



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GANADERÍA

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN PASTA PARA CERDOS

ELIAS CHÁVEZ DELGADILLO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

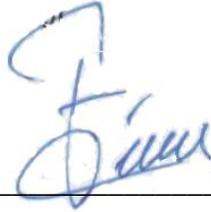
2021

La presente tesis titulada: **Desarrollo e implementación de un sistema de alimentación en pasta para cerdos**, realizada por el alumno: **Elías Chávez Delgadillo**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GANADERÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



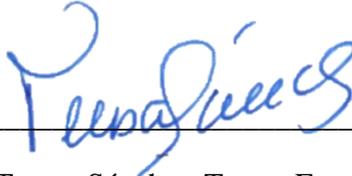
Dr. José Luis Figueroa Velasco

ASESOR



Dr. Sergio Román Othón Serna Saldívar

ASESORA



Dr. María Teresa Sánchez-Torres Esqueda

ASESOR



Dr. José Alfredo Martínez Aispuro

Montecillo, Texcoco, Estado de México, junio de 2021

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN PASTA PARA CERDOS

Elías Chávez Delgadillo, D.C.

Colegio de Postgraduados, 2021

RESUMEN

La alimentación en pasta es un método de producción de alimento para cerdos, desarrollado por la empresa Agropecuaria FC SA de CV, que consiste en la elaboración de un alimento mediante tratamiento térmico en condiciones alcalinas usando presión y temperatura elevadas por un tiempo corto, para producir una harina altamente digestible y con alta capacidad de retención de agua, la cual, en granja es mezclada con agua, para obtener un fluido de consistencia pastosa. El objetivo general de la presente investigación fue desarrollar la tecnología, incluyendo la formulación de dietas, diseño de equipos para su distribución, y modelos de alimentación; que permitan la implementación de forma comercial de la alimentación en pasta de cerdos, para ello se realizaron pruebas de concepto con animales, se diseñaron los equipos para su uso en granja y desarrollaron modelos matemáticos para utilizarlos en un sistema de alimentación automática. Se observó que la alimentación en pasta mejora la ganancia de peso ($P < 0.01$) y eficiencia alimenticia ($P < 0.01$) en comparación. El consumo de energía y lisina tienen un efecto significativo sobre la ganancia diaria de peso en cerdos alimentados con dietas en pasta ($P < 0.01$); a mayor concentración se observó mejor comportamiento productivo.

Palabras clave: Alimentación en pasta, tratamientos térmicos, nutrición de cerdos

PASTE FEEDING SYSTEM FOR PIGS, DEVELOPMENT, AND IMPLEMENTATION.

Elías Chávez Delgadillo, D.C.

Colegio de Postgraduados, 2021

ABSTRACT

Paste feeding is a method of production of feed for pigs, developed by the company Agropecuaria FC, it consists on the elaboration of a meal by a heat treatment in alkaline conditions using high pressure and temperature for a short time, to produce a highly digestible flour, with high water retention capacity, which on the farm, is mixed with water, to obtain a fluid with pasty consistency. The general objective of this research is to develop technology for use on the farm, including the feed formulation, design of equipment for distribution, and feeding models; that allows the commercial implementation of paste feeding, for this, concept tests were carried out, the equipment was designed for use on the farm and mathematical models were developed to be used in an automatic feeding system. It was observed that paste feeding improves weight gain ($P < 0.01$) and feed efficiency ($P < 0.01$). The consumption of energy and lysine has a significant effect on daily weight gain in pigs fed pasta diets ($P < 0.01$); the higher the concentration, the better the productive performance will be achieved.

Key words: Paste feeding, heat treatments, pig nutrition

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Dedico esta tesis a:

Mi esposa y mis hijos, que son el motivo detrás de mi sonrisa y la razón de mi esfuerzo.

A mis papas y mis hermanos, que son mis héroes, cómplices, socios y amigos; y me han apoyado incondicionalmente en todo momento, a pesar de las difíciles condiciones económicas que pasó el nuestro negocio familiar al invertir en mis proyectos.

Al Dr. José Luis Figueroa Velasco, quién además de cumplir de forma excepcional con su labor de consejero, confió en mi proyecto y me impulsó a desarrollarlo.

A los doctores María Teresa Sánchez-Torres Esqueda, José Alfredo Martínez Aispuro y Sergio Othón Serna Saldívar, por su valiosa ayuda académica y personal.

Al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo y en especial Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad con Orientación en Ganadería, por aceptarme para realizar mis estudios de posgrado y brindarme educación de calidad a nivel internacional.

Al CONACYT, por darme la oportunidad de estudiar el doctorado y apoyarme económicamente durante estos años.

A todos ellos, les dedico mi tesis y agradezco profundamente todo su apoyo.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS.....	v
CONTENIDO.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE CUADROS.....	ix
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
Planteamiento del problema.....	1
OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	1
Objetivo general.....	1
Objetivos específicos.....	2
Hipótesis.....	2
REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
Métodos de elaboración de alimentos para cerdos.....	2
Referencias bibliográficas.....	14
CAPÍTULO 1. ELABORACIÓN DE PRUEBAS DE CONCEPTO CON CERDOS DE ENGORDA.....	19
1.1. RESUMEN.....	19
1.2. ABSTRACT.....	19
1.3. INTRODUCCIÓN.....	20
1.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
1.6. CONCLUSIONES.....	33
1.7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
CAPÍTULO 2 DESARROLLO DE MODELO MATEMÁTICO PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL ALIMENTO.....	37
2.1. RESUMEN.....	37
2.2. ABSTRACT.....	37
2.3. INTRODUCCIÓN.....	38

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
2.6. CONCLUSIONES.....	50
2.7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
CAPÍTULO 3 DISEÑO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE LA PASTA	52
3.1. RESUMEN.....	52
3.2. ABSTRACT	52
3.3. INTRODUCCIÓN.....	52
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	55
Necesidades del sistema	55
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
Selección de tanque y diseño de turbina para mezclado	56
Selección de la tubería y potencia de la bomba.....	59
3.6. CONCLUSIONES.....	63
3.7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
CONCLUSIONES GENERALES.....	64
Discusión final.....	64
Conclusiones	66
Referencias bibliográficas	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Digestibilidad aparente de nutrientes con tratamiento térmico..	8
Figura 2 Efecto de la temperatura y tiempo sobre inhibidores de tripsina en grano de soya.	9
Figura 3 Gelatinización del almidón a diferentes temperaturas.....	10
Figura 4 Grasa dorsal de cerdas alimentadas con diferentes tratamientos térmicos.....	13
Figura 5 Diseño 3D del cocedor continuo por alta presión .	22
Figura 6 Diagrama de flujo para la producción de harina para pasta.	22
Figura 7 Curva de crecimiento, Experimento 1.	28
Figura 8 Curva de crecimiento, Experimento 3.	29
Figura 9 Aumento de peso diario, Experimento 2.	30
Figura 10 Fotografías de la canal, Experimento 2.	31
Figura 11 Efecto de lisina sobre el aumento de peso diario	32
Figura 12 Valores la puntuación del comedero (BS) utilizados en el factor de ajuste.	42
Figura 13 Diagrama de flujo de la estimación de la ingesta de alimento dentro del modelo	43
Figura 14 Diagrama de dispersión de la ingesta de alimento real y la ingesta estimada	44
Figura 15 Diagrama de dispersión de las LSMeans del aumento de la ingesta de alimento	45
Figura 16 Diagrama de dispersión de la ingesta promedio de alimento.	46
Figura 17 Diagrama de dispersión de la ingesta de alimento real frente a la estimada	46
Figura 18 Análisis residual de la ingesta estimada de alimento sin el factor de ajuste.	47
Figura 19 Diagrama de dispersión de la ingesta media de alimento durante la lactancia durante la validación del modelo.	48
Figura 20 Puntuación media del comedero en la validación del modelo.	49
Figura 21 Ejemplo del uso de la alimentación en pasta.	54
Figura 22 Descripción gráfica de las necesidades del sistema de distribución.....	55
Figura 23 Proporciones geométricas típicas para agitadores tipo turbina con discos.....	57
Figura 24 Dibujo del diseño de la turbina para el tanque de mezclado	57
Figura 25 Selección del número de potencia (N_p) para la turbina seleccionada.	59
Figura 26 Diagrama de tuberías y accesorios para el sistema de bombeo.....	60
Figura 27 Vista en 3D del sistema de mezclado y distribución de la pasta diseñado.	65

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Efecto del proceso de elaboración del alimento sobre el crecimiento de cerdos	3
Cuadro 2 Digestibilidad aparente observada con diferentes tratamientos térmicos.	7
Cuadro 3 Contenido de fracciones de almidón (%MS) en granos de cereales de uso forrajero.	10
Cuadro 4 Composición de las dietas, experimento 1	23
Cuadro 5 Perfil nutrimental de las dietas, Experimento 2.	25
Cuadro 6 Composición y perfil nutrimental de las dietas, Experimento 3.	26
Cuadro 7 Comportamiento productivo observado, Experimento 1	27
Cuadro 8 Digestibilidad aparente dietas en pasta maíz y soya	33
Cuadro 9 Composición la dieta para desarrollo de modelo matemático	40
Cuadro 10 Promedio de los resultados en la validación del modelo	49
Cuadro 11 Cálculo de potencia de la bomba para la distribución de la pasta en diferentes tamaños de tubería.	62

INTRODUCCIÓN GENERAL

Planteamiento del problema

La alimentación en pasta alcalina es un método de producir el alimento y de utilizarlo en granja, desarrollado y protegido mediante patente (MX 327813 B) por la empresa Agropecuaria FC SA de CV, consiste en un tratamiento térmico con altas presiones en condiciones alcalinas que produce una harina con una alta capacidad de absorción de agua, la cual en granja es hidratada para formar un fluido viscoso de consistencia pastosa. El método de alimentación ha sido probado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Gaspar *et al.*, 2015) en donde se observó mejoras en eficiencia alimenticia y digestibilidad de energía, nitrógeno, calcio y fósforo. Sin embargo, no se ha probado el efecto de diferentes niveles de lisina y energía sobre la ganancia diaria de peso que permitan hacer recomendaciones sobre la formulación de raciones para cerdos.

Además, los sistemas de alimentación húmeda requieren modelos de predicción de ingesta de alimento para calcular la cantidad que se espera consuman los cerdos, a fin de evitar la falta o el desperdicio de alimento, debido a que el alimento húmedo tiene poca vida útil y debe ser utilizado ese mismo día, de lo contrario se fermenta y tendría que tirarse, aumentando el desperdicio. Por consecuencia, para la implementación en granja de la alimentación en pasta se requiere del desarrollo de un método para estimar el consumo de alimento.

Los equipos disponibles en el mercado para el mezclado y distribución de alimentos líquidos están diseñados para el bombeo de fluidos con baja viscosidad y por lo tanto no pueden usarse en alimentación en pasta y es necesario el diseño de equipos que permitan el mezclado y distribución del alimento

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

El objetivo general de la presente investigación es desarrollar de la tecnología para uso en granja, incluyendo la formulación de dietas, diseño de equipos para su distribución, y modelos de

alimentación; que permitan la implementación de forma comercial de la alimentación en pasta de cerdos.

Objetivos específicos

- Medir el efecto de la alimentación en pasta sobre la ganancia diaria de peso y eficiencia alimenticia de los cerdos, y comparar con otros métodos de alimentación.
- Medir el efecto de la concentración de energía y lisina en dietas con alimentación en pasta.
- Realizar recomendaciones sobre la formulación de alimentos con dietas en forma de pasta.
- Desarrollo de modelos matemáticos, de predicción del consumo de alimento, que puedan ser utilizados en sistemas autogestionados de distribución del alimento.
- Diseñar equipos que permitan mezclar la harina con agua para formar pasta y distribuirla a los comederos en una granja de cerdos de tamaño comercial.

Hipótesis

La alimentación en forma de pasta mejora la eficiencia alimenticia y ganancia de peso de cerdos en engorda intensiva en comparación a la alimentación en harina, pellet o líquida.

Se puede hacer un diseño especial de equipos y modelos de predicción de consumo para distribuir el alimento a los comederos en una granja de cerdos.

REVISIÓN DE LITERATURA

Métodos de elaboración de alimentos para cerdos

De acuerdo con **Hogberg** (1981) la forma física del alimento y su método de elaboración afectan la aceptación y digestibilidad del alimento. Existen 8 métodos de elaboración de alimentos para cerdos, que se detallan en el Cuadro 1; algunos de ellos requieren de tratamientos térmicos. Los tratamientos térmicos son procesos de transferencia de calor que se realizan a una materia prima o alimento balanceado y consisten en una combinación de temperatura, humedad, presión y tiempo capaz de modificar el valor nutritivo de los alimentos (**Aldrich et al.**, 1995; **Orias et al.**, 2002). Bajo las condiciones adecuadas consiguen una desnaturalización parcial de las proteínas (**Lundblad et al.**, 2012), inhiben factores antinutricionales sensibles a la temperatura (**Noland et**

al., 1976; Aldrich *et al.*, 1997; Andrade *et al.*, 2015), gelatinizan el almidón (Giuberti *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2016), mejoran la solubilidad de las fracciones de fibra (Hussein *et al.*, 1995) y disminuyen carga microbiana patógena que pudiera estar presente en el alimento, lo que hace a los alimentos más digestibles y sanos, afectando de este modo el crecimiento animal (Gorrachategui, 2010). Los tratamientos térmicos pueden cambiar las propiedades fisicoquímicas de los alimentos, tales como capacidad de absorción de agua, viscosidad, densidad; y se pueden aprovechar como una estrategia para facilitar el manejo en granja (Chávez, 2011), prevenir enfermedades (Cochrane *et al.*, 2015), inducir saciedad en cerdos adultos (Souza da Silva *et al.*, 2014), o utilizar el almidón resistente como prebiótico (Fuentes-Zaragoza *et al.*, 2011; Regmi *et al.*, 2011; Bach *et al.*, 2012; Haenen *et al.*, 2013).

Cuadro 1 Efecto del procesado de cereales sobre el crecimiento de cerdos

Método de procesado	Tipo de grano	Efecto en GDP	Efecto en Consumo	Efecto CA	Comentarios
Molienda	Maíz Sorgo	(+)3-5%	Ninguno	(+)3-5%	Muy fino reduce palatabilidad
Peletizado	Maíz Sorgo Cebada Avena Trigo	(+)3-6%	(-)1-3%	(+)5-8% (+)7-10%	Entre más fibroso el ingrediente mayor es el incremento
Pasta	Maíz	(+)10-15%	(+)10-15%	Ninguno	Relación alimento/ agua 1.2-1.5/1.
Líquido	Maíz	(+)	(+)	(+)	Relación alimento/ agua 1/2.
Tostado	Maíz	Ninguno	Ninguno	(+) Ligero	Proceso cuesta más que la mejora en el ECA
	Soya	Ninguno	(-)	(+)4-6%	Efecto sobre factores antinutricionales
Rolado con vapor	Maíz Sorgo	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Común en dietas para rumiantes
Micronizado	Maíz Sorgo	Ninguno	Ninguno	Variable	La viabilidad de aminoácidos se puede ver reducida.
Extrudido	Soya	Ninguno	(-)	(+)4-6%	Costo de producción elevado

GDP: Ganancia diaria de peso, CA: Conversión alimenticia, tomado de Hogberg (1981)

En contraparte, cuando se usan temperaturas muy altas, se presentan reacciones que disminuyen el valor nutritivo de los alimentos como las reacciones de Maillard (Dozier y Hess, 2011), las reacciones de racemización de aminoácidos y la formación de isopéptidos (Camean y Repetto, 2012) las cuales disminuyen la digestibilidad de las proteínas y dan lugar a la formación de compuestos mutagénicos o potencialmente carcinogénicos (Badui, 2013).

Existen numerosos tratamientos térmicos pero los más comunes en la elaboración de alimentos para consumo animal son el peletizado, rolado con vapor, tostado y extrusión. El peletizado es un proceso de compactación mecánica de materias primas o alimentos balanceados que involucra humedad, calor y presión. Se utiliza tanto en la preparación de materias primas individuales como en alimentos balanceados y es una de las formas más comunes de preparación de alimento para ganado. Consiste en pasar un alimento en harina por al menos un acondicionador (por 20 a 240 s) donde mediante vapor o agua caliente se agrega humedad (entre 3 a 6% en peso de agua agregada) y temperatura (60 a 110°C) a la mezcla (AFIA, 2005), la cual es compactada al hacerla pasar por pequeños orificios cónicos en un molino peletizador formando cilindros pequeños llamados pellets (con medidas que van de 2 a 24 mm de diámetro), los cuales son enfriados usando aire. De forma general se asume que el proceso de peletizado mejora entre 4 y 9% la ganancia diaria de peso en cerdos (Jensen y Becker, 1965; Chamberlain *et al.*, 1967; Hancock y Behnke, 2001; De Jong *et al.*, 2012; Miller, 2012;). Los alimentos comprimidos (en pellet) son la principal forma en la que se elabora alimento para cerdo en México, debido a que mejora la ganancia de peso diaria y la conversión alimenticia, en relación con los alimentos en harina.

El rolado con vapor es una técnica utilizada, principalmente, en granos de cereales de alimentos para rumiantes y caballos. Consiste en una cocción del grano limpio, usando vapor de agua en un cocedor vertical diseñado para tal función (vapor saturado a 100°C por 20-60 min), el cual alimenta un molino de rodillos que comprime el grano formando hojuelas (con hasta 18% de humedad), las hojuelas pueden ser secadas y enfriadas con aire, si se desea su almacenamiento o bien usadas húmedas si su consumo es inmediato. El rolado con vapor es generalmente usado como hojuela en dietas de rumiantes, pero en dietas de pollo y cerdo la hojuela se muele. Con el uso de materias primas roladas con vapor se ha observado una mejora en la ganancia diaria de peso

en cerdos del 14.6%, pero un aumento también del 13.9% en el consumo de alimento por lo que la eficiencia alimenticia no presenta cambio (Medel *et al.*, 1999).

La extrusión es un proceso mediante el cual una materia prima o un alimento balanceado, finamente molido, pasa por un proceso de acondicionamiento similar al del peletizado y entra a un extrusor, el cual es un cilindro con uno o dos transportadores helicoidales, con diferentes configuraciones dependiendo de la aplicación deseada, en el que se puede o no inyectar vapor o agua y se somete el alimento a presiones y temperaturas muy elevadas (hasta 65 kg/cm² y 180°C) provocadas por una compresión mecánica forzando la masa a pasar por aperturas pequeñas que le dan forma al producto y unas cuchillas giratorias definen su largo (Riaz, 2000), para después el producto húmedo (con hasta 75% de humedad) pasa a un proceso de secado/enfriado y por último el producto extrudido y seco (con menos de 10% de humedad) pasa por un tambor rotatorio si es que se desea aplicar algún tipo de cobertura, como puede ser grasa o leche en polvo. La extrusión es utilizada para lograr formas variadas, como croquetas en forma de chuleta; densidades específicas, para lograr un nivel de flotación deseado (importante en acuicultura); modificar texturas, como los premios y snacks para perros con textura de carne o hueso; y lograr pasteurización o esterilización de alimentos; que sería difícil de lograr con otro tipo de proceso. Es ampliamente utilizada en alimentos para mascotas, pero se utiliza poco en la alimentación de animales de granja. El proceso de extrusión tiene un efecto positivo entre el 6 y 12% sobre la ganancia diaria de peso (Bokelman *et al.*, 2015) y 12% en la eficiencia alimenticia de los cerdos (Skoch *et al.*, 1983).

Por último, el tostado es un proceso utilizado principalmente en grano de soya, pero puede ser usado en otro tipo de granos de cereales y oleaginosas. Consiste en exponer al grano a flama directa o aire caliente a muy alta temperatura, en un tambor rotatorio o transportador helicoidal modificado para tal efecto, por un tiempo corto, generalmente 5 min, hasta obtener una temperatura de salida de entre 130-160 °C. El tostado permite desnaturalizar los inhibidores de tripsina presentes en el grano de soya y así poder aprovechar al grano integral, obteniendo un producto con alto contenido de aceite y proteína (Woyengo *et al.*, 2014). MacIsaac *et al.* (2005) estudiaron el efecto de la inclusión de soya integral tostada en la dieta de pavos en engorda, observaron que la soya integral tostada puede sustituir hasta 100% a la pasta de soya manteniendo los parámetros

productivos y la sustitución parcial de la pasta de soya por soya integral tostada mejoraba la ganancia de peso y eficiencia alimenticia.

Las mejoras en la ganancia de peso observadas con el uso de tratamientos térmicos, respecto a dietas sin tratamiento térmico, no se presentan en todos los estudios; sin embargo, existe evidencia, en la mayoría de los estudios, de un aumento significativo en la digestibilidad de nutrientes por efecto de los tratamientos térmicos. La falta de mejora en la ganancia de peso puede ser resultado de sobrepasar en las dietas experimentales probadas las necesidades nutrimentales de los animales, siendo más evidente la diferencia en la ganancia de peso cuando las dietas probadas son limitadas en algún nutriente, lo que sugiere la necesidad de una estrategia de formulación de dietas para aprovechar la mejora en la digestibilidad del alimento con la intención de reducir el costo de la dieta.

Los alimentos húmedos son principalmente líquidos y pastas. La alimentación líquida consiste en mezclar un alimento convencional en harina o un subproducto industrial húmedo junto con agua hasta obtener una sopa (Brooks *et al.*, 2001), que es bebida por el animal; dicha sopa puede ser fermentada por microorganismos para mejorar la flora microbiana del tracto digestivo de los cerdos (Canibe y Jensen, 2003). Las dietas líquidas mejoran la conversión alimenticia y la ganancia de peso diaria, en relación con los alimentos en harina, pero sin que el almidón esté gelatinizado. Esto es provocado porque el agua aumenta la superficie de contacto y facilita las reacciones de digestión. Las dietas líquidas disminuyen el desperdicio de alimento por lo que, a pesar de no recibir tratamiento térmico, la eficiencia alimenticia es similar y en algunos casos superior al pellet; sin embargo, para su uso se requieren comederos y diseño de corraletas especiales, lo que limita su uso en granjas construidas para alimentación seca.

Los diferentes tratamientos térmicos tienen condiciones de tiempo, temperatura, presión y humedad diferentes y afectan de forma diferente a las características nutrimentales de los alimentos. Kim *et al.* (1994) hicieron una comparación entre la digestibilidad aparente de nitrógeno, energía bruta y materia seca entre dietas crudas, roladas con vapor, pellet y extrudidas en cerdas durante el periodo de lactancia; observaron que las dietas con ingredientes tostados presentan mayor digestibilidad aparente que con ingredientes crudos, las dietas con ingredientes rolados con vapor presentan mejor digestibilidad que el tostado, el pellet mejor que el rolado y el

extrudido mejor que el pellet, lo que parece indicar que a medida que aumenta el gasto energético del tratamiento térmico también aumenta la digestibilidad aparente de los alimentos (Cuadro 2).

Cuadro 2 Digestibilidad aparente observada con diferentes tratamientos térmicos.

	Crudo	Rolado	Peletizado	Extrudido
Digestibilidad de Nitrógeno (%)	70.90%	77.70%	76.10%	84.00%
Digestibilidad de Energía Bruta (%)	75.60%	80.90%	81.80%	87.10%
Digestibilidad de Materia Seca (%)	77.20%	80.90%	81.80%	87.10%

Obtenido de Kim et al. (1994)

La combinación de temperatura, tiempo, presión y humedad es lo que determina el cambio en el valor nutritivo de los alimentos (Gorrachategui, 2010). Existe evidencia de una relación positiva entre la temperatura de proceso y la digestibilidad aparente de los alimentos (Figura 1). Aldrich *et al.* (1995) señalan un incremento en la digestibilidad de ácidos grasos del grano integral de soya en novillos de engorda cuando la temperatura del proceso es superior a 141°C. También hay un cambio sobre la digestibilidad aparente de las fracciones de fibra: bajo condiciones de alta temperatura y presión se reduce el peso molecular de la pectina y hemicelulosa incrementando la solubilidad de la fibra presente en los alimentos. Hussein *et al.* (1995) señalan un incremento en la digestibilidad de las fracciones de fibra del grano de soya tostado como resultado del incremento de temperatura en el tratamiento térmico.

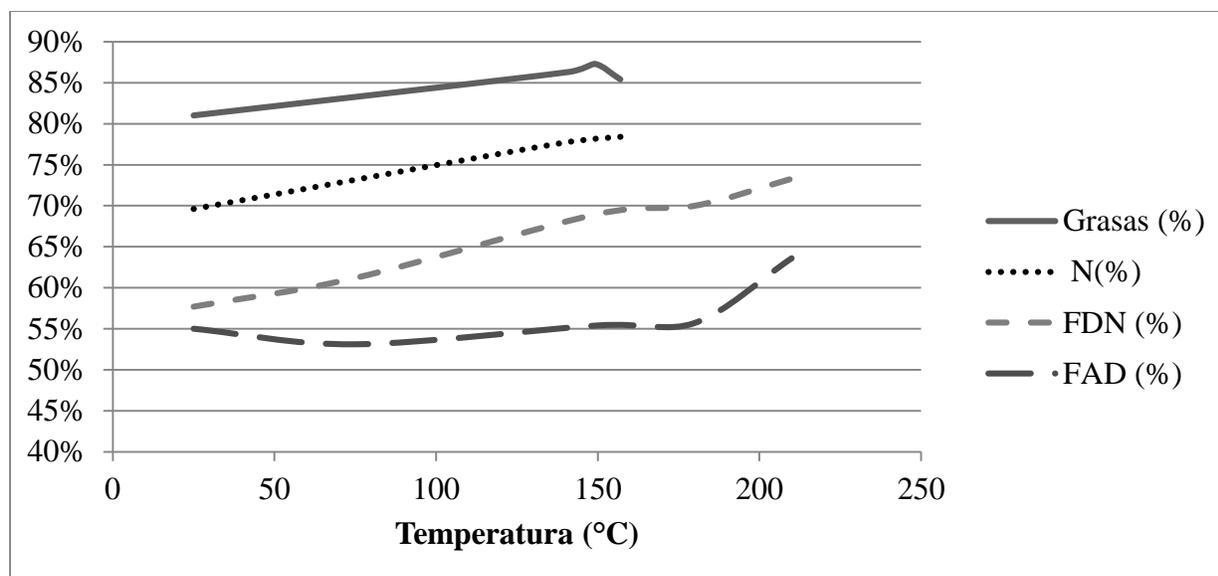


Figura 1 Digestibilidad aparente de nutrientes con tratamiento térmico. *Nitrógeno (Orias et al., 2002), grasas (Aldrich et al., 1995), fibra detergente neutro (FDN) y Fibra detergente ácido (FAD) (Hussein et al., 1995).*

Con temperaturas elevadas se presenta un desdoblamiento de las proteínas presentes en los alimentos debido a una pérdida de su estructura terciaria o cuaternaria; a dicho cambio se le conoce como desnaturalización de proteínas. *Orias et al. (2002)* observaron un aumento en la digestibilidad aparente en novillos de engorda alimentados con grano de soya integral tostado a diferentes temperaturas. La desnaturalización permite que las proteínas estén más disponibles para las enzimas digestivas; sin embargo, un exceso de temperatura puede dar como resultado reacciones de Maillard y pérdida de solubilidad de la proteína disminuyendo su valor nutritivo.

La desnaturalización afecta también a los inhibidores de proteasas presentes en algunos ingredientes, lo que mejora también la disponibilidad de las proteínas; tal es el caso del inhibidor de tripsina (IT) presente en el grano de soya crudo (Figura 2). Diferentes autores señalan la disminución del inhibidor de tripsina conforme el tiempo de retención, temperatura o presión aumenta en un tratamiento térmico (*Noland et al., 1976; Aldrich et al., 1997*), dando como resultado una mayor digestibilidad de las proteínas.

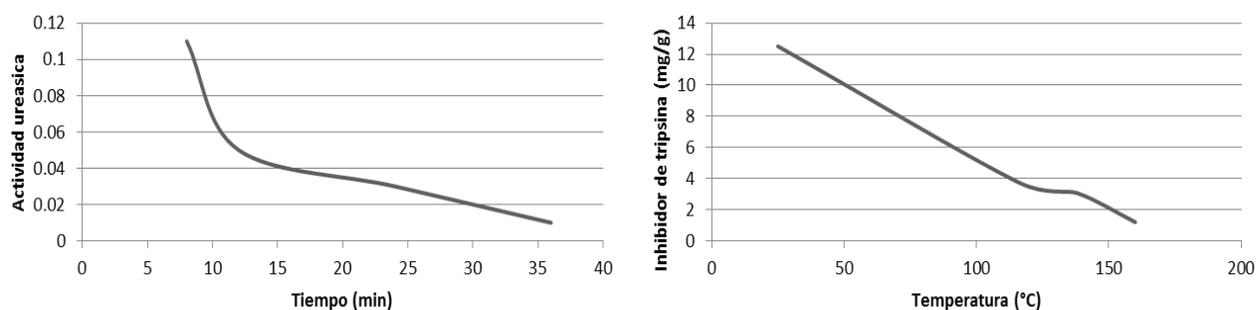


Figura 2 Efecto de la temperatura y tiempo sobre inhibidores de tripsina en grano de soya (*Noland et al., 1976; Aldrich et al., 1997*).

El almidón es el principal polisacárido no estructural presente en los ingredientes de origen vegetal utilizados en alimentación animal; éste se encuentra en forma de gránulos formados por cadenas de amilosa y amilopectina (que son cadenas lineales y ramificadas de glucosa). Cuando los granos de almidón son calentados con suficiente agua y temperatura ocurre un proceso conocido como gelatinización del almidón (*Costa et al., 1976*) (Figura 3), el cual, aumenta la solubilidad del almidón, haciéndolo más digestible y permitiendo la formación de lo que se conoce como “pastas” (*Hoseney, 1998*). Si al almidón gelatinizado se le somete a un proceso de secado rápido se obtiene un almidón “pregelatinizado” el cual conserva las características de solubilidad, lo que le permite absorber agua fácilmente (*Liu et al., 2017*). Según *Gorrachategui (2010)*, el almidón para animales no rumiantes puede ser dividido en almidón de rápida digestión, almidón de lenta digestión y almidón resistente (RDS, LDS y RS respectivamente por sus siglas en inglés) (Cuadro 3).

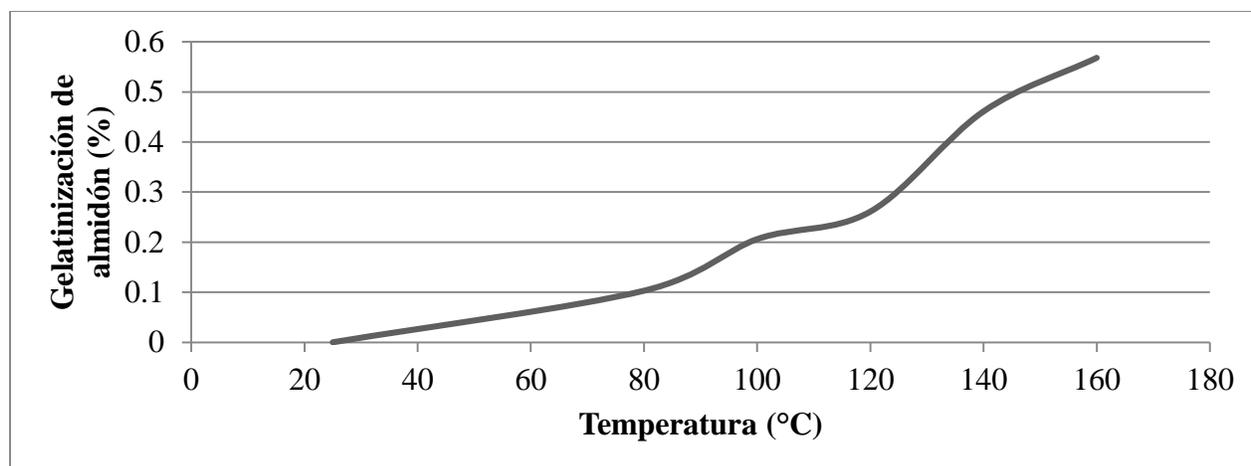


Figura 3 Gelatinización del almidón a diferentes temperaturas (Costa *et al.*, 1976).

Cuadro 3 Contenido de fracciones de almidón (%MS) en granos de cereales de uso forrajero.

Ingrediente	% RDS	% LDS	% RS
Maíz molido	34.6	14.6	23.6
Maíz extrusionado a baja temperatura	54.2	13.1	6.4
Maíz extrusionado a alta temperatura	65	7.8	1.4
Cebada molido	23.2	11.4	17.3
Cebada extrusionada a baja temperatura	30.3	13.5	4.8
Cebada extrusionada a alta temperatura	47.8	4.4	6
Sorgo molido	27.3	13	33.8
Sorgo extrusionado a baja temperatura	49.1	10.9	15.4
Sorgo extrusionado a alta temperatura	70	5.4	2.1

% en base seca, Extrusión a baja temperatura: 79-94°C, Extrusión a alta temperatura 124-145°C, RDS (Almidón de rápida digestión), LDS (Almidón de lenta digestión), RS (almidón no digestible o resistente a la digestión)

En cerdos, las fracciones de almidón que escapan la digestión en el intestino delgado llegan al colon donde son finalmente fermentadas (Williams *et al.*, 2001). Esta fracción de “Almidón resistente” (RS) es considerada, al igual que la fibra, como un carbohidrato no digestible y se presenta debido a 5 razones diferentes en los cereales:

- RS1 es almidón físicamente atrapado o encapsulado en una matriz proteica que retarda o impide el acceso a las amilasas (Jyothsna and Hymavathi, 2017)

- RS2 almidón con resistencia enzimática resultado de la conformación tridimensional del gránulo del almidón (proporción de amilosa y amilopectina) (**Raigond et al.** 2014).
- RS3 almidón no granular formado generalmente después de la gelatinización, durante la retrogradación de la amilosa (**Svihus et al.**, 2005).
- RS4 almidón resultado de una modificación por un proceso químico, conocidos como almidones modificados, utilizados en la industria alimenticia por sus características funcionales (**Tharanthan**, 2005).
- RS5 conformación de una matriz almidón- lípidos, que se forman bajo condiciones extremas de proceso como la extrusión.

En nutrición de cerdos, los almidones resistentes son considerados como componentes no deseados, con un posible impacto en la eficiencia energética de los alimentos (**Sun et al.**, 2006), en el aumento de peso y consumo de alimento (**Li et al.**, 2007). Sin embargo algunos autores (**Fuentes-Zaragoza et al.**, 2011 y **Bach et al.**, 2012) señalan un posible uso de los almidones resistentes como prebióticos, que podrían producir efectos benéficos en la producción porcina, pues aumentan la concentración de los géneros *Bifidobacterium* y *Lactobacillus ssp* en el colon (**Bird et al.**, 2007; **Regmi et al.**, 2011) y pueden ser aprovechados por el cerdo en forma de ácidos grasos volátiles vía fermentación (**Wang et al.**, 2004). Los posibles impactos benéficos del almidón resistente podrían ser más importantes en cerdos adultos que en lechones, debido a que en cerdos adultos los ácidos grasos volátiles pueden llegar a aportar hasta 28% de las necesidades diarias de energía (**Grieshop et al.**, 2001), en cambio con lechones el colon no se ha desarrollado por completo y la aportación de energía de los ácidos grasos volátiles es mínima.

Gorrachategui (2010) también señala que entre mayor sea la temperatura del tratamiento térmico la fracción no digestible del almidón disminuye y aumenta la fracción de rápida digestión; es decir, la gelatinización del almidón mejora su digestibilidad dependiendo de las condiciones del tratamiento térmico. En estimaciones *in vitro*, usando enzimas pancreáticas de porcino, **Brent** (1986) señala un incremento en la digestibilidad del almidón de maíz del 17% (crudo y molido) a 49% (rolado con vapor).

En caso del tostado (sin el uso de vapor), se ha observado que las altas temperaturas aumentan la liberación enzimática de glucosa, lo que mejora la digestibilidad del almidón (Felsman *et al.*, 1976). La temperatura es quizá el factor más importante que afecta el crecimiento y la supervivencia de los microorganismos: a temperaturas muy frías o muy calientes los microorganismos no crecerán y pueden incluso morir, pero los valores absolutos de estas temperaturas varían mucho entre microorganismos y por lo general reflejan el rango de temperatura media de sus hábitats naturales (Madigan *et al.* 2009). La temperatura máxima de crecimiento de un organismo determinado refleja probablemente la inactivación de una o más proteínas celulares que son esenciales. De acuerdo con el rango de temperatura en la cual crecen los microorganismos, pueden ser clasificados en Psicotróficos, Mesófilos, Termófilos y dos clases de Hipertermófilos con temperaturas óptimas de crecimiento de 4, 39, 60, 88 y 106 °C, respectivamente (Madigan *et al.*, 2009). Para cada proceso en específico se debe determinar la combinación de presión, temperatura y tiempo que asegure la disminución de la carga microbiana a niveles aceptables afectando al mínimo la calidad nutricional; para ello, se calcula la disminución decimal (D) de la pérdida de nutrientes y de la población de los microorganismos de interés a diferentes temperaturas y presiones durante diferentes tiempos.

En contraparte, algunos nutrientes son sensibles a los tratamientos térmicos: la destrucción térmica de vitaminas es tomada en cuenta a la hora del diseño de un tratamiento térmico de un alimento, en donde se procura conjugar la presión, temperatura y tiempo para disminuir al mínimo la calidad nutricional de los alimentos asegurando la destrucción de microorganismos patógenos y afectar al mínimo la calidad nutricional del alimento (Maroulis y Saravacos, 2003). Se pueden disminuir los efectos negativos de los tratamientos térmicos sobre vitaminas, medicamentos, enzimas y probióticos mediante coberturas, como el método presentado por Bouscher *et al.* (2014) (US 20140037709 A1) en el cual se usa una cobertura de ácido carbónico o sus sales y grasas capaces de resistir el peletizado, o el método propuesto por Markussen *et al.* (2013) (US 20130302469 A1) que utiliza una cobertura hecha con sal de azufre para hacer la misma función.

A pesar de la mejora significativa en la digestibilidad de nutrientes, no siempre se logra que dicha diferencia se vea reflejada también en una diferencia sobre el aumento diario de peso o eficiencia alimenticia, pero por lo general, cuando no se presentan diferencias significativas en el aumento de peso diario, sí las hay en la composición de la canal de animales no rumiantes.

Zollitsch *et al.* (1993) (Figura 4) reportan que cerdas alimentadas con alimentos tostados o extrusionados presentan mayor grasa dorsal que aquellas alimentadas con alimentos crudos, lo que sugiere la posibilidad de utilizar los tratamientos térmicos de los alimentos como una estrategia para disminuir costos, aprovechando la mejora en la digestibilidad para balancear raciones con menos energía bruta pero con igual energía metabolizable que con una dieta con ingredientes crudos. Para ello es necesario disminuir el gasto energético en los tratamientos térmicos y por ende disminuir su costo de producción y su impacto ambiental.

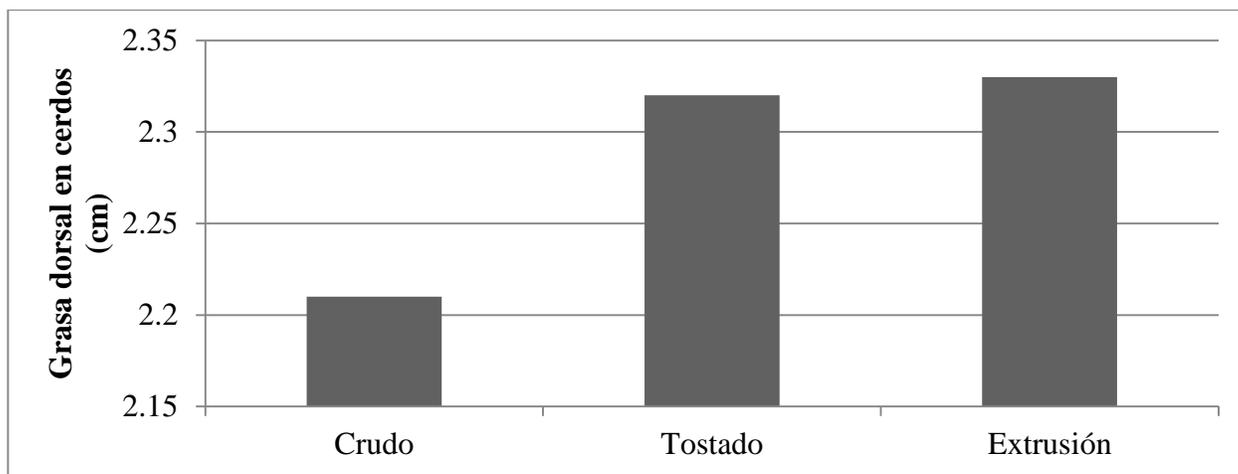


Figura 4 Grasa dorsal de cerdas alimentadas con diferentes tratamientos térmicos (Zollitsch *et al.*, 1993)

El progreso de la tecnología en las últimas dos décadas ha permitido avanzar sustancialmente en temas de interés para la disminución del gasto energético de los tratamientos térmicos. Se han propuesto el uso de enzimas como un coadyuvante en el proceso, para reducir el gasto energético y aumentar la producción por hora, como el método propuesto por Thea *et al.* (2016) (US 20160150808) que utiliza amilasas en el proceso de peletizado. Otra opción es el uso de sistemas de altas presiones, tal como los sistemas de cocción de cereales publicados por Mendoza (1975) (US 3859452), Martínez-Bustos *et al.* (2002) (US6387437), Martínez-Montes *et al.* (2007) (US20070082097A1) y Hirahara (1980) (US4181072).

El tratamiento térmico que propone la empresa Agropecuaria FC utiliza un cocedor cilíndrico de flujo continuo y alta presión, que a diferencia del descrito por Martínez-Montes (2007), su posición es completamente horizontal, por lo que la cocción por inmersión ocurre durante todo el proceso de cocción, permitiendo mayor tiempo de contacto con la solución y su

uso en un mayor número de aplicaciones, y a diferencia del aparato descrito por Hirahara (1980), dentro del cocedor se cuenta con un sistema para escurrir el alimento disminuyendo las pérdidas de energía y de presión; después de la cocción por inmersión le sigue un proceso de molienda y secado produciendo una harina seca que puede ser almacenada por tiempos prolongados. Dicha harina es hidratada en granja para producir un alimento de consistencia pastosa: a este tipo de alimentación se le llama alimentación en pasta (Chávez, 2011) (MX 327813 B), la cual es posible suministrar a los cerdos por medio de sistemas de bombeo controlados por computadora, lo que facilita el manejo, reduce la mano de obra y mejora el grado de control en la alimentación en la granja. En este sentido, los tratamientos térmicos en un futuro también podrían ser usados para dar propiedades funcionales a los alimentos que ayuden a mejorar el manejo en una producción animal.

Referencias bibliográficas

- AFIA, American Feed Industry Association. 2005. *Feed Manufacturing Technology*. AFIA. United States of America.
- Aldrich, C.G., Merchen, N.R., Nelson, D., Barmore, J. 1995. The effect of roasting temperature applied to whole soybeans on site of digestion by steers: I. Organic matter, energy, fiber, and fatty acid digestion. *J. Anim. Sci.*, 73: 2120-2130.
- Aldrich, C.G, Merchen N.R., Parsons, C.M., Hussein, H.S., Ingram, S., Clodfelter, J.R. 1997. Assessment of postruminal amino acid digestibility of roasted and extruded whole soybeans with the precision-fed rooster assay. *J. Anim. Sci.*, 75: 3046-3051.
- Andrade, J.C., Mandarino, J.M.G., Kurosawa, L.E., Ida, E.I. 2015. The effect of thermal treatment of whole soybean flour on the conversion of isoflavones and inactivation of trypsin inhibitors. *Food Chem.*, 194: 1095-1101.
- Bach, K.E, Hedemann, M.S., Lærke, H.N. 2012. The role of carbohydrates in intestinal health of pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 173: 41–53.
- Badui, S.D. 2013. *Química de los Alimentos*. 6ª. ed. Pearson Educación. p. 61-71.
- Bird, A.R., Vuaran, M., Brown, I., Topping, D.L. 2007. Two high-amylose maize starches with different amounts of resistant starch vary in their effects on fermentation, tissue and digesta mass accretion and bacterial populations in the large bowel of pigs. *Br. J. Nutr.*, 97:134–144.
- Bokelman, G. E., Coble, K. F., Stark, C. R., Woodworth, J. C., Tokach, M. D., Jones, C. K. 2015. Evaluation of extreme thermal processing methods to improve nutrient utilization

- of low-energy diets for finishing pigs. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*: 1(7).
- Brent, C.T. 1986. Grain processing effects on starch utilization by ruminants. *J. Anim. Sci.*, 63:1649-1662.
- Brooks, P.H., Beal, J.D., Niven, S. 2001. Liquid feeding of pigs: potential for reducing environmental impact and improving productivity and food safety. *Recent Advances in Animal Nutrition in Australia*.
- Bouscher, S.E., Bill, J.D., Miller, L. 2014. *Method of Protecting Active Ingredients from degradation during pelleting*. US 20140037709 A1. US Patent and Trademark office. USA
- Camean, A. M., Repetto, M. 2012. Tóxicos formados durante el procesado, preparación y almacenamiento de los alimentos. *Toxicología Alimentaria*. Ediciones Díaz de Santos. p. 493-516.
- Canibe, N., Jensen, B.B. 2003. Fermented and nonfermented liquid feed to growing pigs: Effect on aspects of gastrointestinal ecology and growth performance. *J. Anim. Sci.*, 81: 2019-2031.
- Chamberlain, C.C., Meeimann, G.M., Lidvall, E.R., Gamble, C.T. 1967. Effects of feed processing method and diet form on the incidence of esophagogastric ulcers in swine. *J. Anim. Sci.*, 26: 72-75.
- Chávez D., E. 2011. *Alimento en pasta para cerdos*. MX 327813 B. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Gaceta de la Propiedad Industrial.
- Costa, P.M., Jensen, A. H., Harmon, B.G., Norton, H.W. 1976. The Effects of roasting and roasting temperatures on the nutritive value of corn for swine. *J. Anim. Sci.*, 42:365-374.
- Cochrane, R. A., Schumacher, L. L., Dritz, S.S., Woodworth, J.C. 2015. Effect of thermal mitigation on porcine epidemic diarrhea virus (PEDV)-contaminated feed. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*: 1(7).
- De Jong, J A., Tokach, M. D., McKinney, L. J., Rouchey, J. M., Goodband, R. D., Nelssen, J. L., Dritz, S. S. 2012. Effects of corn particle size, complete diet grinding, and diet form on finishing pig growth performance, caloric efficiency, carcass characteristics, and economics. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*. 1 (10). p. 315-324.
- Dozier, W. A., and J. B. Hess. 2011. *Soybean and nutrition*. *Intech.*,:111-124.
- Felsman, R.J., Harvey, R.W., Linnerud, A.C., Smith, F.H. 1976. . *J. Anim. Sci.*, 42: 476-480.
- Fuentes-Zaragoza, E., Sánchez-Zapata, E., Sendra, E., Sayas, E., Navarro, C., Fernández-López, J., Pérez-Alvarez, J.A., 2011. Resistant starch as prebiotic: a review. *Starch*, 63: 406–415.

- Gaspar, L.E.B., Chávez, D.E., Mariscal, L.G., Corona, L.G., Pérez, A.M.A., Pettigrew, J.E., Cuarón, I.J.A. 2015. Maíz hidrolizado alcalinamente en dietas para cerdos ofrecidas en forma de harina o pasta. XVII Congreso Bienal AMENA.
- Giuberti, G., Gallo, A., Masoero, F., Ferraretto, L. F., Hoffman, P. C., Shaver, R. D. 2013. Factors affecting starch utilization in large animal food production system: A review. *Starch*, 66: 72-90.
- Gorrachategui, M.G. 2010. Efecto del tratamiento de las materias primas sobre su valor nutricional. Memorias del XXVI Curso de Especialización FEDNA. España. p 51-113.
- Grieshop, C.M, Reese, D.E., Fahey, G.C. 2001. Nonstarch polysaccharides and oligosaccharides in swine nutrition. Swine nutrition. Segunda Edición. CRC Press.
- Hancock, J.D., Behnke, K.C. 2001. Use of ingredient and diet processing technologies (grinding, mixing, pelleting, and extruding) to produce quality feeds for pigs. Swine nutrition. Segunda Edición. Florida. CRC Press.
- Haenen, D., Zhang, J., Souza da Silva, C., Bosch, G., Meer, I. M., Arkel, J., Borne, J. J., Perez, O., Smidt, H., Müller, B. K., Hooiveld, G.J. 2013. A diet high in resistant starch modulates microbiota composition, SCFA concentrations, and gene expression in pig intestine. *J Nutr.*, 143 (3): 274–283.
- Hirahara, K. 1980. Continuous pressure cooking apparatus. *US4181072A*. US Patent and Trademark Office. USA.
- Hogberg, M. 1981. Physical forms of feed-feed processing for swine. Pork Industry Handbook. Extension Bulletin E-1464.
- Hoseney, R.C. 1998. Principles of cereal science and technology. 2nd ed. American Association of Cereal Chemists.
- Hussein, H.S., Demjanec, B., Merchen, N.R., Aldrich, C.G. 1995. Effect of roasting on site and extent of digestion of soybean meal by sheep: II. Digestion of artifacts of heating. *J. Anim. Sci.*, 73: 835-842.
- Jensen, A.H., Becker, D.E. 1965. Effect of pelleting diets and dietary components on the performance of young pigs. *J. Anim. Sci.*, 24: 392-397.
- Jyothsna, E., Hymavathi, T.V. 2017. Resistant starch: Importance, categories, food sources and physiological effects. *J. Pharm & Phytochem.*, 6(2): 67-69
- Kim, I.H., Hancock, J.D., Burnham, L.L., Kennedy, G.A., Hines, R.H., Nichols, D.A. 1994. Processing procedures and feeding systems for sorghum-based diets given to lactating sows. Swine Day 1994. Kansas State University. pp 27-30.
- Li, T.J., Huang, R.L., Wu, G.Y., Lin, Y.C., Jiang, Z.Y., Kong, X.F., Chu, W.Y., Zhang, Y.M., Kang, P., Hou, Z.P., Fan, M.Z., Liao, Y.P., Yin, Y.L. 2007. Growth performance and nitrogen metabolism in weaned pigs fed diets containing different sources of starch. *Livest. Sci.* 109: 73–76.

- Liu, Y., Chen, J., Luo, S., Li, C. 2017. Physicochemical and structural properties of pregelatinized starch prepared by improved extrusion cooking technology. *J. Carb. Pol.* 175 (1): 265-272.
- Lundblad, K.K., Hancock, J.D., Behnke, K.C., McKinney, L.J., Alavi, S., Prestlokken, E., Sorensen, M. 2012. Ileal digestibility of crude protein, amino acids, dry matter and phosphorous in pigs fed diets steam conditioned at low and high temperature, expander conditioned, or extruder processed. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 172(3): 237-241.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., Dunlap, P.V., Clark, D.P. 2009. Efecto de la temperatura sobre el crecimiento microbiano. Brock. *Biología de los microorganismos*, 12 edición. Pearson Educación.
- MacIsaac, J.L., Burgoyne, K.L., Anderson, D.M., Rathgeber, B.R. 2005. Roasted full-fat soybeans in starter, grower, and finisher diets for female broiler turkeys. *JAPR.*, 14: 116-121.
- Markussen, E., Borup, F., Simonsen, O., Markussen, E.K. 2013. Enzyme granules. *US 20130302469 A1*. US Patent and Trademark office. USA.
- Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D. 2003. Kinetics of thermal inactivation. Food process design. Marcel Dekker.
- Martinez-Montez, F. 2007. Method and apparatus for cooking particulate food material. *US20070082097A1*. US Patent and Trademark Office. Estados Unidos.
- Martínez-Bustos F., Martínez M., J., Sánchez S., F., Ruiz T., M. 2002. High pressure process and system for the production of fresh whole corn masa, nixtamalized whole corn flour, and derived products. *US 6387437 B1*. US Patent and Trademark Office. Estados Unidos.
- Medel, P., Salado, S., de Blas, J.C., Mateos, G.G. 1999. Processed cereals in diets for early-weaned piglets. *Anim. Feed Sci. and Tech.*, 82: 145-156.
- Mendoza, F.C. 1975. Method for obtaining nixtamalized flours. *US 3859452*. US Patent and Trademark Office. Estados Unidos.
- Miller, G. T. 2012. Swine feed efficiency: influence of pelleting. Iowa Pork Industry Center Fact Sheet 12. p.4.
- Noland, P. R., Campbell, D. R., Gage, R. K., Sharp, R. N., Johnson, Z. B. 1976. Evaluation of processed soybeans and grains in diets for young pigs. *J. Anim. Sci.*, 43: 763-769.
- Orias, F., Aldrich, C.G., Elizalde, J.C., Bauer, L.L., Merchen, N.R. 2002. The effects of dry extrusion temperature of whole soybeans on digestion of protein and amino acids by steers. *J. Anim. Sci.*, 80: 2493-2501.
- Raigond, P., Rajarathnam, E., Raigond, B. 2014. Resistant starch in food: a review. *J Sci Food Agric.*, 95: 1968–1978.

- Regmi, P.R., Van Kempen, T.A.T.G., Matte, J.J., Zijlstra, R.T. 2011. Starch with high amylose and low in vitro digestibility increases short-chain fatty acid absorption, reduces peak insulin secretion, and modulates incretin secretion in pigs. *J. of Nutr.*, 141: 398–405.
- Riaz, M.N. 2000. Extruders in food applications. Boca Raton: CRC Press.
- Skoch, E. R., Binder, S. F., Deyoe, C. W., Allee, G. L., Behnke, K. C. 1983. Effects of steam pelleting conditions and extrusion cooking on a swine diet containing wheat middlings. *J. Anim. Sci.*, 57: 929-935.
- Souza da Silva, C., Haenen, D., Koopmans, S. J., Hooiveld, G. J. 2014. Effects of resistant starch on behaviour, satiety-related hormones and metabolites in growing pigs. *Animal.*, 8(9): 1402-1411.
- Sun, T., Lærke, H.N., Jørgensen, H., Bach, K.K.E. 2006. The effect of extrusion cooking of different starch sources on the *in vitro* and *in vivo* digestibility in growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 131: 66–85.
- Svihus, B., Uhlen, A.K., Harstad, O.M., 2005. Effect of starch granule structure: associated components and processing on nutritive value of cereal starch: a review. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 122: 303–320.
- Tharanathan, R.N. 2005. Starch: value addition by modification. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 45: 371–384.
- Thea, J. C., Viksoe-Nielsen, A., Pettersson, D. 2016. Process for manufacturing a feed composition. *US 20160150808 A1*. US Patent and Trademark office.
- Wang, J.F., Zhu, Y.H., Li, D.F., Wang, M., Jensen, B.B. 2004. Effect of type and level of dietary fiber and starch on ileal and fecal microbial activity and short-chain fatty acid concentrations in growing pigs. *Anim. Sci.*, 76: 109–117.
- Williams, B.A., Verstegen, M.W.A., Tamminga, S. 2001. Fermentation in the large intestine of single-stomached animals and its relationship to animal health. *Nutr. Res. Rev.*, 14: 207–228.
- Woyengo, T. A., Beltranena, E., Zijlstra, R. T. 2014. Nonruminant Nutrition Symposium: Controlling feed cost by including alternative ingredients into pig diets: A review. *J. Anim. Sci.*, 92(4): 1293–1305.
- Zhu, L., Jones, C., Guo, Q., Lewis, L., Stark, C. R., Alavi, S. 2016. An evaluation of total starch and starch gelatinization methodologies in pelleted animal feed. *J. Anim. Sci.*, 94: 1501-1507.
- Zollitsch, W., Wetscherek, W., Lettner, F. 1993. Use of differently processed full-fat soybeans in a diet for pig fattening. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 41: 237-246.

CAPÍTULO 1. ELABORACIÓN DE PRUEBAS DE CONCEPTO CON CERDOS DE ENGORDA

1.1. RESUMEN

Con el objetivo de desarrollar recomendaciones sobre la formulación de dietas para cerdos con alimentación en pasta, se realizaron 3 experimentos: En el Experimento 1 se comparó la ganancia diaria de peso (GDP) y conversión alimenticia (CA) de cerdos de engorda alimentados con diferentes métodos de alimentación (harina, pellet, líquido y pasta) con dietas isocalóricas e isoproteicas. La alimentación en pasta obtuvo un mejor desempeño productivo que los otros tratamientos y se observó una diferencia significativa entre tratamientos ($P < 0.01$). En el Experimento 2 se evaluaron tres dietas con diferente energía metabolizable (3.1, 3.56 y 2.73 Mcal / kg) utilizando alimentación restringida (2 kg por día). A mayor ingesta energética se observó mayor ganancia de peso ($P < 0.01$). En el Experimento 3 se evaluaron tres dietas con diferente concentración de lisina total (0.8, 0.9 y 1.3%), y se midió la ganancia de peso, se observó que a mayor ingesta de lisina mayor ganancia de peso ($P < 0.01$). La alimentación en pasta mejora la ganancia de peso y eficiencia alimenticia, pero se debe considerar un aumento en la concentración de energía y lisina debido a que el consumo es menor en comparación a los métodos tradicionales de alimentación de cerdos.

1.2. ABSTRACT

With the aim of developing recommendations on the formulation of diets for pigs with paste feeding, 3 experiments were carried out: In Experiment 1, the daily weight gain (GDP) and feed conversion (CA) of fattening pigs fed with different feeding methods (flour, pellet, liquid and paste) with isocaloric and isoprotein diets. The paste feeding obtained a better productive performance than the other treatments and a significant difference was observed between treatments ($P < 0.01$). In Experiment 2, three diets with different metabolizable energy (3.1, 3.56 and 2.73 Mcal / kg) were evaluated using restricted feeding (2 kg per day). The higher the energy intake, the greater the weight gain ($P < 0.01$). In Experiment 3, three diets with different concentration of total lysine (0.8, 0.9 and 1.3%) were evaluated, and the weight gain was measured, it was observed that the higher the lysine intake, the greater the weight gain ($P < 0.01$). Paste

feeding improves weight gain and feed efficiency, but an increase in energy and lysine concentration should be considered due to lower consumption compared to traditional pig feeding methods.

1.3. INTRODUCCIÓN

La elaboración de alimentos para cerdos implica la correcta selección del método de elaboración del alimento y el balanceo de la dieta para una óptima producción a un mínimo costo. Una forma de elaborar alimentos es mediante el uso de tratamientos térmicos (TT), que son procedimientos de transferencia de calor, consistentes en la combinación adecuada de temperatura, tiempo, presión y humedad para modificar el valor nutritivo de los alimentos (Orias *et al.*, 2002).

Los TT logran la desnaturalización parcial de las proteínas (Lundblad *et al.*, 2012), inhibir factores antinutricionales sensibles a la temperatura (Andrade *et al.*, 2015;), gelatinizar el almidón (Giuberti *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2016) y mejorar la solubilidad de las fracciones de fibra (Hussein *et al.*, 1995), lo que hace a los alimentos más digestibles y sanos (Gorrachategui, 2010). En contraparte, cuando se usan temperaturas muy altas, se presentan reacciones de Maillard (Dozier y Hess, 2011), racemización de aminoácidos y la formación de isopéptidos (Camean y Repeto, 2012); dichas reacciones disminuyen la digestibilidad de las proteínas y dan lugar a la formación de compuestos mutagénicos o potencialmente carcinogénicos (Badui, 2013).

Para Gorrachategui (2010), el tratamiento térmico de los alimentos es considerado una vía tecnológica de “externalizar parte del proceso digestivo” consiguiendo aumentar la digestibilidad de los alimentos; sin embargo, para el uso rentable de los TT en la producción de alimentos para cerdos, se deben aprovechar las ventajas nutrimentales en la formulación de la dieta al mínimo costo, considerando la digestibilidad de los nutrientes en el balanceo, las propiedades funcionales de los alimentos obtenidas con el TT y las adaptaciones anatómo-fisiológicas que se desarrollarán con el alimento.

Existen en el mercado alimentos en papilla para lechones. Con el uso de alimentación en papilla Toplis *et al.* (1999) señalan una mejora en el consumo de alimento que se refleja en un mayor aumento de peso en las etapas tempranas de cerdos en crecimiento. Algunos autores han patentado fórmulas para producir alimentos en papilla, como es el caso de Li *et al.* (2006) (CN101176507A) que utilizan soya extrusionada como fuente principal de proteína. Pero la

alimentación en pasta propuesta por Agropecuaria FC se diferencia en el tratamiento térmico en condiciones alcalinas para producir la harina, que, a diferencia de las papillas comerciales, el almidón pregelatinizado de la alimentación en pasta permite retener mayor cantidad de agua, y mantener la forma pastosa sin separarse por más tiempo.

1.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de un método de formulación de raciones con alimentación en pasta se decidió realizar 3 experimentos: validar la idea de la empresa respecto al uso de su tecnología (Experimento 1), evaluar el efecto de la cantidad de energía consumida por el animal usando alimentación en pasta (Experimento 2) y evaluar el efecto del consumo de lisina en cerdos alimentados con pasta (Experimento 3).

Elaboración de la harina para pasta en la planta piloto

El proceso de producción de la harina para pasta protegido por Agropecuaria FC (patente MX 327813 B) se describe a continuación: Los granos limpios son alimentados a un cocedor continuo (Figura 5). El cocedor consiste en un cilindro con doble cuerpo, con un transportador helicoidal en el cuerpo interior; por el cuerpo exterior fluye vapor de agua que calienta el cilindro (2). En la entrada y salida del cocedor hay un alimentador rotatorio (8), diseñado para soportar altas presiones, que permite la entrada y salida del grano sin perder presión. El cilindro permite la inyección directa de vapor para subir la presión de operación hasta 2 kg/cm² y la temperatura hasta 140°C.

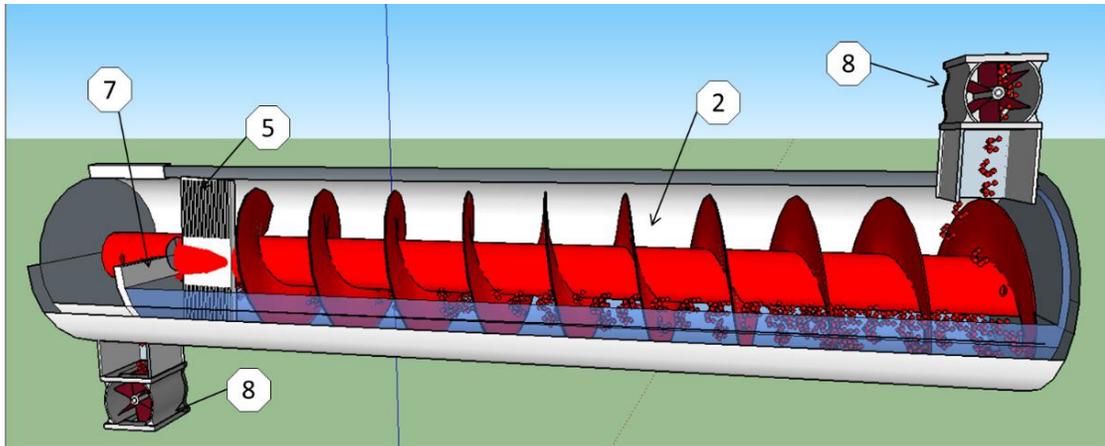


Figura 5 Diseño 3D del cocedor continuo por alta presión diseñado por Agropecuaria FC SA de CV.

Al salir del cocedor el grano entra en un enfriador continuo que alimenta un molino pulverizador para disminuir el tamaño de partícula (60% de partículas menores a 0.25 mm). La harina sale del molino a un sistema de secado por transporte neumático; el tiempo de retención se estima de 2 s, el sistema de secado tiene una capacidad para secar hasta 600 L de agua por hora. La harina seca entra a un proceso de enfriado por transporte neumático en donde se transporta con aire a temperatura ambiente a una tolva de almacenamiento. La harina seca y fría se mezcla con los demás ingredientes de la fórmula para producir un alimento balanceado (Figura 6), y en granja se mezcla el alimento seco con agua hasta lograr un porcentaje de humedad entre el 65 y el 75%, para formar un alimento con consistencia pastosa.

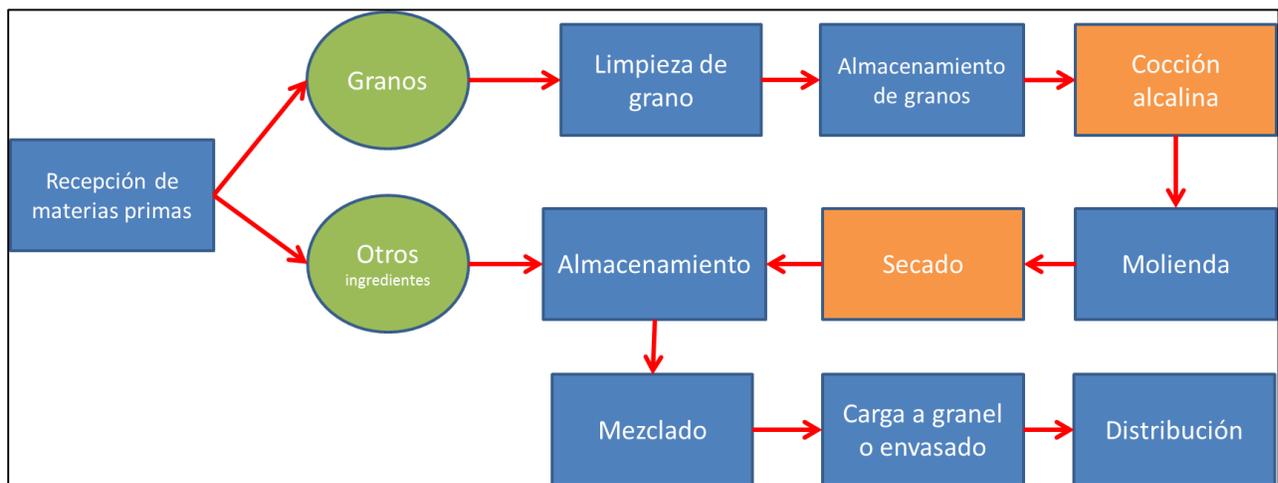


Figura 6 Diagrama de flujo para la producción de harina para pasta.

Experimento 1. Comparación entre diferentes formas de alimentación en cerdos de engorda.

Se seleccionaron 48 cerdos con peso vivo de 55kg (± 5 kg), híbridos Landrace \times Pietrain, los cuales se repartieron en cuatro unidades experimentales por tratamiento (tres animales por unidad experimental; 4 repeticiones) en corrales de 2.3 m \times 6.4 m, con un comedero y un bebedero tipo chupón (*nipple*) por corral. El agua se proporcionó a libre acceso y se permitió dos semanas de adaptación a la dieta, previo a realizar los registros. Durante el experimento se procuró no manipular a los animales más allá de lo requerido para el pesaje y el cuidado de su salud. Un alimento en pellet de la marca Purina para etapa de engorda (60 a 100 kg) se compró y con base en análisis proximal del pellet se balancearon tres dietas (Cuadro 4) para ser proporcionadas a libre acceso a los animales, una en harina, una dieta líquida y una dieta en pasta. Los alimentos se formularon para obtener la misma concentración de energía bruta y de proteína cruda. La dieta líquida fue mezclada en proporción 3 partes de agua por 1 parte de harina y la dieta en pasta fue mezclada en proporción 2.5 partes de agua por una parte de harina, siguiendo las indicaciones de la patente publicada por Agropecuaria FC SA de CV.

Cuadro 4 Composición de las dietas, experimento 1

	Harina kg/ton BF	Líquida kg/ton BF	Pasta kg/ton BF	Pellet comercial
Maíz molido	713	713		
Harina nixtamal			713	
Soya, pasta, extracción con solvente	110	110	110	
Trigo, salvado	140	140	140	
L-Treonina	1	1	1	
DL Metionina	1	1	1	
L-Lisina HCL	4	4	4	
Bentonita sódica	4	4	4	
Premezcla de vitaminas y microminerales	1	1	1	
Sal terrestre (cloruro de sodio)	5	5	5	
Piedra caliza	9	9	9	
Ortofosfato	12	12	12	
Energía Bruta Mcal/kg	3.4	3.4	3.4	3.4
Proteína Cruda %	14	14	13.9	14
Extracto Etéreo %	3.6	3.6	3.2	2
Cenizas %	5.5	5.5	5.1	9
Extracto Libre de Nitrógeno %	63	63	64	67
Humedad %	11.2	11.2	10	10

A cada tratamiento se realizó un análisis proximal con los siguientes métodos de referencia: Proteína bruta (PC) AOAC 2015, 2001.11, Extracto etéreo (EE) AOAC 2015, 920.39, Fibra bruta (FC) AOAC 2015 962.09, Extracto libre de nitrógeno NMX-Y-097-1974, cenizas AOAC 2015, 942.05 y Humedad AOAC 2015, 934.01. La energía bruta del alimento se calculó usando como referencia la norma NOM-051-SCFI/SSA1-2010.

Los cerdos fueron pesados semanalmente, se calculó la ganancia diaria de peso (GDP) y la conversión alimenticia (CA), se realizó un análisis de varianza y comparación de medias con el método de Duncan, con un nivel de confianza del 95% usando el procedimiento lineal general (GLM) del paquete estadístico SAS.

Experimento 2. Uso de la energía en dietas con alimentación en pasta

Se seleccionaron 36 cerdos macho castrados (Landrace × Pietrain), con peso vivo 51.5 kg (± 3.5 kg). Los animales se repartieron en 12 corrales idénticos al experimento 1. Se balancearon tres dietas con diferentes niveles de energía (Cuadro 5) para ser proporcionadas mediante alimentación restringida (2 kg de materia seca por animal por día) usando alimentación en pasta. Las dietas contenían el mismo porcentaje de proteína cruda, pero variaron en el contenido de aminoácidos totales, se utilizó la misma pre-mezcla mineral y vitamínica en las tres dietas.

Las tres dietas se diluyeron en agua en una proporción de 2.5 kg de agua por cada 1 kilogramo de alimento. A cada alimento se le realizó un análisis proximal; el perfil de minerales, aminoácidos y energía metabolizable de los alimentos se estimó con base en las tablas de composición de los ingredientes para alimento de FEDNA 2019 (de Blas *et al.*, 2019); la energía bruta del alimento se calculó usando como referencia la norma NOM-051-SCFI/SSA1-2010.

Los cerdos fueron alimentados tres veces al día: 8 am, 12 pm, y 5 pm. Se dieron dos semanas de adaptación a las dietas. Se registró el consumo diario de alimento, el pesado de los animales se realizó cada siete días. Al final de la engorda se seleccionó un cerdo de cada tratamiento para medir grasa dorsal subcutánea.

Cuadro 5 Perfil nutrimental de las dietas, Experimento 2.

Tratamientos		F0	F1	F2
Energía metabolizable*	Mcal/kg	3.1	3.56	2.73
Extracto etéreo	%	3.23	10.45	3.03
Fibra cruda	%	4.99	2.63	9.81
Proteína Cruda	%	16.37	16.18	16.33
Extracto libre de nitrógeno	%	58.06	59.68	46.38
Cenizas	%	4.57	5.01	5.98
Calcio total*	%	1.40	1.48	1.33
Fósforo total*	%	0.66	0.58	0.59
Fenilalanina total*	%	0.66	0.72	0.56
Valina total*	%	0.77	0.88	0.66
Treonina total*	%	0.35	0.52	0.32
Isoleucina total*	%	0.58	0.68	0.51
Metionina total*	%	0.36	0.25	0.35
Histidina total*	%	0.42	0.44	0.36
Arginina total*	%	0.00	0.00	0.00
Leucina total*	%	1.40	1.59	1.17
Lisina total*	%	0.79	0.93	0.71

**Calculado con base en las tablas FEDNA 2019*

Para el análisis estadístico de los resultados se diseñó un arreglo completamente al azar de tres niveles (Factor: Concentración de Energía, Niveles: F0 = 3.1 Mcal/kg MS, F1= 3.56 Mcal/kg MS, F2= 2.73 Mcal/kg MS). Con los datos de consumo y los del aumento de peso diario, se calculó la conversión alimenticia y se realizó un análisis de varianza, se calcularon las medias de mínimos cuadrados y se realizó una comparación de medias con el método de Tukey con un α de 0.05 usando el procedimiento lineal general (GLM) del paquete estadístico SAS.

Experimento 3. Uso de la proteína en dietas con alimentación en pasta

Treinta y seis cerdos machos castrados (Landrace \times Pietrain), con peso de 55kg (\pm 5kg), se repartieron en 12 unidades experimentales. Se balancearon tres dietas con diferentes niveles de Lisina (Cuadro 6) para ser proporcionadas mediante alimentación restringida (2 kg de materia seca por animal por día) usando alimentación en pasta. Las dietas contenían el mismo porcentaje de proteína cruda, y energía bruta, pero con diferente contenido de aminoácidos totales. Se utilizó la

misma pre-mezcla mineral y vitamínica en las tres dietas. Los alimentos se diluyeron en agua en una proporción de 2.5 kg de agua por cada 1 kilogramo de alimento seco.

Cuadro 6 Composición y perfil nutrimental de las dietas, Experimento 3.

Tratamiento	T1 kg/ton BF	T2 kg/ton BF	T3 kg/ton BF
Harina Nixtamal	700	700	700
Soya, Pasta, extracción con solvente	178	177	171
Trigo, Salvado	60	60	60
L-LISINA HCL	2	3	9
Bentonita sódica	4	4	4
Premezcla de vitaminas y microminerales	1	1	1
Sal terrestre (cloruro de sodio)	5	5	5
Piedra caliza	8	8	8
Ortofosfato	12	12	12
Energía Bruta Mcal/kg	3.65	3.65	3.65
Proteína Cruda %	15.2	15.3	15.6
Extracto Etéreo %	6.7	6.7	6.6
Cenizas %	5.3	5.3	5.4
Extracto Libre de nitrógeno %	61	61	60
Humedad	11.2	11.1	11.1
Lisina total %	0.71	0.8	1.3

Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó un diseño completamente al azar de un factor con tres niveles (Factor: Concentración de Lisina, Niveles: T1 = 0.71% MS, T2= 0.8% MS, T3= 1.3% MS). Con los datos de consumo y los del aumento de peso se calculó la conversión alimenticia y se realizó un análisis de varianza para las variables de respuesta. Una diferencia significativa fue declarada cuando $P < 0.05$, se calcularon las medias de mínimos cuadrados y se realizó una comparación de medias con el método de Tukey con un nivel de confianza del 95%.

1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tipo de alimentación proporcionada al cerdo afectó la ganancia diaria de peso ($P < 0.01$) y la conversión alimenticia ($P < 0.01$), los tratamientos con mayor ganancia diaria de peso fueron

las dietas en pellet y pasta, con 0.84 y 0.82 kg/d respectivamente, además la curva de crecimiento es similar en ambos casos (Cuadro 7).

Cuadro 7 Comportamiento productivo observado, Experimento 1

	Pellet	Harina	Líquido	Pasta
Peso entrada (kg)	55.00	49.00	46.00	54.00
Peso de salida (kg)	96.00	84.00	79.00	94.00
GDP (kg/d)	0.84 a	0.71 b	0.67 b	0.82 a
CA (kg/kg)	5.88 b	4.88 b	2.95 a	2.47 a
Consumo (kg/d)	4.94	3.46	1.98	2.03

GDP = ganancia diaria de peso, CA = conversión alimenticia

La CA de las dietas líquida (2.95) y pasta (2.47) fue menor al de las dietas en harina (4.88) y pellet (5.88), debido a que el consumo de alimento de las dietas secas es alto, siendo la cantidad de alimento desperdiciado la principal causa del consumo elevado. La dieta en pasta obtuvo la menor conversión alimenticia (CA= 2.47); se observó que la cantidad de alimento desperdiciado en los corrales con dieta en pasta era mínima.

La GDP con la dieta en pasta es similar a la obtenida con una dieta en pellet y mejor que una dieta en harina (Figura 7), lo que pudiera estar relacionado con el tratamiento térmico que se le da al grano con el que se elabora la pasta y con el aumento de la superficie de contacto en comparación con las dietas en pellet y en harina. Esto implicaría que la alimentación en pasta mejora la digestibilidad del alimento, ya que los tratamientos térmicos permiten una mayor digestibilidad a consecuencia de la gelatinización del almidón, desnaturalización de proteínas, inhibición de factores antinutricionales sensibles a la temperatura y reducción de la carga microbiana (Archer *et al.*, 1998).

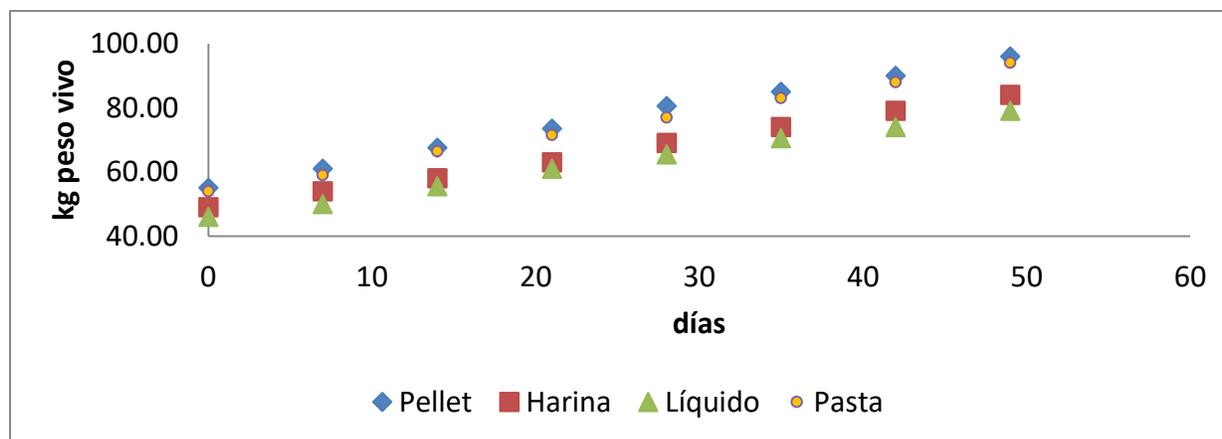


Figura 7 Curva de crecimiento, Experimento 1.

La mayor digestibilidad puede ser consecuencia de adaptaciones fisiológicas debido a la dieta. Vicente *et al.* (2009) reportaron un aumento sobre el tamaño de las microvellosidades de lechones alimentados con cereales cocidos. Li *et al.* (1991) observaron que cerdos alimentados bajo la madre con dietas a base de soya extrudida tuvieron mayor tamaño de microvellosidades intestinales y mejor adaptación a la dieta al destete, debido a un aumento en superficie de digestión y absorción de los alimentos. En cerdos destetados los alimentos tratados con calor mejoran la eficiencia alimenticia (Medel *et al.*, 1999; Ulgheri *et al.*, 2010), debido a una mayor absorción de almidón en el intestino (Medel *et al.*, 2004; Mateos *et al.*, 2006).

En cerdos mayores a 30 kg, el uso de ingredientes con alta digestibilidad ileal es menos importante que en lechones, debido a que el tamaño del colon se incrementa, y por consecuencia la actividad fermentativa toma un rol más importante; más del 20% de los requerimientos de energía del cerdo en crecimiento son aportados por ácidos grasos volátiles (Kennelly *et al.*, 1981; Yen *et al.*, 1999)

En el Experimento 2 se observó que el consumo de energía metabolizable en el rango de 2.73 a 3.56 Mcal/kg materia seca tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la ganancia diaria de peso ($P < 0.01$) en dietas con alimentación en pasta. A pesar de que los animales del tratamiento F2 tienen un mayor peso inicial, al final de la engorda los tres tratamientos tuvieron pesos similares (Figura 8).

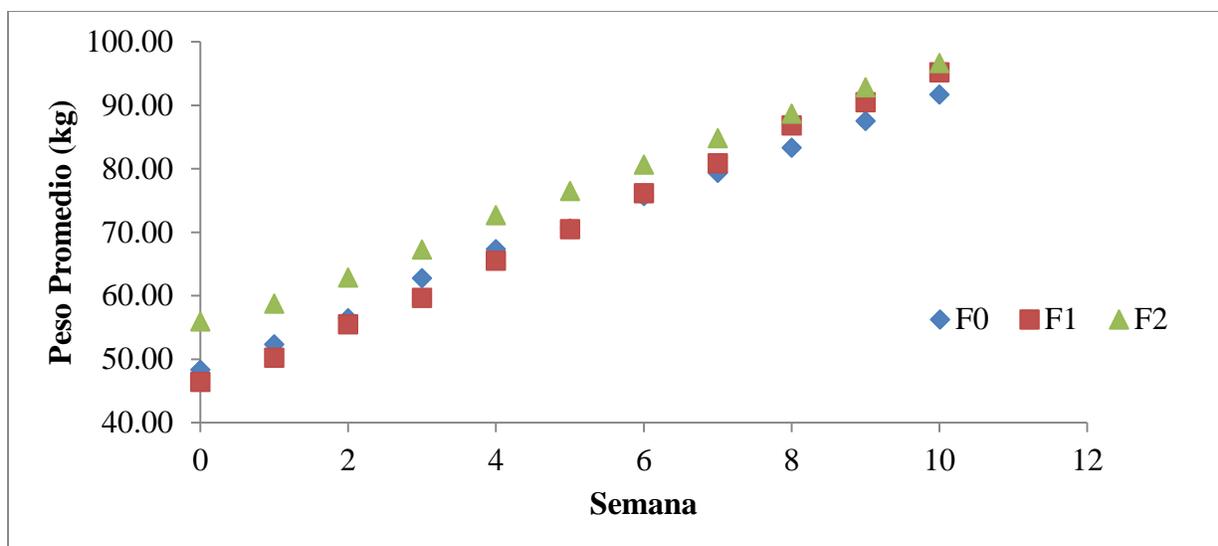


Figura 8 Curva de crecimiento, Experimento 3. Utilizando 3 concentraciones diferentes de energía metabolizable con dietas restringidas. F0=3.1 Mcal/kg, F1= 3.57 Mcal/kg, F2=2.73 Mcal/kg

Al graficar la ganancia diaria de peso promedio contra la cantidad de energía metabolizable consumida por el animal por día (Figura 9), se puede observar que existe una tendencia clara y positiva, en donde a mayor cantidad de energía consumida, mayor es la ganancia diaria de peso. Mediante una comparación de medias por el método de Tukey, se identificó que el tratamiento con mejor ganancia diaria de peso es el tratamiento que aporta mayor cantidad de energía por kilogramo de materia seca (F1=3.54 Mcal/kg).

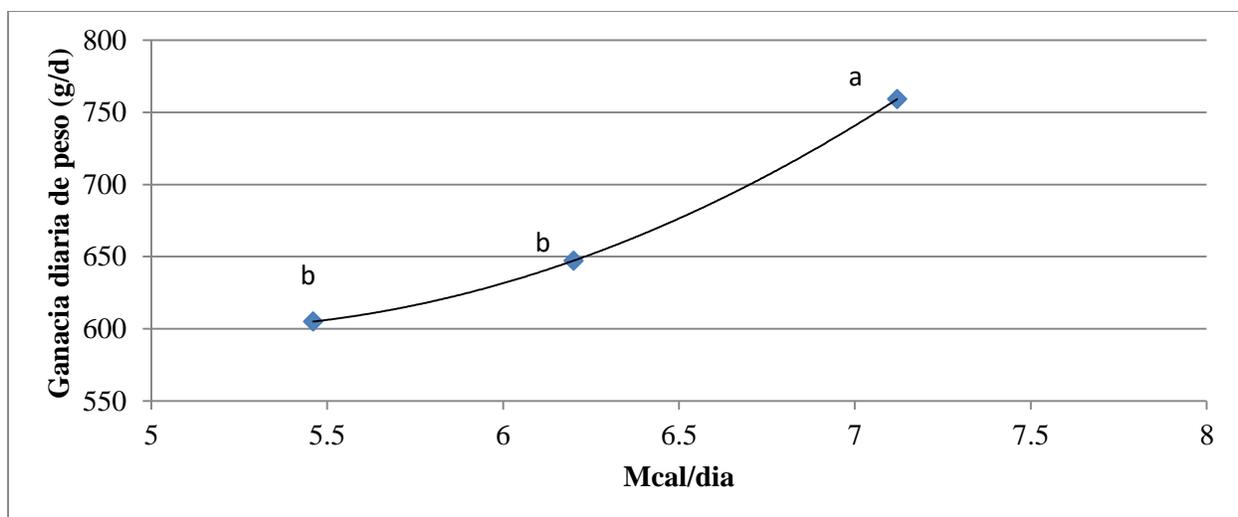


Figura 9 Ganancia diaria de peso, Experimento 2. Medias de mínimos cuadrados (Ls-Means), Prueba de medias por método de Tukey, tratamientos con letra diferente tienen efecto diferente.

La dieta que obtuvo mejores resultados (F1) aporta tan sólo el 86.1% de la energía recomendada por el NRC (2012) pero mantuvo aumentos de peso similares a lo esperado; esto puede deberse a que el tratamiento térmico mejoró la biodisponibilidad de los nutrientes haciéndolos más digeribles en comparación a lo reportado en las tablas de FEDNA (de Blas *et al.*, 2019).

De comprobarse una mejora en la digestibilidad de la energía, la alimentación en pasta sería especialmente útil en dietas para destete, para prevenir la diarrea postdestete y mantener un consumo elevado en lechones, es necesario que la alimentación del lechón tenga una alta densidad nutricional y contenga ingredientes altamente digeribles (Maxwell y Carter, 2001). La alta densidad energética que demanda el lechón no puede lograrse sólo con grasa añadida, ya que la capacidad del lechón para digerir grasa vegetal es limitada (Hanson *et al.*, 2016), por consecuencia, el requerimiento de energía de lechones destetados debe completarse con el uso de carbohidratos de fácil digestión. La alimentación en pasta podría utilizarse para cumplir con la demanda de energía disminuyendo la grasa añadida.

Se seleccionó un animal de cada unidad experimental para medir su grasa dorsal, y no se observó diferencia significativa entre tratamientos. En todos los cerdos analizados, la grasa dorsal fue menor a 1 cm en promedio (Figura 10). La poca grasa dorsal puede deberse a que se alimentó

a los animales con poca energía, y la energía consumida se aprovechó para actividades distintas a la síntesis de tejido adiposo. Sin embargo, debido al tamaño de la muestra no es posible señalar si existe efecto sobre la calidad de la canal, por lo que se recomienda una investigación más profunda en este tema. Gaspar *et al.*, 2015) observaron una mayor digestibilidad de la energía del 8% respecto a la dieta en harina y un aumento de la grasa dorsal del 8.7%, lo que indica que debe considerarse la mejora en la digestibilidad de la energía para la formulación de dietas a fin de no tener exceso de energía que engrase la canal.



Figura 10 Fotografías de la canal, Experimento 2.

Cuando la mejora en la digestibilidad no es tomada en cuenta en la formulación del alimento puede desencadenar adaptaciones fisiológicas no deseadas. Zolitch *et al.* (1993) reportaron que los cerdos alimentados con alimentos tostados o extrudidos presentan mayor grasa dorsal que aquellos alimentados con alimentos crudos, lo que sugiere la posibilidad de utilizar los tratamientos térmicos de los alimentos como una estrategia para disminuir costos, aprovechando la mejora en la digestibilidad para balancear raciones con menos energía bruta pero con igual

energía metabolizable que con una dieta con ingredientes crudos. De igual manera, Chamberlain *et al.* (1967) encontraron un incremento en la aparición de úlceras gástricas en cerdos alimentados con alimentos peletizados, en comparación con dietas sin tratamiento térmico, lo que pudiera sugerir que el incremento en la digestibilidad del almidón y las proteínas debe ser acompañado de un incremento en el nivel de fibra de la dieta para prevenir problemas gástricos. Sin embargo, un incremento en los niveles de fibra de la dieta trae consigo un incremento en el tamaño y peso de las vísceras del animal (Agyekum y Nyachoti, 2017), disminuyendo el porcentaje de rendimiento de la canal.

El consumo de lisina tiene un efecto significativo sobre la ganancia diaria de peso ($P < 0.01$). En el experimento 3 se observa que el aumento de peso diario es mayor conforme aumenta la concentración de lisina en el alimento (Figura 11). El tratamiento con mayor ganancia diaria de peso es el tratamiento que aporta mayor cantidad de lisina por kilogramo de materia seca (T3=1.3%).

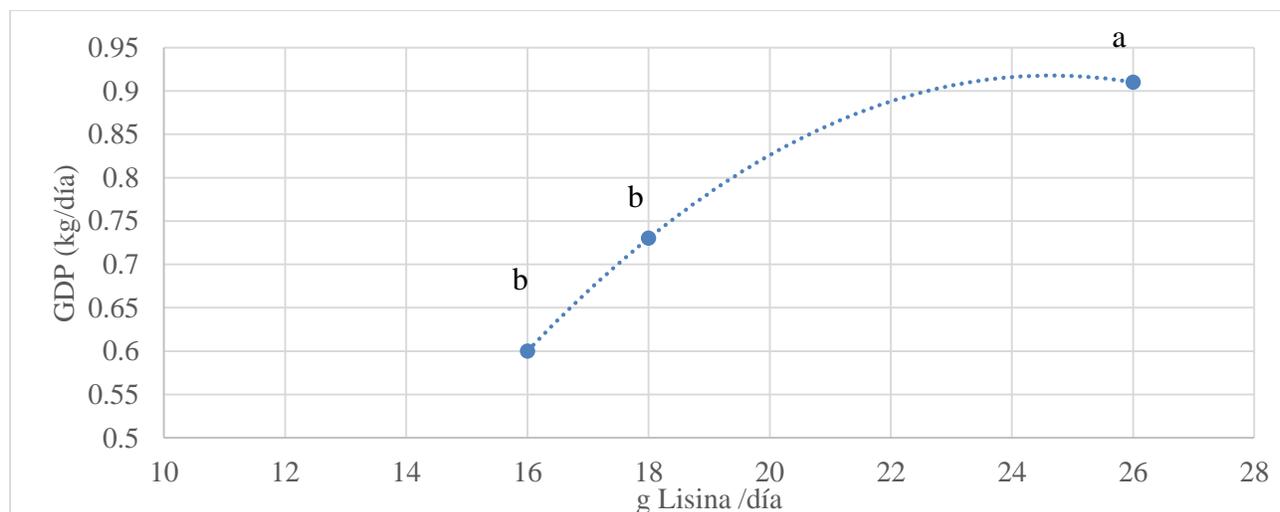


Figura 11 Efecto de lisina sobre ganancia diaria de peso (GDP), Experimento 3. *Medias de mínimos cuadrados (Ls-Means), Comparación de medias por método de Tukey, tratamientos con letra diferente tienen efecto diferente.*

Los resultados de los tres experimentos confirman las observaciones del estudio realizado en el INIFAP por Gaspar *et al.* (2015) respecto a la mejora de la ganancia diaria de peso, pero no coincide con lo reportado respecto al consumo de alimento. Gaspar *et al.* (2015) observaron que

la alimentación en pasta mejora la conversión alimenticia, y digestibilidad del alimento (Cuadro 8), pero aumenta el consumo de alimento.

Cuadro 8 Digestibilidad aparente dietas en pasta maíz y soya

	Digestibilidad aparente (%)
Proteína	85
Energía	90
Almidón	99
Calcio	75
Fósforo	38

La diferencia con los estudios de Gaspar son que en el INIFAP se utilizaron jaulas individuales y se midió consumo verdadero, mientras que en el presente experimento se utilizaron corrales de engorda con confinamiento compartido y se midió cantidad de alimento ofrecido, por lo que la cantidad reportada y utilizada para la eficiencia alimenticia incluye el desperdicio de alimento. Se observó también que la cantidad de agua y el mezclado son muy importantes para lograr una pasta homogénea y que no se derrame en comedero. La viscosidad ideal para lograr este propósito son 2400 cP pequeños errores al mezclar traen por consecuencia que la pasta no tenga la consistencia deseada. Se observó también que la pasta remanente en los comederos se fermenta, por lo que si no se tiene limpieza de los comederos se pudieran desencadenar problemas infecciosos debido a la fermentación no controlada.

1.6. CONCLUSIONES

El tipo de alimentación afecta el comportamiento productivo de los cerdos: la alimentación en pasta mejora la ganancia de peso y eficiencia alimenticia en comparación a los métodos tradicionales de alimentación de cerdos. El consumo de energía y lisina tienen un efecto significativo sobre la ganancia diaria de peso en cerdos alimentados con dietas en pasta; a mayor concentración se observó mejor comportamiento productivo.

Con base en lo observado en los tres experimentos se hacen las siguientes recomendaciones para la formulación de raciones:

Considerar la digestibilidad de nutrientes reportada por el INIFAP (Gaspar *et al.*, 2015) en dietas con maíz / soya con alimentación en pasta.

Considerar una disminución del 10% en el consumo de alimento respecto a las recomendaciones del NRC (2012) dado que el volumen del alimento incrementa 3 veces con la presentación en pasta y el estómago de los cerdos tiene una limitante en cuanto a su capacidad volumétrica, lo que pudiera limitar el consumo.

Uso de acidificante en el alimento para reducir el pH a 4.5 y evitar fermentaciones no deseadas en tubería y comedero.

Realizar más investigación sobre el efecto del tratamiento térmico sobre la biodisponibilidad y digestibilidad ileal de los nutrientes; y sobre el consumo voluntario de alimento, en las diferentes etapas de crecimiento del cerdo.

1.7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, J.C., Mandarino, J.M.G., Kurosawa, L.E., Ida, E.I. 2015. The effect of thermal treatment of whole soybean flour on the conversion of isoflavones and inactivation of trypsin inhibitors. *Food Chem.*, 194:1095-1101.
- Agyekum, A.K., Nyachoti, C.M. 2017. Nutritional and metabolic consequences of feeding high-fiber diets to swine: a review. *Anim. Nutr. and Feed Sci.*, 3:716-725.
- AOAC, Association of Analytical Communities International. 2015. Official methods of analysis. 17th ed. AOAC.
- Archer, J., Jervis, E.T., Bird, J., Gaze, J.E. 1998. Heat resistance of salmonella weltevreden in low-moisture environments. *J. of Food Prot.*, 61(8): 969-973.
- Badui, S. D. 2013. Química de los Alimentos. 6ª. ed. Pearson Educación. p. 61-71.
- Camean, A. M., Repetto, M. 2012. Tóxicos formados durante el procesado, preparación y almacenamiento de los alimentos. Toxicología Alimentaria. Ediciones Díaz de Santos. p 493-516.

- Chamberlain, C.C., G.M. Meeimán, E.R. Lidvall, C.T. Gamble. 1967. Effects of feed processing method and diet form on the incidence of esophagogastric ulcers in swine. *J. Anim. Sci.* 26: 72-75.
- de Blas, C., García-Rebollar, P., Gorrachategui, M., Mateos, G.G. 2019. Tablas FEDNA de composición y valor nutritivo de alimentos para la fabricación de piensos compuestos. 4ª edición. Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. p. 604.
- Dozier, W. A., Hess, J. B. 2011. Soybean and nutrition. Intech. p.111-124.
- Gaspar L.E.B., Chávez, D.E., Mariscal, L.G., Corona, L.G., Pérez, A.M.A., Pettigrew, J.E., Cuarón, I.J.A. 2015. Maíz hidrolizado alcalinamente en dietas para cerdos ofrecidas en forma de harina o pasta. XVII Congreso Bienal AMENA.
- Giuberti G., Gallo, A., Masoero, F., Ferraretto, L. F., Hoffman, P. C., Shaver, R. D. 2013. Factors affecting starch utilization in large animal food production system: A review. *Starch*, 66:72-90.
- Gorrachategui M., G. 2010. Efecto del tratamiento de las materias primas sobre su valor nutricional. Memorias del XXVI Curso de Especialización FEDNA. España. p. 51-113.
- Hanson, A.R., Urriola, P.E., Wang, L., Johnston, L.J., Chen, C., Shurson, G.C. 2016. Dietary Peroxidized maize oil affects the growth performance and antioxidant status of nursery pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 216: 215-261.
- Hussein, H. S., Demjanec, B., Merchen, N. R., Aldrich, C. G. 1995. Effect of roasting on site and extent of digestion of soybean meal by sheep: II. Digestion of artifacts of heating. *J. Anim. Sci.*, 73: 835-842.
- Kennelly, J.J., Aherene, F.X., Sauer, W.C. 1981. Volatile fatty acid production in the hindgut of swine. *Can. J. Anim. Sci.*, 61: 349-361.
- Li, D.F., Nelsen, J.L., Reddy, P.G., Blecha, F., Klemm, R.D., Giesting, D.W. Hancock, J.D., Alle, G.L. Goodband, R.D. 1991. Measuring suitability of soybean products for early-weaned pigs with immunological criteria. *J. Anim Sci.*, 69: 3299-3307.
- Li, Z., Ren, Y., Chen, J., Andong, Y. 2006. Liquid condition feedstuff and preparation method thereof. China National Intellectual Property Administration (CNIPA) Trademark Office. China
- Lundblad, K.K., Hancock, J.D., Behnke, K.C., McKinney, L.J., Alavi, S., Prestlokken, E., M Sorensen. 2012. Ileal digestibility of crude protein, amino acids, dry matter and phosphorous in pigs fed diets steam conditioned at low and high temperature, expander conditioned or extruder processed. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 172: 237-241.
- Mateos, G.G., López, E., Latorre, M.A., Vicente, B., Lázaro, R.P. 2006. The effect of inclusion of oat hulls in piglet diets base on raw or cooked rice and maize. *Anim. Feed Sci. Tech.*, 135: 100-112.

- Maxwell, C.V., Carter, S.D. 2001. Feeding the weaned pig. *Swine Nutrition*. Lewis A.J., Southern L.L. (ed). CRC press. Pp 691-715.
- Medel, P., Salado S., de Blas, J.C., Mateos, G.G. 1999. Processed cereals in diets for early-weaned piglets. *Anim. Feed Sci. Tech.*, 82: 145-156.
- Medel, P., Latorre, M.A., de Blas, J.C., Lázaro, R., Mateos, G.G. 2004. Heat processing of cereals in mash or pellet diets for young pigs. *Anim. Feed Sci. Tech.*, 113: 127-140.
- NMX-Y-097-1974 (Norma Mexicana). 1974. Determinación del extracto libre de nitrógeno en alimentos para animales. México.
- NOM-051-SCFI/SSA1-2010 (Norma Oficial Mexicana). 2010. Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados -Información comercial y sanitaria. México.
- NRC (National Research Council). 2012. Nutrient requirements of Swine. Eleventh Revised edition. National Academic Press.
- Orias, F., Aldrich, C. G., Elizalde, J. C., Bauer, L. L., Merchen, N. R. 2002. The effects of dry extrusion temperature of whole soybeans on digestion of protein and amino acids by steers. *J. Anim. Sci.*, 80: 2493-2501.
- Toplis, P., Blanchard, P.J., Miller, H.M. 1999. Creep feed offered as a gruel prior to weaning enhances performance of weaned piglets. *Manipulating Pig Production VII*. Australasian Pig Science Association. Australia. p.129
- Ulgheri, C., Grilli, E., Rossi, F., Piva, G. 2010. Effect of hydrothermally processed cereals on the performance of weaned piglets. *Livestock Sci.*, 134:166-168.
- Vicente, B., Valencia, D.G., Serrano, M.P., Lázaro, R., Mateos, G. 2009. Effects of feeding rice and the degree of starch gelatinization of rice on nutrient digestibility and ileal morphology of young pigs. *Brit. J. of Nutr.*, 101:1278-1281.
- Yen, J.T., Nienaber, J.A., Hill, D.A., Pond, W.G. 1999. Potential contribution of absorbed volatile fatty acids to whole-animal energy requirement in conscious swine. *J Anim Sci.*, 69 (5): 2001-2012.
- Zhu, L., Jones, C., Guo, Q., Lewis, L., Stark, C. R., Alavi, S. 2016. An evaluation of total starch and starch gelatinization methodologies in pelleted animal feed. *J. Anim. Sci.*, 94:1501-1507.
- Zolitch, W., Wetscherek, W., Lettner, F. 1993. Use of differently processed full-fat soybeans in a diet for pig fattening. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 41: 237-246.

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DE MODELO MATEMÁTICO PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL ALIMENTO

2.1.RESUMEN

Con el objetivo de predecir el consumo de alimento durante la lactancia utilizando alimentación en pasta, se desarrolló y validó un modelo empírico dinámico. El modelo se desarrolló utilizando 56 cerdas híbridas Landrace × Large White alimentadas *ad libitum*. Con los datos consumo diario y número de lechones vivos, se construyó una regresión no lineal ($R^2 = 0.56$) minimizando la suma de cuadrados de los residuos mediante iteraciones por el método de reducción de gradiente generalizado (GRG no lineal). Se utilizó un factor de ajuste para ajustar las predicciones de alimentación de cada cerda, en función de los comentarios del operador sobre el comportamiento anterior de la cerda. Se utilizó un análisis de varianza para verificar la influencia del tamaño de la camada en la ingesta de alimento de los días 1-3 ($P < 0.01$), 1-6 ($P = 0.302$) y 1-21 ($P = 0.54$). El modelo utiliza la ingesta de alimento del día anterior para individualizar el consumo de alimento esperado para el día actual de cada cerda. El modelo fue validado usando datos de 15 cerdas, desarrolló una precisión del 73.5%, el 11.5% de sobreestimación y el 15% de subestimación. En conclusión, este modelo se puede utilizar para calcular la cantidad de alimento necesario para mezclar y entregar a cada cerda en una instalación sin falta o desperdicio de alimento. El tamaño de la camada tiene un efecto significativo en la ingesta de alimento los primeros 3 días después del parto, pero la variación individual reduce su influencia durante todo el período de lactancia.

2.2.ABSTRACT

In order to predict feed intake during lactation using paste feeding, a dynamic empirical model was developed and validated. The model was developed using 56 hybrid Landrace × Large White sows fed *ad libitum*. With the daily consumption data and the number of live piglets, a non-linear regression ($R^2 = 0.56$) was constructed, minimizing the sum of squares of the residues through iterations by the generalized gradient reduction method (non-linear GRG). An adjustment factor was used to adjust the feeding predictions for each sow, based on operator feedback on the sow's past behavior. An analysis of variance was used to verify the influence of litter size on feed

intake on days 1-3 ($P < 0.01$), 1-6 ($P = 0.302$) and 1-21 ($P = 0.54$). The model uses the feed intake of the previous day to individualize the expected feed intake for the current day of each sow. The model was validated using data from 15 sows, it developed a precision of 73.5%, 11.5% overestimation and 15% underestimation. In conclusion, this model can be used to calculate the amount of feed needed to mix and deliver to each sow in a facility without feed shortage or waste. Litter size has a significant effect on feed intake in the first 3 days after calving, but individual variation reduces its influence throughout the lactation period.

2.3.INTRODUCCIÓN

Los sistemas de alimentación húmeda requieren una mezcla con agua previa a su consumo, lo que los convierte en alimentos perecederos, por lo que utilizan modelos de predicción de ingesta de alimento para calcular la cantidad que se espera consuman los cerdos, a fin de evitar la falta o el desperdicio de alimento. El cálculo preciso es importante, debido a que el alimento húmedo tiene poca vida útil y debe ser utilizado ese mismo día, de lo contrario se fermenta y tendría que tirarse, aumentando el desperdicio. Por consecuencia, para la implementación en granja de la alimentación en pasta se requiere del desarrollo de un método para estimar el consumo de alimento.

El reto tecnológico es especialmente complicado en cerdas durante la lactancia, debido a que después del parto ocurren cambios dramáticos en los requerimientos de energía y proteínas en las cerdas lactantes, reflejados en su comportamiento de consumo de alimento (Feyera y Theil, 2017); cada cerda tiene un patrón de ingesta de alimento y requisitos nutricionales diferentes (Koketsu *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2001; Yohan *et al.*, 2018;); estas diferencias hacen necesario desarrollar un modelo dinámico ajustado al comportamiento individual para utilizar sistemas automáticos de distribución de alimentación de líquidos o pastas.

Los programas de alimentación individual pueden promover la ingesta de alimento y reducir la deficiencia de nutrientes durante la lactancia temprana (Pedersen *et al.*, 2016). La baja ingesta de alimento durante la lactancia afecta negativamente al rendimiento de la cerda y la camada (Salubo *et al.*, 2010) y por el contrario, una alta ingesta de alimento puede reducir la

presencia de problemas reproductivos, pérdida de tejido (Koketsu *et al.*, 1996) y aumentar el tamaño del peso de la camada (Eissen *et al.*, 2003).

Los modelos de predicción de la ingesta de alimento se pueden individualizar en función de las observaciones de comportamiento de consumo al día, haciendo que el modelo sea dinámico y flexible (Oltjen y Owens, 1987). Para lograrlo, es necesario seleccionar una medida que pueda indicar una sobreestimación o subestimación de la ingesta de alimento que permita ajustar la estimación al comportamiento individual. En la producción comercial de bovinos de carne, una medida que se utiliza para modificar la cantidad de alimento que se ofrece al ganado en el corral es el sistema de puntuación del comedero (Pritchard, 1993). Este sistema involucra un número asignado visualmente por una persona capacitada que representa la cantidad de alimento que queda en el comedero. Se utiliza para hacer coincidir la cantidad de alimento suministrado en el corral con la cantidad de alimento que el ganado puede consumir (Pritchard, 1993).

Se realizó un experimento con cerdas lactantes con el objetivo de desarrollar un modelo empírico dinámico que se pueda ajustar a las individualidades de cada cerda, en cualquier momento, en función de su comportamiento del día anterior; y utilizar la estimación de la ingesta de alimento en sistemas automáticos de distribución de alimento en forma de pasta.

2.4.MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en las instalaciones de maternidad de la granja experimental de la empresa Agropecuaria FC (Teotihuacan, México). Los procedimientos experimentales se realizaron de acuerdo con las recomendaciones de los Principios Rectores Internacionales para la Investigación Biomédica que Involucra a Animales (CIOMS, 2012), y observando los estándares de ética, bioseguridad y bienestar animal del Colegio de Postgraduados, México, bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999 (2001) para el uso de animales en experimentación.

Para calcular los estimadores necesarios para determinar el aumento de la ingesta de alimento, se colocaron en jaulas de maternidad a 56 cerdas F1 (50% Landrace × 50% Large White), de segundo y tercer parto, con peso vivo de 225 kg (± 25 kg), a las cuales se les proporcionó

alimento en pasta y agua *ad libitum*. No se ofreció alimentación a los lechones. Para validar el modelo desarrollado se utilizaron 15 cerdas más, las cuales fueron alimentadas utilizando el modelo dinámico desarrollado. Una vez más, no se proporcionó alimentación a los lechones. El alimento seco (Cuadro 9) se mezcló con agua en una proporción de 1: 2.3 para formar un fluido viscoso de consistencia pastosa (alimentación de pasta).

Cuadro 9 Composición de la dieta para desarrollo de modelo matemático

Ingrediente	% MS
Maíz nixtamalizado	55.00
Pasta de soya (44% PC)	24.80
Aceite de canola	1.00
Salvado de trigo	15.30
Sal (NaCl)	0.50
L-Lisina	0.7
DL-Metionina	0.03
L-Treonina	0.07
Premezcla de Vitaminas	0.10
Piedra caliza	1.00
Ortofosfato	1.50
Oxido de zinc	0.01
Sulfato de cobre	0.0215
Dihidroyoduro de etilendiamina	0.0001
Selenio 1% (selenito de sodio)	0.0025
EM kcal/kg (Energía metabolizable calculada) (NRC, 2012)	3132.8

Se realizó un análisis de varianza para verificar la influencia del número de lechones aún vivos de la camada (LP) y los días después del parto (D) en el aumento de la ingesta de alimento en diferentes momentos de la lactancia (días 1-3, 1-6 y 1-21), utilizando el procedimiento GLM con medias de mínimos cuadrados ($\alpha = 0.05$, $\beta = 0.2$). El modelo se desarrolló con la ingesta voluntaria de alimento del día anterior más una estimación del aumento del consumo de alimento utilizando un modelo empírico:

$$\text{Consumo estimado} = \text{Consumo del día anterior} + \text{aumento de alimento estimado}$$

Donde la ingesta de alimento estimada el día uno después del parto es una constante (A), y el aumento de la ingesta de alimento se supuso como la derivada parcial generalizada de la ingesta de energía alimentaria con respecto al número de días después del parto (D) por el número de lechones lactantes vivos (LP) al día D dividido por la concentración energética de la dieta en kcal / kg (ME). A partir del modelo del NRC (1987), la ingesta de energía en cerdas lactantes tiene una relación cuadrática con respecto a los días posteriores al parto: $\mu + \beta_1 D + \beta_2 D^2$ y su primera derivada parcial con respecto a los días posteriores al parto es $\beta_1 + 2\beta_2 D$. Los estimadores β_1 y β_2 se pueden calcular utilizando técnicas de regresión no lineal.

$$\text{Consumo de alimento (día 1 después del parto)} = A$$

$$\text{Aumento de alimento estimado} = (\beta_1 + \beta_2 D) * LP / (ME)$$

$$\text{Consumo estimado}_{(D)} = \text{Consumo}_{(D-1)} + (\beta_1 + \beta_2 D) * LP / (ME)$$

Se registró la ingesta real de alimento y el número de lechones vivos durante el periodo de lactancia de 56 cerdas. Las cerdas se alimentaron *ad libitum* y el alimento residual se pesó y se secó día a día para medir el consumo real de alimento. Para calcular los estimadores del "aumento de la ingesta de alimento", se utilizó una regresión no lineal, minimizando la suma de cuadrados de los residuos, siguiendo el protocolo descrito por Kemmer y Keller (2010), mediante iteraciones por el método generalizado de reducción de gradiente (GRG no lineal), permitiendo estimadores con valores negativos. Se calculó la suma de cuadrados del residual (RSS), la varianza residual (s²e), la desviación estándar residual (se) y el coeficiente de determinación (R²). Se agregó un factor de ajuste al modelo para tomar en consideración el comportamiento individual de la cerda. Este factor de ajuste es una puntuación de comedero (BS por sus siglas en inglés) con una escala de 1 a 5 (Figura 12):

$$\text{Factor de ajuste} = 1 + (3 - BS) / 20$$

$$\text{Consumo estimado}_{(D)} = (\text{Consumo}_{(D-1)} + (\beta_1 + \beta_2 D) * LP / (ME)) * (1 + (3 - BS) / 20)$$



Valor	1	2	3	4	5
Descripción	Lamido	Trazas	< ¼ último servicio	¼- ½ último servicio	½ o más del último servicio

Figura 12 Valores la puntuación del comedero (BS) utilizados en el factor de ajuste.

El factor de ajuste utiliza la retroalimentación diaria del operador registrada en una escala de 1 a 5. Si el BS es igual a 1 o 2, el factor de ajuste aumenta la ingesta estimada de alimento en un 10 o 5%, respectivamente. Si el BS es igual a 3, no hay necesidad de ajustar el modelo y el factor de ajuste no cambia la ingesta estimada de alimento. Cuando el BS es un valor de 4 o 5, el factor de ajuste disminuye la ingesta estimada de alimento en un 5 o 10%, respectivamente. El diagrama de flujo del modelo se muestra en la Figura 13: el primer día después del parto la cantidad de alimento ofrecida a la cerda será "A"; desde el día 2 hasta el destete el operador registrará, cada mañana antes de la distribución del nuevo alimento, el comportamiento de alimentación de la cerda utilizando el BS descrito en la Figura 12, y el número de lechones vivos en ese momento (LP), para estimar la cantidad de alimento a mezclar y distribuir el día actual.

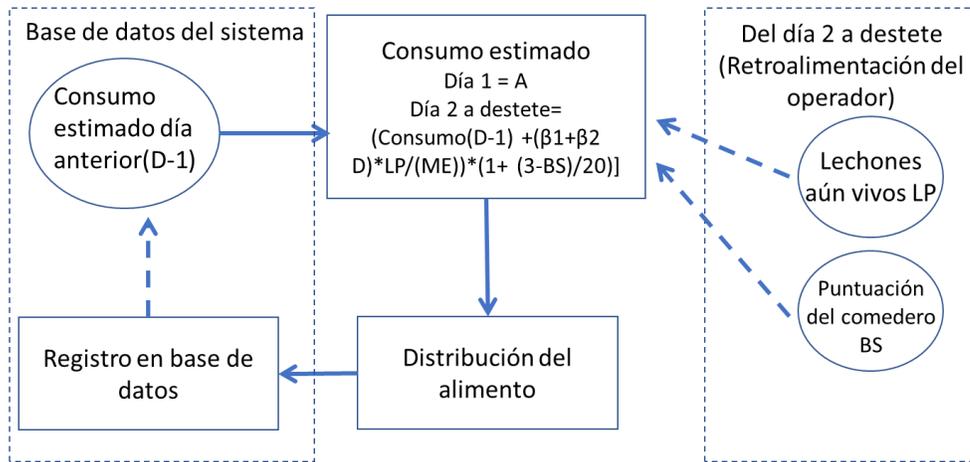


Figura 13 Diagrama de flujo de la estimación de la ingesta de alimento dentro del modelo dinámico *Las flechas gruesas indican los pasos principales y las flechas punteadas indican la retroalimentación*

Para validar el modelo se seleccionaron y alimentaron quince cerdas lactantes utilizando el modelo establecido. Se documentaron todos los pesos de los lechones al nacer, al destete y el BS durante la lactancia. La tasa de éxito del modelo dinámico se determinó por el porcentaje de veces que el BS fue 2 o 3 por cada marrana. Estos valores indicaron que la cerda comió lo suficiente para satisfacer su ingesta voluntaria de alimento y no se generó desperdicio de alimento. La tasa de error del modelo se midió como el porcentaje de veces que la puntuación del comedero fue 1, 4 o 5 porque si BS era 1, la cerda no comió lo suficiente para satisfacer su ingesta voluntaria de alimento (subestimación), mientras que, si BS era 4 o 5, se producía desperdicio de alimento (sobreestimación). Se calculó el error cuadrático medio (RMSE) donde el error fue la proporción de fallas (sobreestimación + subestimación).

$$\acute{E}xito = (BS2 + BS3) / (BS1 + BS2 + BS3 + BS4 + BS5)$$

$$Error = (BS1 + BS4 + BS5) / (BS1 + BS2 + BS3 + BS4 + BS5)$$

$$Subestimaci3n = BS1 / (BS1 + BS2 + BS3 + BS4 + BS5)$$

$$Sobreestimaci3n = (BS4 + BS5) / (BS1 + BS2 + BS3 + BS4 + BS5)$$

2.5.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después del parto, las cerdas aumentaron su ingesta de nutrientes con una tendencia cuadrática, para satisfacer las demandas nutricionales necesarias para la producción de leche a fin de evitar un catabolismo excesivo de los tejidos corporales (Tokach *et al.*, 2019) (Figura 14).

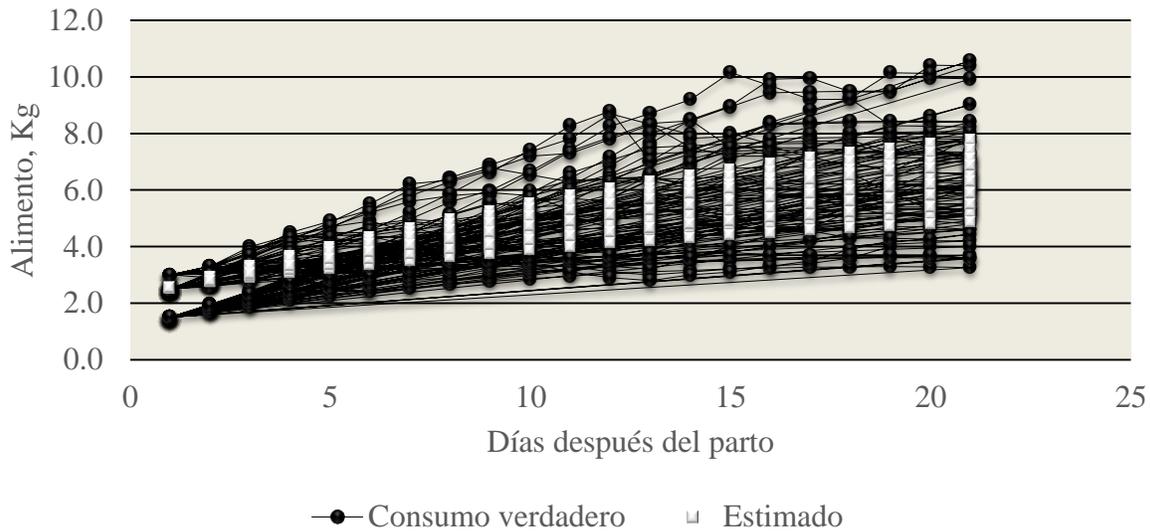


Figura 14 Diagrama de dispersión de la ingesta de alimento real y la ingesta de alimento estimada $\text{Suma total de cuadrados (TSS)} = 3927.6$, $\text{suma residual de cuadrados (RSS)} = 2182.7$, $\text{varianza del error (se}^2\text{)} = 1.86$, $\text{error estándar (se)} = 1.36$ y $\text{coeficiente de determinación (R}^2\text{)} = 0,56$.

En los primeros tres días, observamos que el tamaño de la camada influyó en la aceleración de la ingesta de alimento ($P < 0.001$) (Figura 15). La diferencia en la ingesta energética entre cerdas con diferentes tamaños de camada observada en los primeros tres días después del parto está en línea con el modelo de partición energética de NRC (2012), pero no con los modelos empíricos utilizados para predecir la ingesta de alimento durante la lactancia. Esto puede deberse a que los modelos empíricos tienen en cuenta todo el período de lactancia, donde las caídas en la ingesta individual de alimento desde el día 6 hasta el destete reducen el efecto del tamaño de la camada.

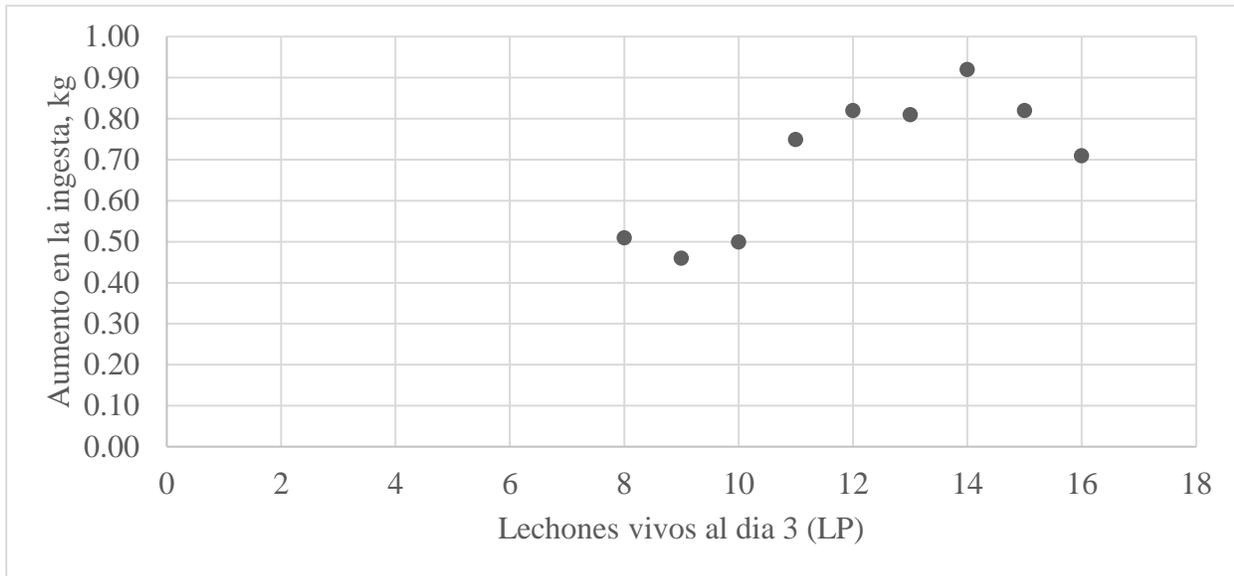


Figura 15 Diagrama de dispersión de las medias de mínimos cuadrados del aumento de la ingesta de alimento *Aumento de la ingesta de alimento acumulado del día 1 al 3 por número de lechones vivos (LP)*.

Desde el cuarto al sexto día, las caídas en la ingesta de alimento aumentaron la variabilidad entre las cerdas y redujeron el efecto del tamaño de la camada ($P = 0.302$). Desde el día 6 hasta el destete, hubo una desaceleración general de la ingesta de alimento (Figura 16). Estos hallazgos confirman las observaciones de **Koketsu et al.** (1996), quienes informaron caídas más frecuentes en la ingesta de alimento durante la segunda y tercera semana de lactancia, similar tanto en la ingesta general como en el patrón de ingesta observada durante el desarrollo del modelo. Si bien el número de días posteriores al parto aumentó significativamente la ingesta de alimento durante todo el período de lactancia ($P < 0.001$), el tamaño de la camada no fue significativo ($P = 0.54$). Se observó una alta variación entre individuos: al día 21 después del parto, observamos variaciones entre cerdas que van de 4 a 10 kg por día de ingesta voluntaria de alimento. Los resultados son similares a los de **Gilbert et al.** (2012), quienes informaron que la ingesta de alimento residual durante la lactancia (la diferencia entre la ingesta de alimento esperada y la ingesta de alimento real) es independiente del crecimiento de la camada o de las reservas de movilización del cuerpo; y con las observaciones de **Thingnes et al.** (2012), quienes identificaron que la alimentación *ad libitum* durante la lactancia aumenta las variaciones individuales en el consumo de alimento.

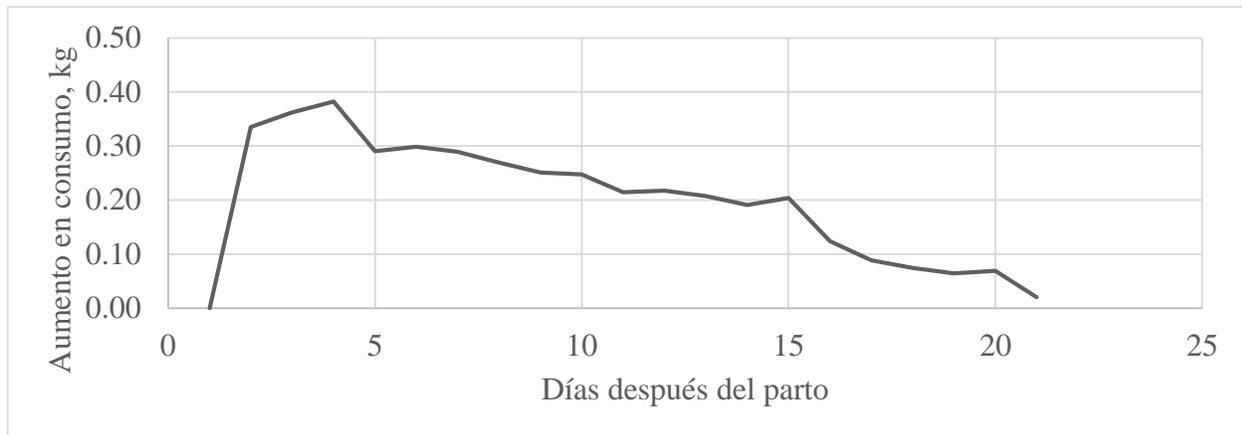


Figura 16 Diagrama de dispersión del aumento en el consumo de alimento. *Media aritmética*

El modelo elaborado estima una ingesta general de alimento de $A = 2.55$ kg el día uno después del parto. La ingesta calculada para el primer día después del parto (A) es ligeramente inferior a la cantidad de alimento suministrada antes del parto (3 kg / d) y se ajusta a la recomendación de Solà-Oriol y Gasa (2017) de alimentar con la misma cantidad de alimento proporcionado antes del parto. Desde el día 2 hasta el destete, la ingesta de alimento estimada del modelo cambia la cantidad de alimento día a día después del parto (Figura 17), y se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo estimado}_{(D)} = (\text{Consumo}_{(D-1)} + (80 - 2.51 D) * LP / (3132.8)) * (1 + (3 - BS) / 20)$$

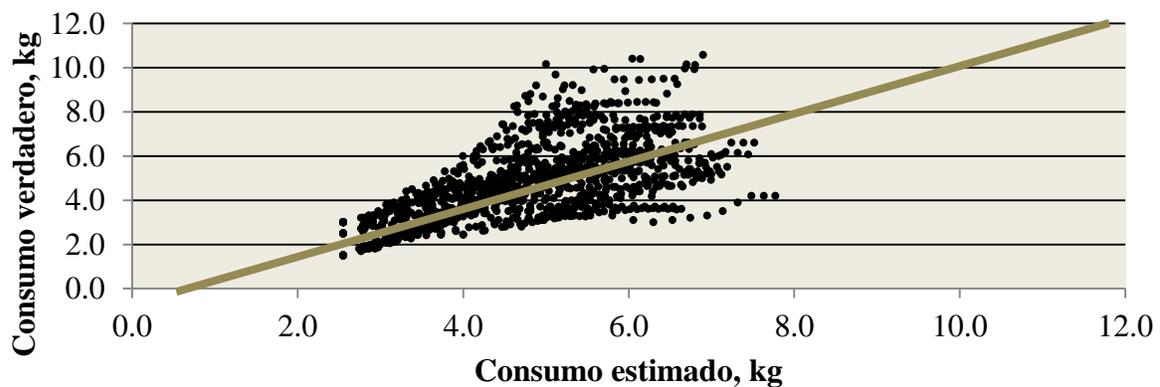


Figura 17 Diagrama de dispersión de la ingesta de alimento real frente a la ingesta de alimento estimada. *Coefficiente de determinación ($R^2 = 0.56$); la tendencia observada de la ingesta de alimento y el valor estimado fueron los mismos.*

La variación de la relación entre el valor residual y el valor observado fue homogénea durante la lactancia (a); e independiente del número de lechones vivos en cualquier momento (b); el error fue independiente entre cerdas (c); y los residuales presentaron una distribución normal con una media de cero (d) (Figura 18). La variación individual de la ingesta del alimento justifica la incorporación del factor de ajuste utilizado en la validación del modelo para evitar el exceso o la falta de alimento. El uso del BS en el factor de ajuste permite aumentar o disminuir la alimentación ofrecida en respuesta a las demandas de las cerdas.

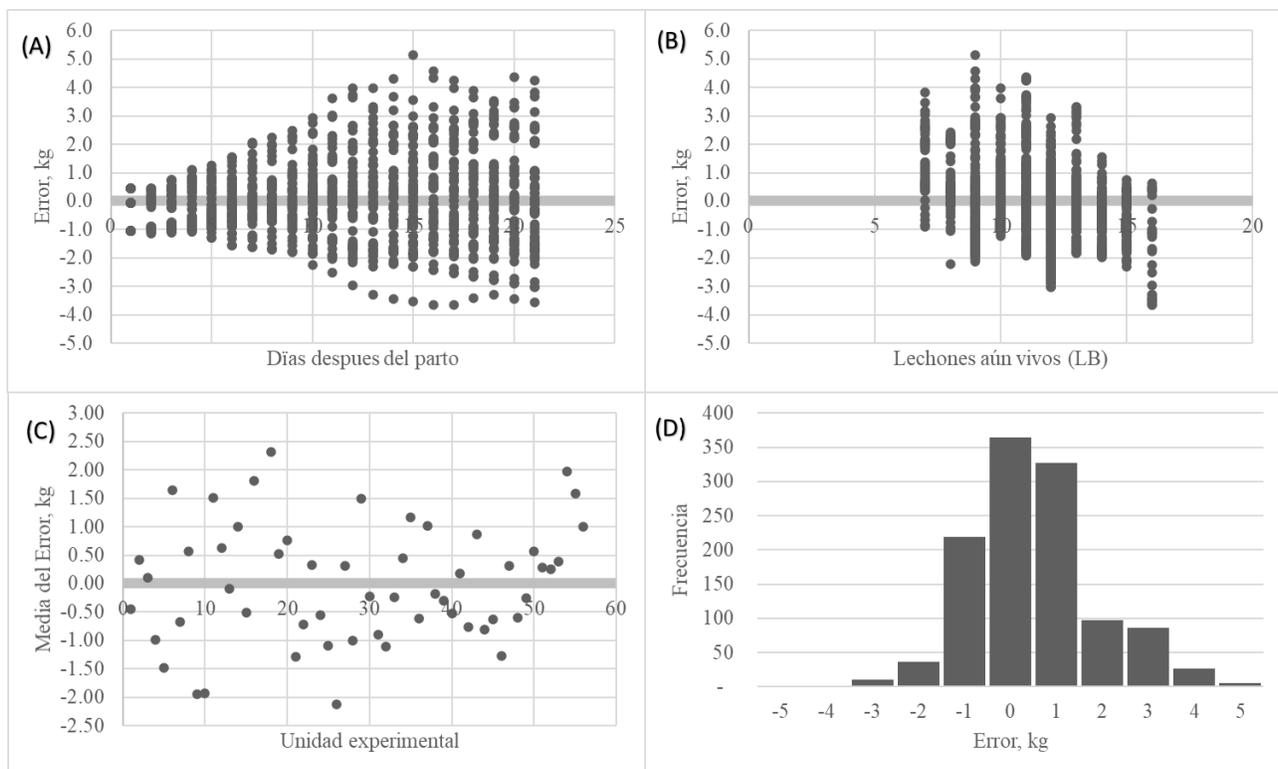


Figura 18 Análisis residual de la ingesta estimada de alimento sin el factor de ajuste. *Diagrama de dispersión de la relación entre valor residual / valor observado y días después del parto (a); diagrama de dispersión de residuos y lechones vivos en un momento (b); residuo medio de la unidad experimental (c) e histograma de residuos (d).*

Durante la validación del modelo, la ingesta media de alimento aumentó desde el día uno hasta el destete, con una caída al día 12; la ingesta promedio de alimento fue de 5.5 kg / d, la curva de ingesta de alimento no corresponde a las predicciones del NRC (Figura 8).

La ingesta promedio de alimento observada fue ligeramente mayor en comparación con la predicción de ingesta promedio de alimento usando el modelo NRC 1987 (5.2 kg / d) y comparativamente más baja que la predicción de ingesta promedio usando el modelo NRC 2012 (6.62 kg / d).

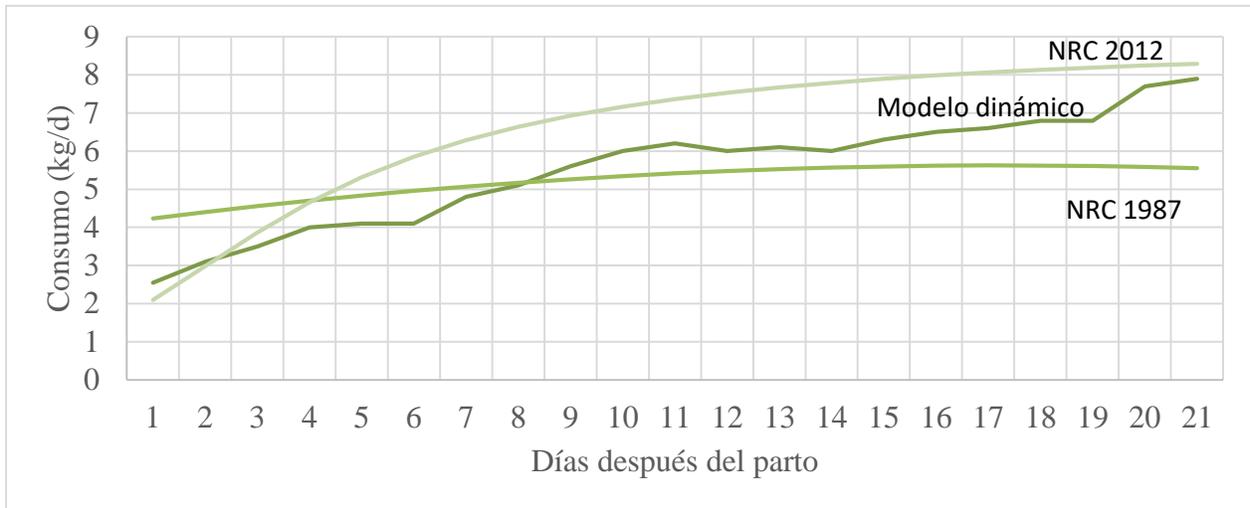


Figura 19 Diagrama de dispersión de la ingesta media de alimento durante la lactancia durante la validación del modelo. Comparado con la ingesta de alimento estimada usando los modelos NRC 1987 y NRC 2012.

Los primeros 3 días después del parto el modelo subestimó la ingesta de alimento de las cerdas: el BS promedio de alimento estuvo entre 1-2 y entre 2-3 desde el día 4 hasta el destete (Figura 20). Sin embargo, el BS desde el día 4 hasta el destete indicó que el factor de ajuste mejoró la cantidad de alimento ofrecido, por lo que las cerdas minimizaron el desperdicio de alimento.

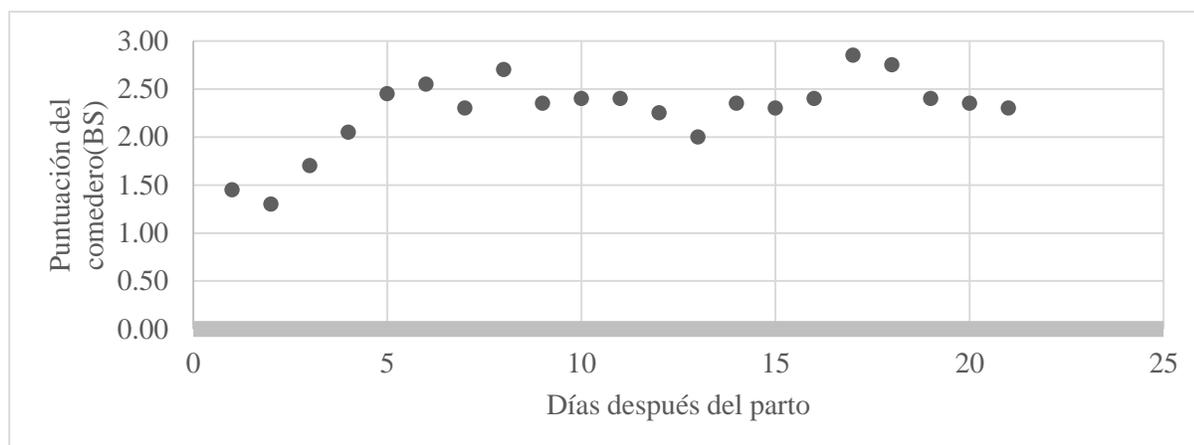


Figura 20 Puntuación media del comedero durante la validación del modelo.

Se determinó la tasa de éxito de los modelos en 73.5% (Cuadro 10), con una subestimación del 15% y una sobreestimación del 11.5%. En cualquier día, la media medida de la BS fue inferior a 3 y la RMSE fue del 28%.

Cuadro 10 Promedio de los resultados en la validación del modelo

	Promedio	Dev st	CV, %
Peso al nacer	1.25	0.16	13
Peso al destete	6.17	0.65	11
Lechones destetados	11.40	1.68	15
Puntuación del comedero promedio	2.39	0.34	14
Éxito (%)	73	9	13
Sobrestimación (%)	12	8	66
Subestimación (%)	15	12	81
Error (%)	27	9	35
Error cuadrado medio (MSE)			7.9%
Raíz del error cuadrado medio (RMSE)			28%

Los resultados indicaron que el modelo propuesto estimó con precisión la ingesta de alimento de las cerdas durante la lactancia, pero se necesita más información de las causas de las caídas en la ingesta de alimento que aumentan la variabilidad entre cerdas.

2.6.CONCLUSIONES

Utilizando la retroalimentación del desempeño anterior a través del BS, podemos ajustar la curva de consumo de alimento diariamente para que coincida con el comportamiento de cada cerda y usarlo en sistemas automáticos de distribución de alimentación líquida o en pasta para reducir con éxito el desperdicio de alimento. El tamaño de la camada tiene un efecto significativo en la ingesta de alimento durante los primeros tres días después del parto, pero las caídas en la alimentación individual reducen su efecto durante toda la lactancia. El BS se puede utilizar para experimentos adicionales para ajustar la curva de consumo de alimento por corral en cerdos de engorde y mejorar la precisión de los sistemas de alimentación líquida y en pasta.

2.7.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CIOMS (Council for International Organization of Medical Science), ICLAS (International council for laboratory animal science). 2012. *International guiding principles for biomedical research involving animals*. Accessed December 5, 2020. https://olaw.nih.gov/sites/default/files/Guiding_Principles_2012.pdf
- Eissen, J.J., Apeldoorn, E.J., Kanis, E., Verstegen, M.W.A., Greef, K.H. 2003. The importance of high feed intake during lactation of primiparous sows nursing large litters. *J. Anim. Sci.*, 8:1594-1603. doi:10.2527/2003.813594x
- Feyera, T., Theil, P.K. 2017. Energy and lysine requirements and balances of sows during transition and lactation: a factorial approach. *Livest Sci.*, 201:50-57. doi:10.1016/j.livsci.2017.05.001
- Gilbert, H., Bidanel, J.P., Billon, Y., Lagant, H., Guillouet, P., Sellier, P., Noblet, J., Hermes, S. 2012. Correlated responses in sow appetite, residual feed intake, body composition, and reproduction after divergent selection for residual feed intake in growing pig. *J. Anim. Sci.*, 90:1097-1108. doi:10.2527/jas.2011-4515
- Kemmer, G., Keller, S. 2010. Nonlinear least-squares data fitting in excel spreadsheets. *Nat. Protoc.*, 5(2):267-281. doi:10.1038/nprot.2009.182

- Kim, S.W., Baker, D.H., Easter, R.A. 2001. Dynamic ideal protein and limiting amino acids for lactating sows: The impact of amino acid mobilization. *J. Anim. Sci.*, 76:2356-2366. doi.org/10.2527/2001.7992356x
- Koketsu, Y., Dial, G.D., Pettigrew, J.E., Marsh, W.E., King, V.L. 1996. Characterization of feed intake patterns during lactation in commercial swine herds. *J. Anim. Sci.*, 74:1202-1210. doi:10.2527/1996.7461202x
- NOM-062-ZOO-1999 (Norma Oficial Mexicana.). 2001. *Technical specifications for production, care and use of lab animals.* p.57. Accessed December 5, 2020. <http://publico.senasica.gob.mx/?doc=743>
- NRC (National Research Council). 2012. Nutrient requirements of Swine. Eleventh Revised edition. National Academic Press.
- NRC (National Research Council).1987. Predicting Feed Intake of Food-Producing Animals. National Academies Press. Accessed December 6, 2020. <http://www.nap.edu/catalog/950.html>
- Oltjen, J.W., Owens, F.N. 1987. Beef Cattle Feed Intake and Growth: Empirical bayes derivation of Kalman filter applied to a nonlinear dynamic model. *J. Anim. Sci.*, 65:1362-1370. doi:10.2527/jas1987.6551362x
- Pedersen, T.F., Bruun, S.T., Feyera, T., Larsen, U.K., Theil, P.K. 2016. A two-diet feeding regime for lactating sows reduced nutrient deficiency in early lactation and improved milk yield. *Livest. Sci.*, 191:165-173. doi:10.1016/j.livsci.2016.08.004
- Pritchard, R.H. 1993. Bunk management. Reprinted from “Delivering the difference”, *Land O'Lakes*. Brookings, SD: South Dakota State University. p.14.
- Salubo, R.C., Jacela, J.Y., Tokach, M.D., Dritz, S.S., Goodband, R.D., DeRouchey, J.M., Nelssen, J.L. 2010. Effects of lactation feed intake and creep feeding on sow and piglet performance. *J. Anim. Sci.*, 88:3145-3153. doi:10.2527/jas.2009-2131
- Solà-Oriol, D., Gasa, J. 2017. Feeding strategies in pig production: Sows and their piglets. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 233: 34-52. doi:10.1016/j.anifeedsci.2016.07.018
- Thingnes, S.L., Ekker, A.S., Gaustad, A.H., Framstad, T. 2012. Ad libitum versus step-up feeding during late lactation: The effect on feed consumption, body composition and production performance in dry fed loose housed sows. *Livest. Sci.*, 149: 250-259. doi:10.1016/j.livsci.2012.07.015
- Tokach, M.D., Menegat, M.B., Gourley, K.M., Goodband, R.D. 2019. Review: Nutrient requirements of the modern high-producing lactating sow, with an emphasis on amino acid requirements. *Animal*, 1-11. doi:10.1017/S1751731119001253
- Yohan, C., Abdolreza, H., JinSoo, K., SunHyup, L., MinJu, K., Kumar, A., Kim, K., Kim, Y.H. 2018. An overview of hourly rhythm of demand-feeding pattern by a controlled feeding system on productive performance of lactating sows during summer. *Ital. J. Anim. Sci.*, 17(4):1001-1009. doi:10.1080/1828051X.2018.1438214

CAPÍTULO 3 DISEÑO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE LA PASTA

3.1.RESUMEN

Las características físicas de la alimentación en pasta son las de un fluido no newtoniano ya que la viscosidad es alta y cambia con el esfuerzo cortante y la temperatura. Por lo que no es posible utilizar los sistemas comerciales de mezclado y bombeo para alimentación líquida, ya que están diseñados para el bombeo de fluidos con baja viscosidad. Con el objetivo de poder mezclar y distribuir la alimentación en pasta en una granja comercial, se diseñó un sistema modular que permite la alimentación de hasta 3600 cerdos de engorda en 90 min (6 líneas de 600 cerdos cada una), que hace uso de un tanque para 600 L de capacidad, un agitador tipo turbina de 7.5 HP, una bomba de cavidad progresiva de 7.5 HP y tubería y accesorios de PVC ced 40. El sistema podría replicarse en diferentes secciones de la granja a forma de alimentar a todos los cerdos usando varios tanques y bombas para la distribución del alimento.

3.2.ABSTRACT

The physical characteristics of the paste feed are those of a non-Newtonian fluid, since the viscosity is high and changes with shear stress and temperature. Therefore, it is not possible to use commercial mixing and pumping systems designed for liquid feeding, as they are designed for pumping fluids with low viscosity. With the aim of being able to mix and distribute the paste feed in a commercial farm, a modular system was designed that allows the feeding of up to 3600 fattening pigs in 90 min (6 lines of 600 pigs each), which makes use of a 600 L capacity tank, 7.5 HP turbine-type agitator, 7.5 HP progressive cavity pump and ced 40 PVC pipe and fittings. The system could be replicated in different sections of the farm to feed all the pigs using various tanks and pumps for food distribution.

3.3.INTRODUCCIÓN

La alimentación en pasta es un novedoso método de producir el alimento para cerdo. Se cuenta con patente registrada en México (Chávez, 2011) (MX 327813 B) y Canadá (CA2870250C). Su método de elaboración es mediante una cocción alcalina, así como su textura pastosa permiten mejorar la digestibilidad de los alimentos (Gaspar *et al.* 2015), reduciendo considerablemente los costos de alimentación; además, su misma consistencia permite el uso de comederos tipo tolva. Sin embargo, el alimento en pasta presenta alta viscosidad la cual cambia

con el esfuerzo cortante y temperatura dentro de la tubería, por lo que se considera como fluido no Newtoniano, lo que dificulta su implementación en una granja comercial. Por esta razón los sistemas actuales de distribución de alimentos líquidos no pueden usarse con alimentación en pasta.

La alimentación en pasta es un tipo de alimentación húmeda, para **Hogberg** (1981) la alimentación húmeda se divide en dos grandes grupos: alimentación líquida y alimentación en pasta. La alimentación líquida consiste en la formación de una sopa con baja viscosidad que es bombeada a los comederos; y la alimentación en pasta es común en el mercado en forma de papilla para lechones y consiste en mezclar agua una harina para formar una pasta. Sin embargo, esta pasta sólo es utilizada en alimentación de lechones debido a lo complicado que es mezclar y distribuir el alimento.

Hay patentes que describen sistemas de mezclado y bombeo de alimentos líquidos para cerdos, los cuales utilizan tanques agitados y bombas diseñadas para fluidos con baja viscosidad, como los propuestos por **Liu y Liu** (2015a, 2015b) (CN106359249 A, CN106359143A), **Campion et al.** (FR3039038A1)(2015) y **Lee** (KR100960292B1)(2009), este último para alimentación líquida fermentada, por lo que no pueden ser usados en alimentación en pasta debido a que la viscosidad de la pasta es superior a los 2,400 cP (centipoise). La viscosidad del alimento en pasta permite llenar una tolva y ajustar el nivel de salida sin que se derrame el alimento, por consecuencia se pueden usar los mismos comederos utilizados para harina o pellet, es decir, la alimentación en pasta puede usarse en granjas diseñadas para alimentación seca, añadiendo sólo un sistema de bombeo, por lo que su campo de aplicación es mayor que la alimentación líquida, la cual requiere un cambio completo en la configuración de las corraletas y comederos. A pesar de las ventajas nutricionales y de manejo respecto a los diferentes métodos de alimentación, la alimentación en pasta no se ha podido utilizar en granjas comerciales, debido a la dificultad para mezclar y bombear el alimento en pasta.

Para suministrar el alimento a los cerdos es necesario formar la pasta. Para ello se adiciona agua y se provoca un flujo turbulento; después se adiciona el alimento seco hasta formar un complejo coloidal de consistencia pastosa, con una humedad entre el 65% y el 75%, el cuál es servido a libre acceso. El alimento en pasta es un fluido cuya viscosidad permite que se puedan utilizar comederos tipo tolva (utilizados en alimentación seca), llenarlos a tope, sin que se derrame

al piso y se desperdicie (Figura 21), y es debido a su misma viscosidad que no es posible utilizar la tecnología existente diseñada para sistemas de alimentación líquida, por lo que se deben diseñar equipos que permitan su mezclado con agua y distribución a los comederos.



Figura 21 Ejemplo del uso de la alimentación en pasta. *Se mezcla con agua y sirve en comedero. La pasta baja de nivel conforme los animales consumen el alimento.*

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Necesidades del sistema

Un sistema completamente automatizado para el mezclado y bombeo del alimento en forma de pasta a los comederos con la siguiente descripción (Figura 22): El alimento se debe elaborar con base en ingredientes secos almacenados en tolvas tipo silos (1). Cada ingrediente se debe transportar a una tolva de pesado (2) con base en una fórmula, y vertir en el un tanque de mezclado (3). Se debe agregar el agua en función de la dieta a preparar y mezclar los ingredientes hasta lograr la consistencia deseada. Seleccionar diferentes líneas de distribución por medio de un cabezal con válvulas (5). Distribuir el alimento mediante bombeo (4) por un sistema de tuberías (6) y válvulas (7) que distribuirán el alimento a los comederos con base en los modelos de predicción de consumo de alimento(8).

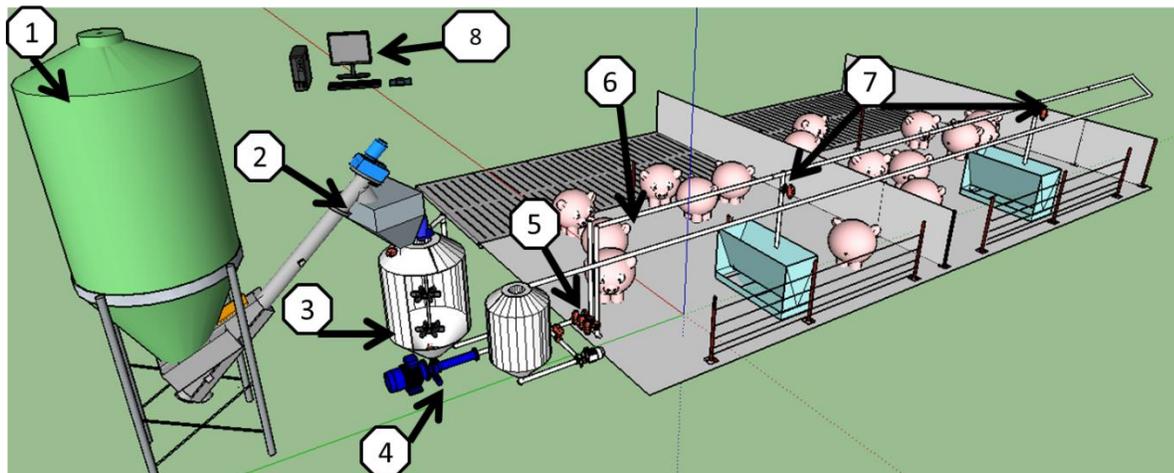


Figura 22 Descripción gráfica de las necesidades del sistema de distribución

Las necesidades del sistema definidas por Agropecuaria FC son las siguientes:

- Sistema autogestionado con base en modelos elaborados y posibilidad de operarlo de forma manual.
- Pesado de los ingredientes y mezclado en un lapso no mayor a 10 min.

- Distancia de 100 m del tanque de mezclado hasta el último de los comederos por línea de distribución.
- Máximo de 30 comederos por línea de distribución, hasta 600 cerdos en engorda por línea de distribución y hasta 6 líneas de distribución en el cabezal (3600 cerdos en total).
- Dar de comer a 6 líneas de alimentación en 1 hora con 30 min, y poder dar hasta 6 servicios de comida en el horario laboral.

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Selección de tanque y diseño de turbina para mezclado

La capacidad del tanque de mezclado debe poder alcanzar para dar de comer a una línea de distribución (equivalente a 600 cerdos de engorda) en un máximo de 6 servicios al día. Un tanque excesivamente grande requiere de mucho volumen para poder hacer un mezclado eficiente y un tanque excesivamente pequeño requiere de más de 6 servicios para poder dar de comer cuando el consumo es alto. Se observó un consumo de 2 kg de materia seca en etapa de engorda, equivalente a 4 L de pasta, para 600 cerdos el volumen máximo será de 2400 L, entre 6, la capacidad mínima del tanque en el punto más alto de consumo debe ser de 400 L. Al principio de la engorda el consumo estimado es de 0.8 kg de materia seca equivalente a 1.6 L, para 600 cerdos es igual a 960 L. Se compró un tanque de polietileno tipo tolva, con un diámetro interno de 1 metro ($D_T = 1m$) y una capacidad útil de 600 L, debido a que es fácil su limpieza, no se corroe, tiene un costo económico, y el volumen es suficiente para dar dos servicios de alimento por línea de distribución al principio de la engorda y 6 servicios por línea al final de la engorda. Se le adaptó un agitador de tipo turbina con disco para realizar el mezclado de la harina con el agua para formar la pasta; para el diseño de la turbina se siguieron las proporciones geométricas típicas descritas por Cocker (2001) (Figura 23).

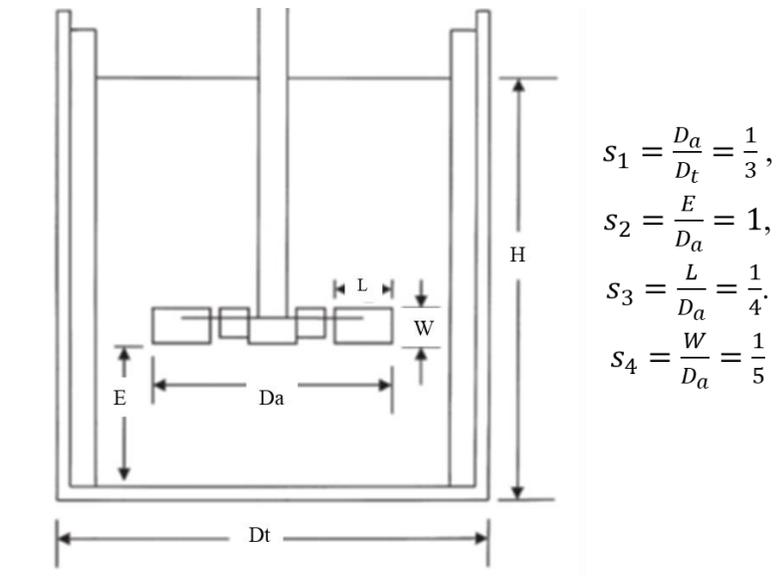


Figura 23 Proporciones geométricas típicas para agitadores tipo turbina con discos.

Las medidas calculadas para la turbina y el diseño de esta se muestran a continuación (Figura 24):

$$D_a = \frac{D_t}{3} = \frac{1\text{ m}}{3} = 0.3333\text{ m} \sim 33.3\text{ cm}, \quad E = D_a = 0.333\text{ m} \sim 33.3\text{ cm}$$

$$L = \frac{D_a}{4} = \frac{0.3333\text{ m}}{4} = 0.0833\text{ m} \sim 8.3\text{ cm}, \quad W = \frac{D_a}{5} = \frac{0.333\text{ m}}{5} = 0.066\text{ m} \sim 6.6\text{ cm}$$

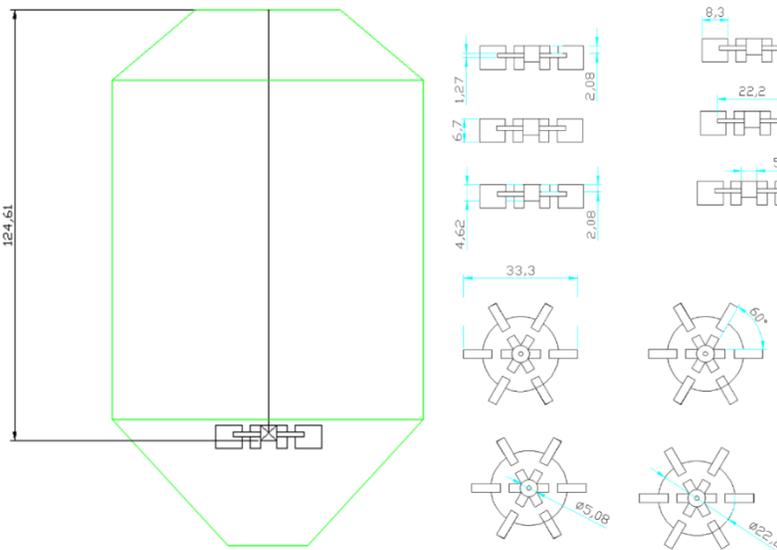


Figura 24 Dibujo del diseño de la turbina para el tanque de mezclado. *Medidas en centímetros.*

En el cálculo de la potencia y selección del motor para la turbina se consideró que el tanque con agua antes de agregar la harina tendrá una viscosidad mucho menor que la pasta terminada, por lo que al principio del mezclado el flujo dentro del tanque será turbulento y al final no. Se realizaron pruebas para identificar las RPM necesarias para mantener la mezcla en movimiento, y ayudar al mezclado con recirculación de la pasta por medio de bombeo. Para ello se utilizó un motor de 10 HP con acoplamiento directo y variador de frecuencia para la turbina y una bomba de desplazamiento positivo con engranajes helicoidales para la recirculación. Se observó que se requieren al menos 450 RPM, (equivalente a 7.5 revoluciones por segundo) para mezclar y mantener en movimiento la pasta ya formada. Se midió densidad aparente ($\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$) y viscosidad ($\mu = 2400 \text{ cp} = 2.4 \text{ Pas}$) de la pasta en laboratorio y se calculó el número de Reynolds (NRe) para el inicio del mezclado y para el final del mezclado:

$$N_{Re}(100\% \text{ agua}) = \frac{D_a^2 * N * \rho}{\mu} = \frac{0.33^2 * 7.5 * 1.1}{0.001} = 898,425(\text{flujo turbulento})$$

$$N_{Re}(100\% \text{ pasta}) = \frac{D_a^2 * N * \rho}{\mu} = \frac{0.33^2 * 7.5 * 1.1}{2.4} = 374(\text{flujo laminar})$$

Donde D_a es el diámetro de la turbina y N es la velocidad angular en rps. El número de Reynolds calculado para el proceso de mezclado indica un flujo turbulento al principio, con una alta eficiencia de mezclado, y al final laminar, con una eficiencia de mezclado baja, pero sería acompañada con recirculación por bombeo. El número de potencia (N_p) se obtuvo a partir de la siguiente gráfica con número de Reynolds calculado y el tipo de turbina seleccionada (Figura 25).

La potencia del motor se calculó usando la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} \text{Potencia (W)} &= (N_p * \rho * N^3 * D_a^5) n = (3.5 * 1100 * 7.5^3 * 0.33^5) 90\% = 7945 \text{ W} \\ &= 5.9 \text{ HP} \sim 7.5 \text{ HP} \end{aligned}$$

Donde W es la potencia calculada para el motor, N_p es el número de potencia y n es la eficiencia del motor. Se seleccionó un motor de 7.5 HP con motorreductor y juego de poleas para obtener 450 RPM de salida.

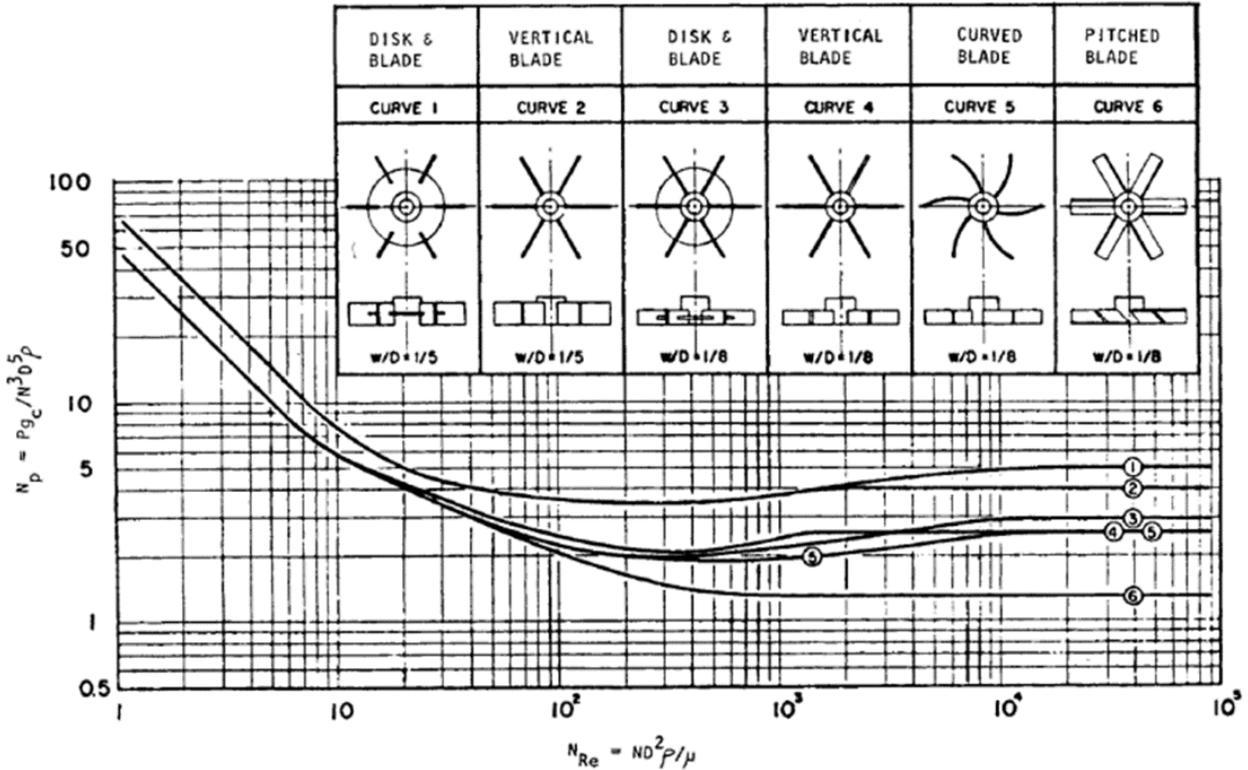


Figura 25 Selección del número de potencia (N_p) para la turbina seleccionada. $N_p \approx 3.5$ (Curva 1, $NRe=374$).

Selección de la tubería y potencia de la bomba

En las necesidades del sistema descritas por la empresa se solicita realizar el diseño suponiendo hasta 30 comederos y hasta 100 m lineales desde el tanque de mezclado al último comedero, un cabezal con 6 líneas de distribución y dar de comer a las 6 líneas en menos de 1 hora 30 minutos. Se realizó un diagrama general del sistema de tuberías y válvulas para una línea de distribución a fin de identificar la cantidad y tipo de conexiones necesarias para el cálculo de las pérdidas de presión dentro de la tubería (Figura 26). La capacidad del sistema se calculó dividiendo 600 L entre 5 minutos, de manera que el mezclado dure 10 min y el vaciado de la tolva 5 minutos y poder dar de comer a las 6 líneas en una hora con treinta minutos.

$$\text{Capacidad del sistema de bombeo} = \frac{600 \text{ L}}{5 \text{ min}} = 120 \text{ L/min} = 31.7 \text{ gal/min}$$

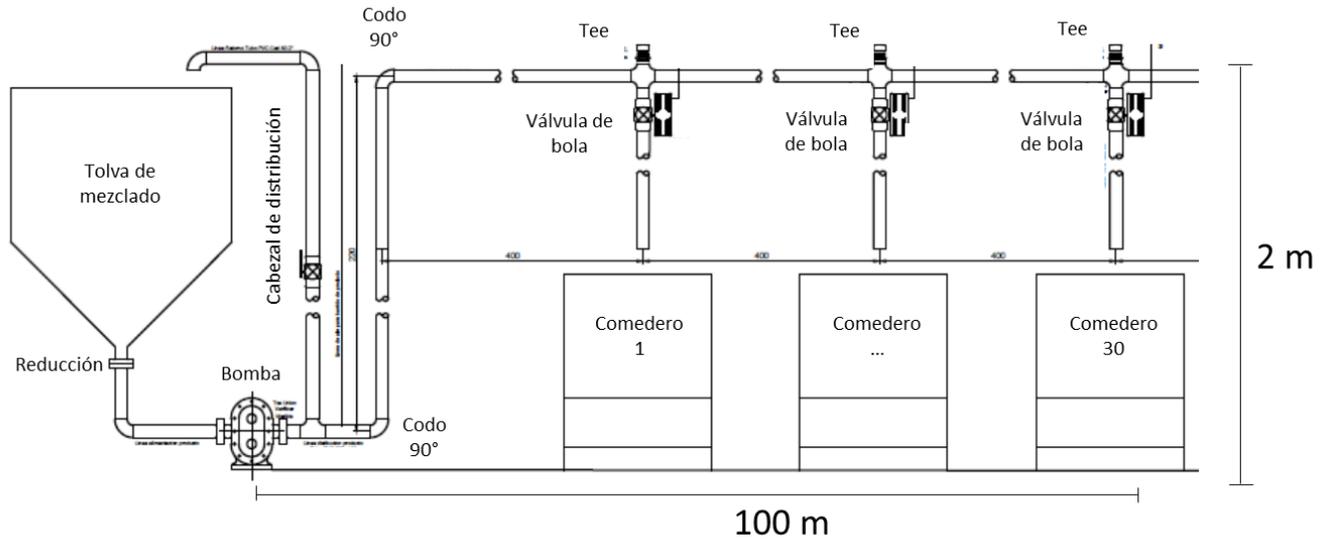


Figura 26 Diagrama de tuberías y accesorios para el sistema de bombeo

Se identificaron las siguientes conexiones: 1 reducción, 3 codos de 90°, 31 Tee, 2 válvulas de bola (una en el cabezal y otra a la descarga suponiendo 1 comedero a la vez) y 103 m de tubería. Dado que el bombeo se realiza en una línea de distribución a la vez, el cálculo para la potencia de la bomba se realizó para una sola línea de distribución. El balance de energía mecánica del sistema de bombeo está dado por la ecuación de Bernoulli modificada:

$$\frac{1}{2\alpha}(v_1^2 - v_2^2) + g(z_1 - z_2) + \frac{P_1 - P_2}{\rho} - \sum F = W_s$$

$$W_p = -\frac{W_s}{n}$$

$$\text{Potencia de la bomba} = W_p m$$

Donde el punto 1 es al inicio del sistema en el tanque de mezclado y punto 2 es en la descarga en el comedero 30, “ α ” es un factor de corrección de energía cinética que depende del tipo de flujo que se produzca: para flujo laminar es 0.5, “ v ” es la velocidad del fluido (m/s), “ z ” es la altura del fluido (m), “ P ” es presión (kg/m²), “ $\sum F$ ” pérdidas de energía por fricción dentro de la tubería, válvulas y accesorios y “ W_s ” es la energía teórica que necesita proporcionar la bomba

(J/kg), “n” es la eficiencia de la bomba (%), “Wp” es la energía real considerando la eficiencia de la bomba y “m” es el flujo másico del sistema (kg/s) .

Dado que el sistema es con tanque abierto en los dos puntos P1 y P2 son iguales, z1 es la altura del fluido dentro del tanque de mezclado y es igual a 2m y z2 es la altura de la descarga sobre el comedero, igual a 1m. V1 es la velocidad del fluido en el punto más alto del tanque de mezclado por lo que es despreciable y V2 está en función del diámetro de la tubería.

Las “ $\sum F$ ” pérdidas de energía por fricción dentro de la tubería, válvulas y accesorios se calculan con la siguiente expresión:

$$\sum F = \text{pérdidas en tubería} + \text{contracción} + \text{accesorios (Tee y codos)} + \text{válvulas}$$

$$\text{Pérdidas en tubería} = \frac{64}{N_{Re}} \frac{\Delta L}{D} \frac{v^2}{2}$$

$$\text{Pérdidas por contracción} = 0.55 \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right) \frac{v^2}{2}$$

$$\text{Pérdidas por cada codo de } 90^\circ = 17 \frac{v^2}{2}$$

$$\text{Pérdidas por cada Tee} = 9 \frac{v^2}{2}$$

$$\text{Pérdidas por cada válvula de bola abierta} = 28 \frac{v^2}{2}$$

La selección del diámetro de la tubería se realizó con el cálculo de la potencia de la bomba usando diferentes escenarios (Cuadro 11) y se seleccionó una tubería de 2.445 pulgadas de diámetro interno (tubería de 2.5” PVC ced 40) debido a que la potencia calculada es considerablemente menor en comparación a tuberías más pequeñas y a que la cantidad de pasta que quedaría dentro de la tubería es menor a una revoltura en el tanque de mezclado.

Se seleccionó una bomba de desplazamiento positivo de cavidad progresiva marca Seepex Modelo BN10-24 de acero inoxidable, 60 Hz, 7.5 HP.

Cuadro 11 Cálculo de potencia de la bomba para la distribución de la pasta en diferentes tamaños de tubería.

Descripción	Símbolo	Unidad	Escenarios			
			1100	1100	1100	1100
Densidad de la pasta	P	kg/m ³	1100	1100	1100	1100
Gravedad	G	m/s ²	9.807	9.807	9.807	9.807
Viscosidad de la pasta	μ	cPo	2400	2400	2400	2400
Capacidad del tanque		m ³	0.600	0.600	0.600	0.600
Sección abierta a salida del tanque	A1	m ²	0.628	0.628	0.628	0.628
Tiempo de vaciado del tanque	t	s	300	300	300	300
Rugosidad interior tubería	v	m	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001
Largo máximo de tubería	L	m	103	103	103	103
Cantidad de la ración		m ³	0.600	0.600	0.600	0.600
Altura tanque mezclador	z1	m	2	2	2	2
Altura comedero	z2	m	1	1	1	1
Velocidad en tanque	v1	m/s	0	0	0	0
CALCULO DE TUBERÍA						
Diámetro ced.40	D	in	1.5	2	2.5	3
Diámetro interior tubería ced.40	D	m	0.038	0.052	0.062	0.077
Sección en tubería	A2	m ²	0.00114009	0.00212736	0.00302911	0.00468895
Volumen en tubería		m ³	0.117	0.219	0.312	0.483
Peso pasta en tubería		kg	129	241	343	531
Flujo volumétrico	Q	m ³ /s	0.002	0.002	0.002	0.002
Velocidad en tubería	v2	m/s	1.754	0.940	0.660	0.427
Flujo másico	m	kg/s	2.200	2.200	2.200	2.200
Tiempo llenado comedero	t	s	300	300	300	300
CALCULO PERDIDAS POR FRICCIÓN						
Numero de Reynolds en tubería	NRe		30.633	22.426	18.794	15.105
Perdidas por fricción en 103m de tubería	F tubería	J/kg	8690.524	2495.992	1231.106	513.776
Pérdidas por 1 contracción	F contracción	J/kg	0.963	0.515	0.361	0.233
Perdida por 3 codos de 90°	F codos 90	J/kg	78.473	22.538	11.117	4.639
Perdida por 2 válvula de bola abiertas	F válvulas	J/kg	24.559	13.162	9.244	5.971
Suma de pérdidas por fricción	F	J/kg	8794.520	2532.207	1251.828	524.620
CALCULO POTENCIA BOMBA						
Energía teórica de la bomba	Ws	J/kg	-8788	-2523	-1242	-515
Eficiencia bomba	η	%	60%	60%	60%	60%
Energía real	η	%	14646.317	4205.474	2070.762	858.325
Potencia real bomba	Wreal	W	32222	9252	4556	1888
Potencia real bomba	Wreal	HP	43.21	12.41	6.11	2.53

3.6.CONCLUSIONES

El sistema de mezclado y distribución de la pasta diseñado es modular, escalable y permitirá su implementación en granjas comerciales, permite la alimentación de hasta 3600 cerdos de engorda en 90 min (6 líneas de 600 cerdos cada una). El sistema podría replicarse en diferentes secciones de la granja a forma de alimentar a todos los cerdos usando varios tanques y bombas para la distribución del alimento.

3.7.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Campion, L.P., Cordon, X., Monsimert, D. Cantin, D. 2015. Autonomous distribution system for feeding animals FR3039038A1. French National Institute of Industrial Property (INPI). Francia.
- Chávez, D.E. 2011. Alimento en pasta para cerdos. *MX 327813 B*. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Gaceta de la Propiedad Industrial.
- Coker, A.K. 2001. Modeling of chemical kinetics and reactor design. Gulf professional publishing. Singapur. p555
- Gaspar, L.E.B., Chávez, D.E., Mariscal, L.G., Corona, L.G., Pérez, A.M.A., Pettigrew, J.E., Cuarón, I.J.A. 2015. Maíz hidrolizado alcalinamente en dietas para cerdos ofrecidas en forma de harina o pasta. XVII Congreso Bienal AMENA.
- Hogberg, M. 1981. Physical forms of feed-feed processing for swine. Pork Industry Handbook. Extension Bulletin E-1464.
- Lee, J. 2009. The system for liquid feeding of food waste. Korean Intellectual Property Office (KIPO). Korea.
- Liu, Z., Liu, Z. 2015a. Liquid feeding method for pig raising with wheat middling. China National Intellectual Property Administration (CNIPA) Trademark Office. China.
- Liu, Z., Liu, Z. 2015b. Liquid feeding equipment or pig raising. China National Intellectual Property Administration (CNIPA) Trademark Office. China.

CONCLUSIONES GENERALES.

Discusión final

El objetivo general de la presente investigación ha sido el desarrollo de la tecnología que permita la implementación comercial de la alimentación en pasta, incluyendo la formulación de dietas, modelos de alimentación y diseño de equipos para su distribución en granja. Se observó que la alimentación en pasta mejora la ganancia diaria de peso y eficiencia alimenticia respecto a otros tipos de alimentación de cerdos, y se realizaron recomendaciones generales para la formulación de dietas para cerdos con base en lo observado en experimentos usando diferentes niveles de energía y lisina.

El cambio en el valor nutricional se puede utilizar para reducir el costo del alimento, como una estrategia para disminuir el impacto ambiental de la producción animal (**Ball et al.**, 2015) y/o para disminuir el uso de antibióticos como medida profiláctica (**Fuentes-Zaragoza et al.**, 2011; **Bach et al.**, 2012). El almidón resistente, resultado de tratamientos térmicos fuertes, tiene efecto prebiótico (**Bird et al.**, 2007; **Regmi et al.**, 2011), y puede ser usado por la flora microbiana del tracto digestivo y aprovechado por el cerdo en forma de ácidos grasos volátiles vía fermentación (**Wang et al.**, 2004), por lo tanto, se recomienda investigar sobre la producción de almidón resistente con el proceso térmico patentado por Agropecuaria FC y su efecto en la salud de cerdos en diferentes etapas de su crecimiento.

El cambio en las propiedades fisicoquímicas de los alimentos, producto de los tratamientos térmicos, puede facilitar el manejo en granja, disminuir el desperdicio de alimento y la mano de obra necesaria en la producción animal, dando una nueva perspectiva sobre el uso del tratamiento térmico de las materias primas en la alimentación animal. La combinación adecuada de temperatura, humedad, presión y tiempo consigue una desnaturalización parcial de las proteínas de los alimentos, gelatinizan el almidón y mejoran la solubilidad de las fracciones de fibra, dando como resultado propiedades físicas diferentes a las que presenta un alimento crudo. Un ejemplo de esto es el almidón, cuando se encuentra “crudo” es insoluble en agua, pero cuando es calentado en agua ocurre el proceso conocido como gelatinización, pierde su birrefringencia, parte se solubiliza y se dice que forma una “pasta” (**Hoseney**, 1998).

La alimentación en pasta permite obtener un fluido viscoso de consistencia pastosa, con alta digestibilidad, que dificulta al cerdo tirar el alimento del comedero, lo que reduce la cantidad de alimento desperdiciado. Dichas ventajas permiten reducir el costo de alimentación en una granja porcina, además, es fácil de instalar en cualquier granja ya que no necesita un tipo de comedero especial, ya que puede usarse un comedero de alimentación seca, y su distribución es mediante bombeo, por lo que permite adaptarse fácilmente a la distribución de los corrales en la granja (Figura 27), puede ser controlada por computadora y completamente automatizada; puede medirse la cantidad de alimento distribuida a cada comedero. Se recomienda incluir en el sistema de distribución de la pasta en granja, el uso de sensores y sistemas SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos, por sus siglas en inglés) que permitan obtener información en tiempo real de la alimentación en la granja; los datos podrían ser registrados en automático permitiendo el uso de nuevas tecnologías de la información y manejo de datos para la toma de decisiones, como la selección de programas de alimentación o esquemas de manejo.

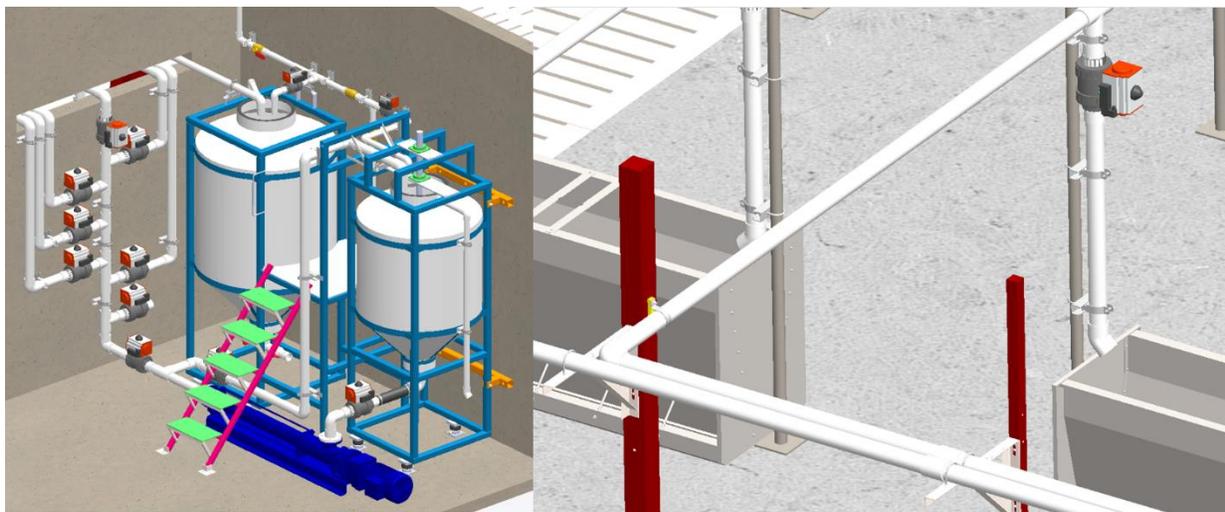


Figura 27 Vista en 3D del sistema de mezclado y distribución de la pasta diseñado.

Conclusiones

1. El tipo de alimentación afecta el comportamiento productivo de los cerdos.
2. La alimentación en pasta mejora la ganancia de peso y eficiencia alimenticia en comparación a los métodos tradicionales de alimentación de cerdos, pero disminuye el consumo de alimento.
3. El consumo de energía y lisina tienen un efecto significativo sobre la ganancia diaria de peso en cerdos alimentados con dietas en forma de pasta: a mayor concentración se observó mejor comportamiento productivo.
4. Se deben considerar en la formulación de raciones las mejoras en la digestibilidad de los nutrientes y el uso de aditivos para conservar la pasta.
5. La puntuación del comedero (BS) se puede utilizar para ajustar la curva de consumo de alimento y mejorar la precisión de los sistemas de alimentación en pasta para evitar desperdicios.
6. La viscosidad de la pasta no permite el uso de sistemas diseñados para alimentación líquida de cerdos.
7. El sistema de mezclado y distribución de la pasta diseñado es modular, escalable y permitirá su implementación en granjas comerciales.

Referencias bibliográficas

- Bach, K.K.E., Hedemann, M.S., Lærke, H.N., 2012. The role of carbohydrates in intestinal health of pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 173, 41–53.
- Ball, M.E.E., Magowan, E., McCracken, K.J., Beattie, V.E., Bradford, R., Thompson, A., Gordon, F.J. 2015. An investigation into the effect of dietary particle size and pelleting of diets for finishing pigs. *Livestock Sci.*, 173:48-54
- Bird, A.R., Vuaran, M., Brown, I., Topping, D.L., 2007. Two high-amylose maize starches with different amounts of resistant starch vary in their effects on fermentation, tissue and digesta mass accretion and bacterial populations in the large bowel of pigs. *Br. J. Nutr.*, 97:134–144.
- Chávez, D.E. 2011. Alimento en pasta para cerdos. *MX 327813 B*. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Gaceta de la Propiedad Industrial.
- Fuentes-Zaragoza, E., Sánchez-Zapata, E., Sendra, E., Sayas, E., Navarro, C., Fernández-López, J., Pérez-Alvarez, J.A., 2011. Resistant starch as prebiotic: a review. *Starch*, 63: 406–415.
- Hoseney, R.C. 1998. Principles of cereal science and technology. Department of Grain Science and Industry. Kansas State University. Estados Unidos.
- Regmi, P.R., Van Kempen, T.A.T.G., Matte, J.J., Zijlstra, R.T., 2011. Starch with high amylose and low in vitro digestibility increases short-chain fatty acid absorption, reduces peak insulin secretion, and modulates incretin secretion in pigs. *J. Nutr.*, 141: 398–405.
- Wang, J.F., Zhu, Y.H., Li, D.F., Wang, M., Jensen, B.B. 2004. Effect of type and level of dietary fiber and starch on ileal and fecal microbial activity and short-chain fatty acid concentrations in growing pigs. *Anim. Sci.*, 76:109–117.