Esto es importante debido a que una reducción en la durabilidad del grano rolado causa una disminución en el consumo de alimento en los corrales. Owens *et al.* (1997) observo que cuando la densidad de rolado fue <22 lb/bu, la ganancia diaria de peso (GDP) fue de 1.38 kg/d y el consumo de MS fue 8.35 kg/d. Con densidades de 23 a 29 lb/bu, la GDP fue 1.5 kg/d y el consumo de MS fue de 8.81 kg/d. Con densidades mayores a 29 lb/bu, la GDP fue de 1.38 kg/d y consumo de MS fue de 8.76 kg/d. Sin embargo, la conversión alimenticia no cambio 6, 5.9 y 6 respectivamente. En resumen, el consumo de materia seca se disminuyó, pero la conversión alimenticia no cambio.

Reinhardt *et al.* (1997) condujo un estudio con ganado de engorda con un peso corporal de 343 kg, en el cual se midió el efecto de la densidad del sorgo rolado en el desempeño del ganado, costos de producción y la probabilidad de inducir una acidosis ruminal, ofreciendo dieta con sorgo rolado a densidades de 22, 25 y 28 lb/bu. El consumo de energía por tonelada de grano rolado fue: 22 y 25 lb/bu, 15.50 kwh y 47.41 kL de gas natural; 22 lb/bu, 11.77kwh y 35.85 kL de gas; 28 lb/bu, 9.28 kwh y 28.24 kL. Una mayor susceptibilidad a acidosis aguda, reducción en el consumo de alimento y un rendimiento más pobre se presento en comparación con el tratamiento de 28 lb/bu (1.46 kg/d) en contraste con 1.36 kg/d y 1.40 kg/d para las densidades de 22 y 25 lb/bu.

En el Cuadro 6, se presenta la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS) y de la fibra en detergente neutro (DIVFND) del grano de sorgo a varias velocidades de rolado. La DIVMS aumento cuadráticamente ( $P < 0.043$ ) aumentando inicialmente de 86.6% a 15 rpm a 89.0% a 20 rpm, sin un cambio significativo posteriormente. Se han reportado valores de degradabilidad *in vitro* menores a los obtenidos en este trabajo (Wester *et al.*, 1992; Rojo *et al.*, 2001a; Mendoza *et al.*, 1995). Esto podría ser debido a que la duración de las incubaciones en estos estudios fue de solamente 9 a 12 horas, que es cuando se presentan los principales cambios en la digestión. En estudios con ganado consumiendo raciones a base de sorgo, la digestibilidad ruminal *in vivo* varió de 50 a 80% (Rooney y Pflugfelder, 1986; Stock *et al.*, 1987; Rojo *et al.*, 2001b).

La DIVFDN varió de 75.2% a 86.9% ( $P > 0.05$ ) (Cuadro 6). En el presente estudio se encontraron valores inferiores a los reportados por Sintd *et al.* (2006) quien reporta una digestibilidad ruminal del almidón de 91%. Dichos valores son mayores 85% a los que reporta Huntington (1997). Sin embargo los valores de Sintd *et al.* (2006) fueron similares a los de Cooper *et al.* (2002). Zinn (1990b) menciona que la proteína de origen microbiana aumenta a medida que disminuye la densidad del rolado. En ese estudio se encontró que con la disminución de la densidad del rolado se aumenta la eficiencia alimenticia. Las diferencias en cuanto a resultados pueden ser debidas a las condiciones del equipo que se utiliza en cada estudio.

En un estudio reportado por Galyean *et al.* (1980) donde se midió la digestibilidad de la materia seca de granos de maíz rolados al vapor, una mayor

Cuadro 6. Digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS) y de la fibra detergente neutro (DIVFDN) de grano de sorgo a varias velocidades de rolado (RPM).

| Variable   | Revoluciones por minuto |                   |                    |                     |                   |                    |                    | EE   | P      |            |
|------------|-------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------|--------|------------|
|            | 15                      | 20                | 25                 | 30                  | 35                | 40                 | 45                 |      | Lineal | Cuadrática |
| DIVMS (%)  | 86.6 <sup>c</sup>       | 89.0 <sup>a</sup> | 88.8 <sup>ab</sup> | 87.7 <sup>abc</sup> | 86.5 <sup>c</sup> | 86.9 <sup>bc</sup> | 87.0 <sup>bc</sup> | 0.45 | 0.037  | 0.043      |
| DIVFDN (%) | 79.7 <sup>ab</sup>      | 86.6 <sup>a</sup> | 86.9 <sup>a</sup>  | 81.8 <sup>ab</sup>  | 75.2 <sup>b</sup> | 79.7 <sup>ab</sup> | 84.5 <sup>a</sup>  | 1.92 | 0.268  | 0.661      |

<sup>a,b,c</sup> valores con diferentes letras difieren entre sí ( $P < 0.05$ ).

cantidad de materia seca desapareció después de incubaciones de 24 horas que durante periodos menos cortos. Estos estudios demuestran que el procesamiento de rolar al vapor el grano produce efectos aditivos al tamaño de partícula por sí sola. Por otra parte, el tamaño de partícula tiene más influencia en la degradabilidad de la materia seca y la desaparición del almidón que con granos no procesados. El método de procesamiento, el tamaño de partícula y el tiempo de incubación parecen ser más importantes en tiempos de procesamientos más cortos (2 a 8 h), así como los periodos de incubación más largos (12 a 24 h). En estudios como los de Galyean *et al.* (1981), se reportan digestibilidades de la materia seca de 80% para maíz rolado al vapor.

Harmon y McLeod (2001) reportan cambios en el sitio de digestión del almidón a lo largo del tracto digestivo, donde se evaluó la eficiencia energética de la digestión en cada región del tracto gastrointestinal. Los resultados fueron: rumen, 80%; intestino delgado, 97%; e intestino grueso, 62%. Huntington *et al.* (2006) afirman que el paso de la digestión del rumen al intestino delgado disminuyó la eficiencia energética cuando la digestibilidad del intestino delgado era inferior a 75%. Sin embargo, cuando la digestibilidad en el intestino delgado estaba por encima de 75%, la eficiencia energética se incrementó por un cambio de la digestión del rumen al intestino delgado. La digestibilidad, depende de la cantidad de almidón que pasa al intestino delgado. Las ventajas en la eficiencia digestiva a través del aumento de la digestión intestinal del almidón se pueden obtener solamente con bajo consumo, o tal vez con alimentos altamente procesados como en el caso del grano rolado al vapor.

La baja digestibilidad en el intestino grueso corresponde a que poco almidón escapa del intestino delgado. Al aumentar el flujo de almidón al duodeno, la digestibilidad post-ruminal del almidón se reduce, por que la tasa de paso se incrementa, provocando que el tiempo sea insuficiente para que se dé la hidrólisis de almidón completa. Este aumento de la tasa de paso genera que la actividad de la amilasa pancreática sea insuficiente (Huntington, 1997).

El tipo de grano y el procesamiento definen el grado de utilización del almidón. A su vez, la tasa y el porcentaje del alimento degradado en el rumen está determinada por la relación de factores alimenticios, entre los que se incluyen el tipo de almidón, la composición química y nutritiva del alimento ofrecido al ganado, la cantidad de alimento consumido por unidad de tiempo, las alteraciones mecánicas (grado de procesamiento y masticación) y fisicoquímicas (grado de hidratación y gelatinización), así como la adaptación de los microorganismos ruminales a la dieta. Los factores más investigados para controlar la tasa y el porcentaje de degradación ruminal del almidón han sido el manejo del consumo de alimento, el procesamiento de los granos y el uso de aditivos alimenticios (Huntington, 1997). Sobre dichos enfoques, Owens y Goetsch (1986) determinaron que la tasa de digestión de las partículas de alimento en el rumen es directamente proporcional al grado de digestión, mientras que el aumento de la tasa de paso de las partículas de alimento es directamente proporcional al consumo de alimento. Orskov (1986) reportó que la digestibilidad de raciones altas en grano y la velocidad a la que se fermenta el almidón en el rumen, no restringen físicamente el consumo de energía. Sin embargo, la alimentación con dietas de grano molido puede causar algunos problemas como

poca secreción de saliva para mantener el pH ruminal entre 6 y 7, y la forma física del grano no permitirá una estimulación de la motilidad ruminal. En contraste, cuando a los animales se les ofrece raciones con granos procesados, el ganado pasa menos tiempo comiendo y rumiando, que son actividades que estimulan la secreción de saliva y la producción de ácidos grasos volátiles, ya que aumenta la fermentación, bajando el pH ruminal, aumentando la susceptibilidad a problemas metabólicos. Huntington (1997) reportó valores de digestibilidad del almidón para sorgo rolado al vapor de 78.4% en rumen, 89.9% post-rumen y 98.8% en el total del tracto digestivo.

## CONCLUSIÓN

La densidad de rolado y producción por hora llegaron a su mayor nivel a 30 rpm para maíz, mientras que con sorgo la densidad y la producción siguieron aumentando hasta 45 rpm. No se encontró una diferencia en la disponibilidad del almidón del maíz rolado al vapor, en contraste con el sorgo rolado al vapor. Tampoco se encontró una relación entre la disponibilidad enzimática *in vitro* del almidón con la degradación ruminal *in vitro* de la materia seca o la fibra en detergente neutro. Más estudios deben llevarse a cabo para establecer una técnica *in vitro* que pueda fácilmente determinar la disponibilidad del almidón con precisión.

## BIBLIOGRAFÍA

- Archibeque, S.L., D.N Miller, H.C. Freetly, y C.L. Ferrell. 2006. Feeding high-moisture corn instead of dry-rolled corn reduces odorous compound production in manure of finishing beef cattle without decreasing performance. *J. Anim. Sci.* 84:1767-1777.
- Barajas, R. y R.A. Zinn. 1998. The feeding value of dry-rolled and steam-flaked corn in finishing diets for feedlot cattle: Influence of protein supplementation. *J. Anim. Sci.* 76:1744-1752.
- Basel, H.M., P.C. Hoffman, y 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.* 128:96-107.
- Benton, J.R., T.J. Klopfenstein, y 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.
- Brown, M.S., C.R. Krehbiel, G.C. Duff, M.L. Galyean, D.M. Hallford, y D.A. Walker. 2000. Effect of degree of corn processing on urinary nitrogen composition, serum metabolite and insulin profiles, and performance by finishing steers. *J. Anim. Sci.* 78:2464–2474.
- Cooper, R.J., C.T. Milton, T.J. Klopfenstein, T.L. Scott, C.B. Wilson, y R.A. Mass. 2002. Effect of corn processing on starch digestion and bacterial crude protein flow in finishing cattle. *J. Anim. Sci.* 80:797-804.



- Corona, L., F.N. Owens, y R.A. Zinn. 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. Rodriguez, R.A. Ware, y R.A. Zinn. 2005. Comparative effect of whole, ground, dry-rolled and steam-flaked corn on digestion and growth performance in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 21:200-206.
- Douglas, H.J., T.W. Sullivan, P.L. Bond, y F.J. Struwe. 1990. Nutrient composition and metabolizable energy values of selected grain sorghum varieties and yellow corn. *Poult. Sci.* 69:1147-1155.
- Ferreira, G., y D.R. Mertens. 2005. Chemical and physical characteristics of corn silages and their effects on in vitro disappearance. *J. Dairy Sci.* 88:4414-4425.
- Firkins, J.L., M.L. Eastridge, N.R. St-Pierre, y S.M. Nofstger. 2001. Effects of grain variability and processing on starch utilization by lactating dairy cattle. *J. Anim. Sci.* 79:E218-238.
- Hahn, D.H., L.W. Rooney, y C.F. Earp. 1984. Tannins and phenols of sorghum. *Cereal Foods World.* 26:776-779.
- Hales, K.E., J.P. McMeniman, J.T. Vasconcelos, M.J. Quinn, M.L. May, N. DiLorenzo, D.R. Smith y M.L. Galyean. 2009. Effects of varying bulk densities of steam-flaked corn and dietary roughage concentration in vitro fermentation, performance, carcass quality, and acid-base balance measurements in finishing steers. *J. Anim. Sci.* 88:1135-1147.
- Harmon, D.L., y K.R. McLeod. 2001. Glucose uptake and regulation by intestinal tissues: Implications and whole-body energetics. *J. Anim. Sci.* 79:E59-E72.

- Harmon, D.L., y K.R. McLeod. 2005. Factors influencing assimilation of dietary starch in beef cattle. Plains Nutrition Council Meeting, Texas A&M University AREC 05-20, pp. 69-89.
- Herrera-Saldana, R.E., J.T. Huber, y M.H. Poore. 1990. Dry matter, crude protein, and starch degradability of five cereal grains. *J. of Dairy Sci.* 73:2386-2393.
- Hibberd, C.A., D.G. Wagner, R.L. Schemm, E.D. Mithcel, R.L. Hintz, y D.E. Wiebel. 1982. Nutritive characteristics of different varieties of sorghum and corn grains. *J. Anim. Sci.* 55:665-712.
- Hibberd, C.A., D.G. Wagner, y R.L. Hintz. 1985. Effect of sorghum grain variety and reconstitution on site and extent of starch and protein digestion in steers. *J. Anim. Sci.* 61:702-712.
- Huck, G.L., K.K. Kreikemeier., G.L. Kul, T.P. Eck, y K.K. Bolsen. 1998. Effects of feeding combinations of steam-flaked grain sorghum and steam-flaked, high-moisture, or dry-rolled corn on growth performance and carcass characteristics in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 76:2984-2990.
- Huntington, G.B. 1997. Starch utilization by ruminants: from basics to bunk. *J. Anim. Sci.* 75:852-867.
- Huntington, G.B., D.L. Harmon, y C.J. Richards. 2006. Sites, rates, and limits of starch digestion and glucose metabolism in growing cattle. *J. Anim. Sci.* 84: E14-E24.
- Karr, M.K. 1984. Grain processing techniques and quality control. Pages 99–112 in *Proc. Feed Grain Utilization Symp.* Texas Tech Univ., Lubbock.

- Kessen, T.J., D.D. Simms, G.L. Kuhl, y J.S. Drouillard. 1995. Effect of grain sorghum particle size on digestion parameters and performance of growing steers. *J. Anim. Sci.* 75: (Suppl. 1)
- Kotasski, S.F., R.D. Waniska, y K.K. Thurn. 1992. Starch hidrolisis by the ruminal microflora. *J. Nutrition* 122:178-190.
- Ladely, S.R., R.A. Stock, F.K. Goedecken, y R.P. Huffman. 1995. Effect of corn hybrid and grain processing method on rate of starch disappearance and performance of finishing cattle. *J. Anim. Sci.* 73:360-364.
- Loerch, S.C. y F.L. Fluharty. 1998. Effects of corn processing, dietary roughage level, and timing of roughage inclusion on performance of feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 76:681-685.
- Lozano, O., C.B. Theurer, A. Alio, J.T. Huber, A. Oelgado-Elorduy, P. Cuneo, D. OeYoung, M. Sadik, y R.S. Swingle. 2000. Net absorption and hepatic metabolism of glucose, L. lactate, and volatile fatty acids by steers fed diets containing sorghum graín processed as dry-rolled or steam-ftaked at different densities. *J. Anim. Sci.* 78:1364-1371.
- Lund, D. 1984. Influence of time, temperature, moisture, ingredients and processing conditions on starch gelatinization. *CRC Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 20:249-273.
- Manners, D.J. 1989. Recent developments in our understanding of amylopectin structure. *Carboh. Polym.* 11:87-93.
- Marconi, E., M.C. Messia, G. Palleschi, y R. Cubadda. 2004. A maltose biosensor for determining gelatinized starch in processed cereal foods. *Cereal Chem.* 81:6-9.

- May, M.L., M.J. Quinn, N. DiLorenzo, D.R. Smith, y M.L. Galyean. 2011. Effects of roughage concentration in steam-flaked corn-based diets containing wet distillers grains with soluble on feedlot cattle performance, carcass characteristics, and in vitro fermentation. *J. Anim. Sci.* 89:549–559.
- McDonough, C.M., B.J. Anderson, y L.W. Rooney. 1997. Structural characteristics of steam-flaked sorghum. *Cereal Chem.* 74:542-547.
- McDonough, C., B.J. Anderson, H. Acosta-Zuleta, y L.W. Rooney. 1998. Effect of conditioning agents on the structure of tempered and steam-flaked sorghum. *Cereal Chem.* 75:58-63.
- Nocek, J.E., y S. Tamminga. 1991. Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effects on milk yield and composition. *J. Dairy Sci.* 74:3598.
- Orskov, E.R. 1986. Starch digestion and utilization in ruminants. *J. Anim. Sci.* 63: 1624.
- Owens, F.N., Zinn, R.A., y Kim, Y.K. 1986. Limits to starch digestion in the ruminant small intestine. *J. Anim. Sci.* 63:1634-1648.
- Owens, F.N., D.S. Secrist, W.J. Hill, y 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. y B.A. Gardner. 2000. A review of the impact of feedlot management and nutrition on carcass measurements of feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 77:1-18.
- Owens, F.H. y R.A. Zinn. 2005. Corn grain for cattle: Influence of processing on site and extent of digestion. *Proc. Southwest Nutr. Conf.* pp. 86-112.

- Philippeau, C., C. Martin, y B. Michalet-Doreau. 1999. Influence of grain source on ruminal characteristics and rate, site, and extent of digestion in beef steers. *J. Anim. Sci.* 77:1587-1596.
- Philippeau, C., y B. Michalet-Doreau. 1997. Influence of genotype and stage of maturity of maize on rate of ruminal starch digestion. *Anim. Feed Sci. Technol.* 68:25-35.
- Philippeau, C., F. Le Deschault de Monredon, y B. Michalet-Doreau. 1999. Relationship between ruminal starch degradation and the physical characteristics of corn grain. *J. Anim. Sci.* 77:238-243.
- Quinn, M.J., M.L. May, N. DiLorenzo, D.R. Smith, y M.L. Galyean. 2010. Effects of distillers grains and substrate steam-flaked corn concentration on in vitro dry matter disappearance, gas production kinetics, and hydrogen sulfide production. *J. Anim. Sci.* 26:365–374.
- Reinhardt, C.D., R.T. Brandt, K.C. Behnke, A.S. Freeman, y T.P. Eck. 1997. Effect of steam-flaked sorghum grain density on performance, mill production rate, and subacute acidosis in feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 75:2852-2857.
- Rooney, L.W. y R.L. Pfugfelder. 1986. Factors affecting starch digestibility with special emphasis on Sorghum and Corn. *J. Anim. Sci.* 63:1607-1623.
- Rowe, J.B., M. Choct, y D.W. Pethick. 1999. Processing cereal grains for animal feeding. *Aust. J. Agric. Res.* 50:721-736.
- Seckinger, H.L., y M.J. Wolf. 1973. Sorghum protein ultrastructure as it relates to composition. *Cereal Chem.* 50:455-465.

- Secrist, D.S., F.N. Owens, W.J. Hill, y S. Welty. 1995. Effects of particle size of roller corn on digestion and performance by feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 73 (Suppl. 1):95.
- Sindt, J.J., J.S. Drouillard, E.C. Tigemeyer, S.P. Montgomery, E.R. Loe, B.E. Depenbusch y P.H. Walz. 2006. Influence of steam-flaked corn moisture level and density on site and extent of digestibility and feeding value for finishing cattle. *J. Anim. Sci.* 84:424-432.
- Streeter, M.N., D.G. Wagner, y C.A. Hibberd. 1990a Comparison of corn with four sorghum grain hybrids: site and extent of digestion in steers. *J. Anim. Sci.* 68: 3429-3440.
- Streeter, M.N., D.G. Wagner, y C.A. Hibberd. 1990b. The effect of sorghum grain variety on site and extent of digestion in beef heifers. *J. Anim. Sci.* 68:1121-1132
- Stock, R.A., D.R. Brink, R.T. Brandt, J.K. Merrill, y K.K. Smith. 1987a. 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, y K.K. Smith. 1987b. Feeding combinations of high moisture corn and dry-rolled grain sorghum to finishing steers. *J. Anim. Sci.* 65:290-302.
- Sullins, R.D. y L.W. Rooney. 1974. Microscopic evaluation of the digestibility of sorghum lines that differ in endosperm characteristics. *Cereal Chem.* 51:134-142.

- Sullins, R.D. y L.W. Rooney. 1975. Light and scanning electron microscopic studies of waxy and nonwaxy endosperm sorghum varieties. *Cereal Chem.* 52:361-366.
- Swingle, R.S., T.P. Eck, C.B. Theurer, M. De la Llata, M.H. Poore, y J.A. Moore. 1999. Flake density of steam-processed sorghum grain alters performance and sites of digestibility by growing-finishing steers. *J. Anim. Sci.* 77:1055-1065.
- Szasz, J.I., C.W. Hunt, P.A. Szasz, R.A. Weber, F.N. Owens, W. Kezar, y O.A. Turgeon. 2007. Influence of endosperm vitreousness and kernel moisture at harvest on site and extent of digestion of high-moisture corn by feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 85:2214-2221.
- Taylor, J.R.N., L. Schussler, y H. Van Der Walt. 1984. Fraction of proteins from low tannin sorghum grain. *J. Agric. Food Chem.* 32:149-154.
- Theurer, C.B. 1986. Grain processing effects on starch utilization by ruminants. *J. Anim. Sci.* 63:1649-1662.
- Theurer, C.B., O. Lozano, A. Alío. A. Delgado-Elorduy, M. Sadik, J.T. Huber, y R.A. Zinn. 1999. Steam-processed corn and sorghum grain flaked at different densities alters ruminal, small intestinal, and total tract digestibility of starch by steers. *J. Anim. Sci.* 77:2824-2831.
- Van Soest, P.J. 1994. *Nutritional Ecology of the Ruminant*. Second Edition. Cornell University Press. Ithaca and London.
- Van Soest, P.J., J.B. Robertson, y B.A. Lewis. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* 74:3583-3597.

- Van Vuuren, A.M., V.A. Hindle, y J.W. Cone. 2004. Effect of starch source on supply of glycogenic nutrients in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 87(Suppl. 1):463.
- Varriano-Marston, E.K.V., G. Huang, y J. Ponte. 1980. Comparison of methods to determine starch gelatinization on bakery foods. *Cereal Chem.* 57:242–248.
- Wang, X, P.L. Conway, I.L. Brown, y A.J. Evans. 1999. In vitro utilization of amylopectin and high-amylose maize (amylomaize) starch granules by human colonic bacteria. *App. Environ. Microbiol.*65:4848-4854.
- Wester, T.J., S.M. Gramlich, y R.A. Britton. 1992. Effect of grain sorghum hybrid on *in vitro* rate of starch disappearance and finishing performance of ruminants. *J. Anim. Sci.* 70: 2866-2876.
- Wilman, D. y A. Adesogan. 2000. A comparison of filter bag methods with conventional tube methods of determining the in vitro digestibility of forages. *Anim. Feed Sci. Technol.* 84:33-47.
- Wylie, M.J., T.W. White, W.C. Ellis, y J.H. Matis. 1990. The flow of undigested corn residues through the gastrointestinal tract of cattle. *J. Anim. Sci.* 68:3843-3852.
- Xiong, Y., S.J. Barle, R.L. Preston, y Q. Meng. 1990a. Estimating starch availability and protein degradation of steam-flaked and reconstituted sorghum grain through a gas production technique. *J. Anim. Sci.* 68:3880-3885.
- Xiong, Y., S.J. Bartle, y R.L. Preston. 1991. Density of steam-flaked sorghum grain, roughage level, and feeding regimen for feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 69:1707-1718.
- Zinn, R.A. 1990. Influence of flake density on the comparative feeding value of steam-flaked corn for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 68:767-775.



- Zinn, R.A., E.G. Alvarez, M.F. Montano, A. Plascencia, y J.E. Ramirez. 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., E.G. Álvarez, M. Montano, y J. Salinas-Chavira. 2007. Influence of dry-rolling and tempering agent addition during the steam-flaking of sorghum grain on its feeding value for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 86:916-922.
- Zinn, R.A., A. Barreras, L. Corona, F.N. Owens, y R.A. Ware. 2007. Starch digestion by feedlot cattle: Predictions from analysis of feed and fecal starch and nitrogen. *J. Anim. Sci.* 85:1727-1730.
- Zinn, R.A., F.N. Owens, y 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.

**Tabla para convertir solubilidad a % de almidón disponible**

| Humedad (%)      | 10% | 11% | 12% | 13% | 14% | 15% | 16% | 17% | 18% | 19% | 20% | 21% | 22% | 23% | 24% | 25% | 26% | 27% | 28% |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Materia seca (%) | 90% | 89% | 88% | 87% | 86% | 85% | 84% | 83% | 82% | 81% | 80% | 79% | 78% | 77% | 76% | 75% | 74% | 73% | 72% |

**Solubles (%)**

**Almidón Disponible (%)**

|   | 0.0  | 0.2  | 0.4  | 0.6  | 0.8  | 1.0  | 1.2  | 1.4  | 1.6  | 1.8  | 2.0  | 2.2  | 2.4  | 2.6  | 2.8  | 3.0  | 3.2  | 3.4  | 3.6  | 3.8  | 4.0  | 4.2  | 4.4  | 4.6  | 4.8  | 5.0  | 5.2  | 5.4  | 5.6  | 5.8  | 6.0  | 6.2  | 6.4   | 6.6   | 6.8   | 7.0   |      |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| <b>M<br/>a<br/>í<br/>z<br/><br/>H<br/>o<br/>j<br/>u<br/>e<br/>l<br/>e<br/>a<br/>d<br/>o</b> | 30.3 | 31.8 | 33.3 | 34.8 | 36.2 | 37.7 | 39.2 | 40.7 | 42.2 | 43.6 | 45.1 | 46.6 | 48.1 | 49.6 | 51.1 | 52.5 | 54.0 | 55.5 | 57.0 | 58.5 | 59.9 | 61.4 | 62.9 | 64.4 | 65.9 | 67.4 | 68.8 | 70.3 | 71.8 | 73.3 | 74.8 | 76.3 | 77.7  | 79.2  | 80.7  | 82.2  |      |
|   | 30.6 | 32.1 | 33.6 | 35.1 | 36.6 | 38.1 | 39.6 | 41.1 | 42.6 | 44.1 | 45.6 | 47.1 | 48.6 | 50.1 | 51.6 | 53.1 | 54.6 | 56.1 | 57.6 | 59.1 | 60.6 | 62.1 | 63.6 | 65.1 | 66.6 | 68.1 | 69.6 | 71.1 | 72.6 | 74.1 | 75.6 | 77.1 | 78.6  | 80.1  | 81.6  | 83.1  |      |
|   | 31.0 | 32.5 | 34.0 | 35.5 | 37.0 | 38.5 | 40.0 | 41.5 | 43.0 | 44.5 | 46.0 | 47.5 | 49.0 | 50.5 | 52.0 | 53.5 | 55.0 | 56.5 | 58.0 | 59.5 | 61.0 | 62.5 | 64.0 | 65.5 | 67.0 | 68.5 | 70.0 | 71.5 | 73.0 | 74.5 | 76.0 | 77.5 | 79.0  | 80.5  | 82.0  | 83.5  |      |
|   | 31.3 | 32.9 | 34.4 | 35.9 | 37.5 | 39.0 | 40.5 | 42.0 | 43.6 | 45.1 | 46.7 | 48.2 | 49.7 | 51.3 | 52.8 | 54.3 | 55.9 | 57.4 | 58.9 | 60.5 | 62.0 | 63.5 | 65.0 | 66.5 | 68.0 | 69.5 | 71.0 | 72.5 | 74.0 | 75.5 | 77.0 | 78.5 | 80.0  | 81.5  | 83.0  | 84.5  | 86.0 |
|   | 31.7 | 33.3 | 34.8 | 36.4 | 37.9 | 39.5 | 41.0 | 42.5 | 44.1 | 45.6 | 47.2 | 48.7 | 50.3 | 51.8 | 53.4 | 54.9 | 56.5 | 58.0 | 59.5 | 61.1 | 62.6 | 64.1 | 65.6 | 67.1 | 68.6 | 70.1 | 71.6 | 73.1 | 74.6 | 76.1 | 77.6 | 79.1 | 80.6  | 82.1  | 83.6  | 85.1  | 86.6 |
|   | 32.1 | 33.7 | 35.2 | 36.8 | 38.4 | 39.9 | 41.5 | 43.0 | 44.6 | 46.2 | 47.8 | 49.3 | 50.9 | 52.5 | 54.0 | 55.6 | 57.2 | 58.7 | 60.3 | 61.8 | 63.4 | 64.9 | 66.5 | 68.0 | 69.5 | 71.1 | 72.6 | 74.1 | 75.6 | 77.1 | 78.7 | 80.2 | 81.7  | 83.2  | 84.7  | 86.2  |      |
|   | 32.5 | 34.1 | 35.6 | 37.2 | 38.8 | 40.4 | 42.0 | 43.6 | 45.2 | 46.8 | 48.4 | 50.0 | 51.6 | 53.2 | 54.8 | 56.4 | 58.0 | 59.6 | 61.2 | 62.8 | 64.4 | 66.0 | 67.6 | 69.2 | 70.8 | 72.4 | 74.0 | 75.6 | 77.2 | 78.8 | 80.4 | 82.0 | 83.6  | 85.2  | 86.8  | 88.4  |      |
|   | 32.9 | 34.5 | 36.1 | 37.7 | 39.3 | 40.9 | 42.5 | 44.1 | 45.7 | 47.3 | 48.9 | 50.5 | 52.1 | 53.7 | 55.3 | 56.9 | 58.5 | 60.1 | 61.7 | 63.3 | 64.9 | 66.5 | 68.1 | 69.7 | 71.3 | 72.9 | 74.5 | 76.1 | 77.7 | 79.3 | 80.9 | 82.5 | 84.1  | 85.7  | 87.3  | 88.9  |      |
|   | 33.3 | 34.9 | 36.5 | 38.1 | 39.7 | 41.3 | 42.9 | 44.5 | 46.1 | 47.7 | 49.3 | 50.9 | 52.5 | 54.1 | 55.7 | 57.3 | 58.9 | 60.5 | 62.1 | 63.7 | 65.3 | 66.9 | 68.5 | 70.1 | 71.7 | 73.3 | 74.9 | 76.5 | 78.1 | 79.7 | 81.3 | 82.9 | 84.5  | 86.1  | 87.7  | 89.3  |      |
|   | 33.7 | 35.3 | 37.0 | 38.6 | 40.3 | 41.9 | 43.6 | 45.2 | 46.8 | 48.5 | 50.1 | 51.8 | 53.4 | 55.1 | 56.7 | 58.4 | 60.0 | 61.7 | 63.3 | 64.9 | 66.6 | 68.2 | 69.9 | 71.5 | 73.1 | 74.8 | 76.4 | 78.0 | 79.7 | 81.3 | 82.9 | 84.5 | 86.1  | 87.7  | 89.3  | 90.9  | 92.5 |
|   | 34.1 | 35.8 | 37.4 | 39.1 | 40.8 | 42.4 | 44.1 | 45.8 | 47.4 | 49.1 | 50.8 | 52.5 | 54.2 | 55.9 | 57.6 | 59.3 | 61.0 | 62.7 | 64.4 | 66.1 | 67.8 | 69.5 | 71.2 | 72.9 | 74.6 | 76.3 | 78.0 | 79.7 | 81.4 | 83.1 | 84.8 | 86.5 | 88.2  | 89.9  | 91.6  | 93.3  |      |
|   | 34.5 | 36.2 | 37.9 | 39.6 | 41.3 | 43.0 | 44.7 | 46.4 | 48.1 | 49.8 | 51.5 | 53.2 | 54.9 | 56.6 | 58.3 | 60.0 | 61.7 | 63.4 | 65.1 | 66.8 | 68.5 | 70.2 | 71.9 | 73.6 | 75.3 | 77.0 | 78.7 | 80.4 | 82.1 | 83.8 | 85.5 | 87.2 | 88.9  | 90.6  | 92.3  | 94.0  | 95.7 |
|   | 35.0 | 36.7 | 38.4 | 40.1 | 41.8 | 43.5 | 45.2 | 46.9 | 48.6 | 50.3 | 52.0 | 53.7 | 55.4 | 57.1 | 58.8 | 60.5 | 62.2 | 63.9 | 65.6 | 67.3 | 69.0 | 70.7 | 72.4 | 74.1 | 75.8 | 77.5 | 79.2 | 80.9 | 82.6 | 84.3 | 86.0 | 87.7 | 89.4  | 91.1  | 92.8  | 94.5  |      |
|   | 35.4 | 37.2 | 38.9 | 40.6 | 42.3 | 44.0 | 45.7 | 47.4 | 49.1 | 50.8 | 52.5 | 54.2 | 55.9 | 57.6 | 59.3 | 61.0 | 62.7 | 64.4 | 66.1 | 67.8 | 69.5 | 71.2 | 72.9 | 74.6 | 76.3 | 78.0 | 79.7 | 81.4 | 83.1 | 84.8 | 86.5 | 88.2 | 89.9  | 91.6  | 93.3  | 95.0  | 96.7 |
|   | 35.9 | 37.6 | 39.4 | 41.2 | 42.9 | 44.7 | 46.4 | 48.1 | 49.8 | 51.5 | 53.2 | 54.9 | 56.6 | 58.3 | 60.0 | 61.7 | 63.4 | 65.1 | 66.8 | 68.5 | 70.2 | 71.9 | 73.6 | 75.3 | 77.0 | 78.7 | 80.4 | 82.1 | 83.8 | 85.5 | 87.2 | 88.9 | 90.6  | 92.3  | 94.0  | 95.7  | 97.4 |
|   | 36.4 | 38.1 | 39.9 | 41.7 | 43.5 | 45.3 | 47.0 | 48.8 | 50.6 | 52.4 | 54.2 | 55.9 | 57.7 | 59.5 | 61.3 | 63.1 | 64.8 | 66.6 | 68.4 | 70.2 | 72.0 | 73.8 | 75.5 | 77.3 | 79.1 | 80.9 | 82.6 | 84.4 | 86.2 | 88.0 | 89.8 | 91.6 | 93.4  | 95.2  | 97.0  | 98.8  |      |
|   | 36.9 | 38.7 | 40.5 | 42.3 | 44.1 | 45.9 | 47.7 | 49.5 | 51.3 | 53.1 | 54.9 | 56.7 | 58.5 | 60.3 | 62.1 | 63.9 | 65.7 | 67.5 | 69.3 | 71.1 | 72.9 | 74.7 | 76.5 | 78.3 | 80.1 | 81.9 | 83.7 | 85.5 | 87.3 | 89.1 | 90.9 | 92.7 | 94.5  | 96.3  | 98.1  | 99.9  |      |
|   | 37.4 | 39.2 | 41.0 | 42.8 | 44.6 | 46.4 | 48.2 | 50.0 | 51.8 | 53.6 | 55.4 | 57.2 | 59.0 | 60.8 | 62.6 | 64.4 | 66.2 | 68.0 | 69.8 | 71.6 | 73.4 | 75.2 | 77.0 | 78.8 | 80.6 | 82.4 | 84.2 | 86.0 | 87.8 | 89.6 | 91.4 | 93.2 | 95.0  | 96.8  | 98.6  | 100.4 |      |
|   | 37.9 | 39.7 | 41.5 | 43.3 | 45.1 | 46.9 | 48.7 | 50.5 | 52.3 | 54.1 | 55.9 | 57.7 | 59.5 | 61.3 | 63.1 | 64.9 | 66.7 | 68.5 | 70.3 | 72.1 | 73.9 | 75.7 | 77.5 | 79.3 | 81.1 | 82.9 | 84.7 | 86.5 | 88.3 | 90.1 | 91.9 | 93.7 | 95.5  | 97.3  | 99.1  | 100.9 |      |
|   | 38.1 | 39.9 | 41.7 | 43.5 | 45.3 | 47.1 | 48.9 | 50.7 | 52.5 | 54.3 | 56.1 | 57.9 | 59.7 | 61.5 | 63.3 | 65.1 | 66.9 | 68.7 | 70.5 | 72.3 | 74.1 | 75.9 | 77.7 | 79.5 | 81.3 | 83.1 | 84.9 | 86.7 | 88.5 | 90.3 | 92.1 | 93.9 | 95.7  | 97.5  | 99.3  | 101.1 |      |
|   | 38.7 | 40.5 | 42.3 | 44.1 | 45.9 | 47.7 | 49.5 | 51.3 | 53.1 | 54.9 | 56.7 | 58.5 | 60.3 | 62.1 | 63.9 | 65.7 | 67.5 | 69.3 | 71.1 | 72.9 | 74.7 | 76.5 | 78.3 | 80.1 | 81.9 | 83.7 | 85.5 | 87.3 | 89.1 | 90.9 | 92.7 | 94.5 | 96.3  | 98.1  | 99.9  | 101.7 |      |
|   | 39.2 | 41.0 | 42.8 | 44.6 | 46.4 | 48.2 | 50.0 | 51.8 | 53.6 | 55.4 | 57.2 | 59.0 | 60.8 | 62.6 | 64.4 | 66.2 | 68.0 | 69.8 | 71.6 | 73.4 | 75.2 | 77.0 | 78.8 | 80.6 | 82.4 | 84.2 | 86.0 | 87.8 | 89.6 | 91.4 | 93.2 | 95.0 | 96.8  | 98.6  | 100.4 | 102.2 |      |
|   | 39.7 | 41.5 | 43.3 | 45.1 | 46.9 | 48.7 | 50.5 | 52.3 | 54.1 | 55.9 | 57.7 | 59.5 | 61.3 | 63.1 | 64.9 | 66.7 | 68.5 | 70.3 | 72.1 | 73.9 | 75.7 | 77.5 | 79.3 | 81.1 | 82.9 | 84.7 | 86.5 | 88.3 | 90.1 | 91.9 | 93.7 | 95.5 | 97.3  | 99.1  | 100.9 | 102.7 |      |
|   | 40.1 | 42.0 | 43.8 | 45.6 | 47.4 | 49.2 | 51.0 | 52.8 | 54.6 | 56.4 | 58.2 | 60.0 | 61.8 | 63.6 | 65.4 | 67.2 | 69.0 | 70.8 | 72.6 | 74.4 | 76.2 | 78.0 | 79.8 | 81.6 | 83.4 | 85.2 | 87.0 | 88.8 | 90.6 | 92.4 | 94.2 | 96.0 | 97.8  | 99.6  | 101.4 | 103.2 |      |
|   | 40.7 | 42.6 | 44.4 | 46.2 | 48.0 | 49.8 | 51.6 | 53.4 | 55.2 | 57.0 | 58.8 | 60.6 | 62.4 | 64.2 | 66.0 | 67.8 | 69.6 | 71.4 | 73.2 | 75.0 | 76.8 | 78.6 | 80.4 | 82.2 | 84.0 | 85.8 | 87.6 | 89.4 | 91.2 | 93.0 | 94.8 | 96.6 | 98.4  | 100.2 | 102.0 | 103.8 |      |
|   | 41.1 | 43.0 | 44.8 | 46.6 | 48.4 | 50.2 | 52.0 | 53.8 | 55.6 | 57.4 | 59.2 | 61.0 | 62.8 | 64.6 | 66.4 | 68.2 | 70.0 | 71.8 | 73.6 | 75.4 | 77.2 | 79.0 | 80.8 | 82.6 | 84.4 | 86.2 | 88.0 | 89.8 | 91.6 | 93.4 | 95.2 | 97.0 | 98.8  | 100.6 | 102.4 | 104.2 |      |
|   | 41.6 | 43.5 | 45.3 | 47.1 | 48.9 | 50.7 | 52.5 | 54.3 | 56.1 | 57.9 | 59.7 | 61.5 | 63.3 | 65.1 | 66.9 | 68.7 | 70.5 | 72.3 | 74.1 | 75.9 | 77.7 | 79.5 | 81.3 | 83.1 | 84.9 | 86.7 | 88.5 | 90.3 | 92.1 | 93.9 | 95.7 | 97.5 | 99.3  | 101.1 | 102.9 | 104.7 |      |
|   | 42.2 | 44.1 | 45.9 | 47.7 | 49.5 | 51.3 | 53.1 | 54.9 | 56.7 | 58.5 | 60.3 | 62.1 | 63.9 | 65.7 | 67.5 | 69.3 | 71.1 | 72.9 | 74.7 | 76.5 | 78.3 | 80.1 | 81.9 | 83.7 | 85.5 | 87.3 | 89.1 | 90.9 | 92.7 | 94.5 | 96.3 | 98.1 | 99.9  | 101.7 | 103.5 | 105.3 |      |
|   | 42.6 | 44.5 | 46.3 | 48.1 | 49.9 | 51.7 | 53.5 | 55.3 | 57.1 | 58.9 | 60.7 | 62.5 | 64.3 | 66.1 | 67.9 | 69.7 | 71.5 | 73.3 | 75.1 | 76.9 | 78.7 | 80.5 | 82.3 | 84.1 | 85.9 | 87.7 | 89.5 | 91.3 | 93.1 | 94.9 | 96.7 | 98.5 | 100.3 | 102.1 | 103.9 | 105.7 |      |
|   | 43.1 | 45.0 | 46.8 | 48.6 | 50.4 | 52.2 | 54.0 | 55.8 | 57.6 | 59.4 | 61.2 | 63.0 | 64.8 | 66.6 | 68.4 | 70.2 | 72.0 | 73.8 | 75.6 | 77.4 | 79.2 | 81.0 | 82.8 | 84.6 | 86.4 | 88.2 | 90.0 | 91.8 | 93.6 | 95.4 | 97.2 | 99.0 | 100.8 | 102.6 | 104.4 | 106.2 |      |
| 43.6  | 45.5 | 47.3 | 49.1 | 50.9 | 52.7 | 54.5 | 56.3 | 58.1 | 59.9 | 61.7 | 63.5 | 65.3 | 67.1 | 68.9 | 70.7 | 72.5 | 74.3 | 76.1 | 77.9 | 79.7 | 81.5 | 83.3 | 85.1 | 86.9 | 88.7 | 90.5 | 92.3 | 94.1 | 95.9 | 97.7 | 99.5 |      |       |       |       |       |      |

**Tabla para convertir solubilidad a % de almidón disponible**

|            | <b>Humedad (%)</b>      | <b>10%</b>                    | <b>11%</b> | <b>12%</b> | <b>13%</b> | <b>14%</b> | <b>15%</b> | <b>16%</b> | <b>17%</b> | <b>18%</b> | <b>19%</b> | <b>20%</b> | <b>21%</b> | <b>22%</b> | <b>23%</b> | <b>24%</b> | <b>25%</b> | <b>26%</b> |      |
|------------|-------------------------|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------|
|            | <b>Materia seca (%)</b> | <b>90%</b>                    | <b>89%</b> | <b>88%</b> | <b>87%</b> | <b>88%</b> | <b>85%</b> | <b>84%</b> | <b>83%</b> | <b>82%</b> | <b>81%</b> | <b>80%</b> | <b>79%</b> | <b>78%</b> | <b>77%</b> | <b>76%</b> | <b>75%</b> | <b>74%</b> |      |
|            | <b>Solubles (%)</b>     | <b>Almidón Disponible (%)</b> |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |      |
| <b>0.0</b> | 43.1                    | 43.6                          | 44.1       | 44.6       | 45.1       | 45.6       | 46.0       | 46.7       | 47.3       | 47.9       | 48.5       | 49.1       | 49.7       | 50.4       | 51.1       | 51.7       | 52.4       | 53.1       |      |
|            | 43.8                    | 44.3                          | 44.8       | 45.4       | 45.9       | 46.4       | 47.0       | 47.5       | 48.1       | 48.7       | 49.3       | 49.9       | 50.6       | 51.2       | 51.9       | 52.6       | 53.3       | 54.0       |      |
|            | 44.6                    | 45.1                          | 45.6       | 46.1       | 46.6       | 47.2       | 47.8       | 48.3       | 48.9       | 49.5       | 50.1       | 50.8       | 51.4       | 52.1       | 52.8       | 53.5       | 54.2       | 54.9       | 55.6 |
|            | 45.3                    | 45.8                          | 46.3       | 46.9       | 47.4       | 48.0       | 48.5       | 49.1       | 49.7       | 50.3       | 51.0       | 51.6       | 52.3       | 52.9       | 53.6       | 54.3       | 55.0       | 55.7       | 56.4 |
|            | 46.0                    | 46.5                          | 47.1       | 47.6       | 48.2       | 48.7       | 49.3       | 49.9       | 50.5       | 51.1       | 51.8       | 52.4       | 53.1       | 53.8       | 54.5       | 55.2       | 55.9       | 56.6       | 57.3 |
|            | 46.8                    | 47.3                          | 47.8       | 48.4       | 48.9       | 49.5       | 50.1       | 50.7       | 51.3       | 52.0       | 52.6       | 53.3       | 54.0       | 54.7       | 55.4       | 56.1       | 56.8       | 57.5       | 58.2 |
|            | 47.5                    | 48.0                          | 48.6       | 49.1       | 49.7       | 50.3       | 50.9       | 51.5       | 52.1       | 52.8       | 53.4       | 54.1       | 54.8       | 55.5       | 56.2       | 56.9       | 57.6       | 58.3       | 59.0 |
|            | 48.2                    | 48.8                          | 49.3       | 49.9       | 50.5       | 51.1       | 51.7       | 52.3       | 52.9       | 53.6       | 54.2       | 54.9       | 55.6       | 56.3       | 57.0       | 57.7       | 58.4       | 59.1       | 59.8 |
|            | 49.0                    | 49.5                          | 50.1       | 50.6       | 51.2       | 51.8       | 52.4       | 53.1       | 53.7       | 54.4       | 55.1       | 55.8       | 56.5       | 57.2       | 57.9       | 58.6       | 59.3       | 60.0       | 60.7 |
|            | 49.7                    | 50.2                          | 50.8       | 51.4       | 52.0       | 52.6       | 53.2       | 53.9       | 54.5       | 55.2       | 55.9       | 56.6       | 57.3       | 58.0       | 58.7       | 59.4       | 60.1       | 60.8       | 61.5 |
|            | 50.4                    | 51.0                          | 51.6       | 52.2       | 52.8       | 53.4       | 54.0       | 54.7       | 55.3       | 56.0       | 56.7       | 57.4       | 58.1       | 58.8       | 59.5       | 60.2       | 60.9       | 61.6       | 62.3 |
|            | 51.1                    | 51.7                          | 52.3       | 52.9       | 53.5       | 54.1       | 54.8       | 55.5       | 56.1       | 56.8       | 57.5       | 58.3       | 59.0       | 59.7       | 60.4       | 61.1       | 61.8       | 62.5       | 63.2 |
|            | 51.9                    | 52.5                          | 53.1       | 53.7       | 54.3       | 54.9       | 55.6       | 56.2       | 56.9       | 57.6       | 58.4       | 59.1       | 59.9       | 60.6       | 61.4       | 62.2       | 63.0       | 63.8       | 64.6 |
|            | 52.6                    | 53.2                          | 53.8       | 54.4       | 55.0       | 55.7       | 56.4       | 57.0       | 57.7       | 58.4       | 59.2       | 59.9       | 60.7       | 61.5       | 62.3       | 63.1       | 63.9       | 64.7       | 65.5 |
|            | 53.3                    | 53.9                          | 54.5       | 55.2       | 55.8       | 56.5       | 57.1       | 57.8       | 58.5       | 59.3       | 60.0       | 60.8       | 61.5       | 62.3       | 63.1       | 63.9       | 64.7       | 65.5       | 66.3 |
|            | 54.1                    | 54.7                          | 55.3       | 55.9       | 56.6       | 57.2       | 57.9       | 58.6       | 59.3       | 60.1       | 60.8       | 61.6       | 62.4       | 63.2       | 64.0       | 64.8       | 65.6       | 66.4       | 67.2 |
|            | 54.8                    | 55.4                          | 56.0       | 56.7       | 57.3       | 58.0       | 58.7       | 59.4       | 60.1       | 60.9       | 61.6       | 62.4       | 63.2       | 64.0       | 64.9       | 65.7       | 66.5       | 67.3       | 68.1 |
|            | 55.5                    | 56.1                          | 56.8       | 57.4       | 58.1       | 58.8       | 59.5       | 60.2       | 60.9       | 61.7       | 62.5       | 63.3       | 64.1       | 64.9       | 65.7       | 66.5       | 67.3       | 68.1       | 68.9 |
|            | 56.3                    | 56.9                          | 57.5       | 58.2       | 58.9       | 59.6       | 60.3       | 61.0       | 61.7       | 62.5       | 63.3       | 64.1       | 64.9       | 65.7       | 66.5       | 67.3       | 68.1       | 68.9       | 69.7 |
|            | 57.0                    | 57.6                          | 58.3       | 58.9       | 59.6       | 60.3       | 61.1       | 61.8       | 62.5       | 63.3       | 64.1       | 64.9       | 65.7       | 66.5       | 67.3       | 68.1       | 68.9       | 69.7       | 70.5 |
|            | 57.7                    | 58.4                          | 59.0       | 59.7       | 60.4       | 61.1       | 61.8       | 62.6       | 63.3       | 64.1       | 64.9       | 65.7       | 66.5       | 67.3       | 68.1       | 68.9       | 69.7       | 70.5       | 71.3 |
|            | 58.4                    | 59.1                          | 59.8       | 60.5       | 61.2       | 61.9       | 62.6       | 63.4       | 64.1       | 64.9       | 65.7       | 66.5       | 67.3       | 68.1       | 68.9       | 69.7       | 70.5       | 71.3       | 72.1 |
|            | 59.2                    | 59.8                          | 60.5       | 61.2       | 61.9       | 62.7       | 63.4       | 64.2       | 64.9       | 65.7       | 66.5       | 67.3       | 68.1       | 68.9       | 69.7       | 70.5       | 71.3       | 72.1       | 72.9 |
|            | 59.9                    | 60.6                          | 61.3       | 62.0       | 62.7       | 63.5       | 64.2       | 65.0       | 65.7       | 66.5       | 67.3       | 68.2       | 69.1       | 70.0       | 70.9       | 71.8       | 72.7       | 73.6       | 74.5 |
|            | 60.6                    | 61.3                          | 62.0       | 62.7       | 63.5       | 64.2       | 65.0       | 65.7       | 66.5       | 67.3       | 68.2       | 69.0       | 69.9       | 70.8       | 71.7       | 72.6       | 73.5       | 74.4       | 75.3 |
|            | 61.4                    | 62.1                          | 62.8       | 63.5       | 64.2       | 65.0       | 65.7       | 66.5       | 67.3       | 68.2       | 69.0       | 69.9       | 70.7       | 71.6       | 72.5       | 73.4       | 74.3       | 75.2       | 76.1 |
|            | 62.1                    | 62.8                          | 63.5       | 64.2       | 65.0       | 65.7       | 66.5       | 67.3       | 68.2       | 69.0       | 69.9       | 70.7       | 71.6       | 72.5       | 73.4       | 74.3       | 75.2       | 76.1       | 77.0 |
|            | 62.8                    | 63.5                          | 64.3       | 65.0       | 65.7       | 66.5       | 67.3       | 68.1       | 68.9       | 69.8       | 70.7       | 71.6       | 72.5       | 73.4       | 74.3       | 75.2       | 76.1       | 77.0       | 77.9 |
| 63.6       | 64.3                    | 65.0                          | 65.7       | 66.5       | 67.3       | 68.1       | 68.9       | 69.8       | 70.6       | 71.5       | 72.4       | 73.3       | 74.3       | 75.3       | 76.3       | 77.3       | 78.3       | 79.3       |      |
| 64.3       | 65.0                    | 65.7                          | 66.5       | 67.3       | 68.1       | 68.9       | 69.7       | 70.6       | 71.4       | 72.3       | 73.2       | 74.2       | 75.1       | 76.1       | 77.1       | 78.1       | 79.1       | 80.1       |      |
| 65.0       | 65.7                    | 66.5                          | 67.3       | 68.0       | 68.8       | 69.7       | 70.5       | 71.4       | 72.2       | 73.1       | 74.1       | 75.0       | 76.0       | 77.0       | 78.0       | 79.0       | 80.0       | 81.0       |      |
| 65.7       | 66.5                    | 67.2                          | 68.0       | 68.8       | 69.6       | 70.4       | 71.3       | 72.2       | 73.0       | 74.0       | 74.9       | 75.9       | 76.8       | 77.9       | 78.9       | 79.9       | 80.9       | 81.9       |      |
| 66.5       | 67.2                    | 68.0                          | 68.8       | 69.8       | 70.4       | 71.2       | 72.1       | 73.0       | 73.9       | 74.8       | 75.7       | 76.7       | 77.7       | 78.7       | 79.7       | 80.7       | 81.7       | 82.7       |      |
| 67.2       | 68.0                    | 68.7                          | 69.5       | 70.3       | 71.2       | 72.0       | 72.9       | 73.8       | 74.7       | 75.6       | 76.6       | 77.5       | 78.6       | 79.6       | 80.6       | 81.6       | 82.6       | 83.6       |      |
| 68.0       | 68.7                    | 69.5                          | 70.3       | 71.1       | 71.9       | 72.8       | 73.7       | 74.6       | 75.5       | 76.4       | 77.4       | 78.4       | 79.4       | 80.4       | 81.5       | 82.6       | 83.7       | 84.8       |      |
| 68.7       | 69.4                    | 70.2                          | 71.0       | 71.8       | 72.6       | 73.5       | 74.4       | 75.2       | 76.2       | 77.1       | 78.1       | 79.1       | 80.1       | 81.1       | 82.2       | 83.3       | 84.4       | 85.5       |      |
| 69.4       | 70.2                    | 71.0                          | 71.8       | 72.6       | 73.5       | 74.4       | 75.2       | 76.2       | 77.1       | 78.1       | 79.1       | 80.1       | 81.1       | 82.2       | 83.3       | 84.4       | 85.5       | 86.6       |      |
| 70.1       | 70.9                    | 71.7                          | 72.5       | 73.4       | 74.3       | 75.1       | 76.0       | 77.0       | 77.9       | 78.9       | 79.9       | 80.9       | 82.0       | 83.0       | 84.2       | 85.3       | 86.4       | 87.5       |      |
| 70.9       | 71.7                    | 72.5                          | 73.3       | 74.2       | 75.0       | 75.9       | 76.8       | 77.8       | 78.7       | 79.7       | 80.7       | 81.8       | 82.8       | 83.9       | 85.0       | 86.2       | 87.3       | 88.4       |      |
| 71.6       | 72.4                    | 73.2                          | 74.1       | 74.9       | 75.8       | 76.7       | 77.6       | 78.6       | 79.5       | 80.5       | 81.6       | 82.6       | 83.7       | 84.8       | 85.9       | 87.1       | 88.2       | 89.3       |      |
| 72.3       | 73.1                    | 74.0                          | 74.8       | 75.7       | 76.6       | 77.5       | 78.4       | 79.4       | 80.4       | 81.4       | 82.4       | 83.4       | 84.5       | 85.6       | 86.8       | 88.0       | 89.1       | 90.2       |      |