



Evaluación de las características fisicoquímicas y digestibilidad de un extrudido con frijol común para cerdos

Elia E Araiza-Rosales¹ ; J. Natividad Gurrola-Reyes² ; Francisco O. Carrete-Carreón³ ;
Juan F Sánchez-Arroyo³ ; Carlos U Haubi-Segura⁴ ; Oscar G Alaniz-Villanueva⁵ ;
Damián Reyes-Jáquez^{6*} 

¹Universidad Juárez del estado de Durango, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Durango, México.

²Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR-IPN), Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Durango, México.

³Universidad Juárez del estado de Durango, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, México.

⁴Universidad Autónoma de Aguascalientes, Departamento de Disciplinas Pecuarias, Centro de Ciencias Agropecuarias, México.

⁵Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana-Tecnológico Nacional de México. Durango, México.

⁶Instituto Tecnológico de Durango-Tecnológico Nacional de México. Durango, México.

*Correspondence: damian.reyes@itdurango.edu.mx

Recibido: Septiembre 2020; Aceptado: Junio 2021; Publicado: Noviembre 2021.

RESUMEN

Objetivo. Evaluar las propiedades fisicoquímicas, digestibilidad *In vitro* y digestibilidad aparente de nitrógeno en materia fecal y orina de cerdos de un alimento extrudido usando frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) como sustituto de harina de soya. **Materiales y métodos.** Se estandarizó el proceso de extrusión para dos formulaciones de harina de frijol (Pinto Saltillo), harina de maíz (Cafime) y harina de soya a diferentes proporciones: 20/67/13% y 30/60/10%, respectivamente. Las muestras se procesaron en un extrusor monotornillo a 120-150°C y 18-22% de contenido de humedad. Las propiedades fisicoquímicas evaluadas fueron: índice de expansión, densidad aparente, índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua, dureza, actividad de agua y parámetros de color: L^* , a^* y b^* . La digestibilidad *In vitro* y digestibilidad aparente de nitrógeno en materia fecal y orina de cerdos se evaluaron usando el tratamiento óptimo previamente obtenido buscando disminuir costos de procesamiento. **Resultados.** Las condiciones óptimas para la formulación de 20% de harina de frijol fueron 124.4°C y 18.59% de contenido de humedad. La temperatura de extrusión redujo la densidad aparente, dureza y actividad de agua, pero incrementó L^* y el índice de expansión. El contenido de humedad redujo la densidad aparente, actividad de agua, dureza y a^* . La digestibilidad *In vitro* de materia seca fue mayor para la dieta de frijol extrudido en comparación a la dieta control (92.33% vs. 85.33%). **Conclusiones.** Los resultados indican que la harina de frijol es una opción viable para el consumo animal en términos de valor nutricional y digestibilidad.

Palabras clave: Ganado monogástrico; contenido de nitrógeno; propiedades fisicoquímicas; extrusión; estandarización (*Fuente: USDA*).

Como citar (Vancouver).

Araiza-Rosales EE, Gurrola-Reyes JN, Carrete-Carreón FO, Sánchez-Arroyo JF, Haubi-Segura CU, Alaniz-Villanueva OG, Reyes-Jáquez D. Evaluación de las características fisicoquímicas y digestibilidad de un extrudido con frijol común para cerdos. Rev MVZ Córdoba. 2022; 27(1):e2172. <https://doi.org/10.21897/rmvz.2172>



©El (los) autor (es) 2021. Este artículo se distribuye bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), que permite a otros distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de su obra de modo no comercial, siempre y cuando den crédito y licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

ABSTRACT

Objective. To evaluate the physicochemical properties, *In vitro* dry matter digestibility, and apparent nitrogen digestibility in fecal matter and urine of pigs of an extruded feed using common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as a soybean meal substitute. **Materials and methods.** The standardization of the extrusion process was performed for two formulations of bean flour (Pinto Saltillo), cornflour (Cafime), and soybean meal at different proportions: 20/67/13% and 30/60/10%, respectively. Samples were processed in a single screw extruder at 120-150°C and a moisture content of 18-22%. The evaluated physicochemical properties were expansion index, bulk density, water absorption index, water solubility index, hardness, water activity, and color parameters: L^* , a^* , and b^* . The *In vitro* dry matter digestibility and apparent nitrogen digestibility in fecal matter and urine of pigs were evaluated using the optimal treatment previously obtained by seeking to decrease processing costs. **Results.** Optimal conditions for the 20% bean flour formulation were: Temperature of 124.4°C and moisture content of 18.59%. Extrusion temperature decreased bulk density, hardness, and water activity, but increased L^* and expansion index. Moisture content decreased bulk density, water activity, hardness, and a^* . *In vitro* dry matter digestibility was higher for the extruded bean diet compared to the control diet (92.33% vs. 85.33%). **Conclusions.** Results indicated that bean flour is a viable option for animal consumption in terms of nutritional value and digestibility.

Keywords: Monogastric livestock; nitrogen content; physicochemical properties; extrusion; standardization (Source: USDA).

INTRODUCCIÓN

La producción de cerdos demanda ingredientes de alta calidad, un amplio margen de seguridad alimentaria y sanitaria y un cuidado meticuloso (1). La composición química de los ingredientes de la formulación es uno de los elementos más decisivos que determinan la eficiencia en el uso del alimento. Sin embargo, la estructura y forma del alimento también son importantes para el uso óptimo de los nutrientes (2). En tal sentido, el uso de fuentes alternativas en la alimentación de cerdos es una estrategia muy adecuada ya que permite obtener sistemas de producción viables que contribuyan a la conservación ambiental y que no compitan directamente con la dieta humana (3). Leguminosas tales como el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) son una fuente de proteínas, minerales (hierro y fósforo), vitaminas y energía (4). Después de la cosecha, las máquinas tamizadoras se usan para cribar, limpiar y empacar frijoles, como resultado, 5-10% de la cosecha total es deficiente, quebrada y/o de tamaño insuficiente (también conocida como "granza"), lo cual usualmente no es usado para consumo humano, y, en algunos lugares, incluso es considerado un subproducto industrial y una pérdida económica (5). Por otra parte, su utilización en la alimentación en estado crudo es limitada, debido a su contenido de factores antinutricionales, tales como fitohemaglutininas y lectinas. Sin embargo, el uso de este frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en dietas para cerdos

podría representar una buena fuente de proteína alternativa ya que ofrece una ventaja económica por encima del uso de otras fuentes de proteína comunes, tal como la harina de soya (SBM), lo cual hace al frijol "granza" una alternativa atractiva. Además, la extrusión es una alternativa de procesamiento factible para la utilización de la "granza" debido a su capacidad para desarrollar productos de alta calidad nutricional, ya que minimiza la degradación de nutrientes y añade características de aceptabilidad mientras que ofrece ventajas, tales como bajo consumo de energía y tiempos cortos de procesamiento. El efecto perjudicial de los factores antinutricios, tales como los inhibidores de tripsina en frijoles, pueden ser reducidos hasta en un 80-90% debido a la desactivación térmica (6).

El valor nutricional de una ración, alimento o nutriente puede ser expresado a través de su coeficiente de digestibilidad, que es la proporción del alimento que no es excretada y que se asume que se absorbe en el tracto digestivo. El coeficiente de digestibilidad está estrechamente relacionado al valor nutricional de los alimentos. La cantidad y tipo de excreción de materia fecal en cerdos depende de varios factores, tales como la edad, ambiente, raza y la naturaleza de la dieta. Por lo tanto, es esencial estudiar el uso de nutrientes de dietas para diseñar formulaciones balanceadas para la alimentación de cerdos (7). El objetivo de esta investigación fue evaluar las propiedades fisicoquímicas, digestibilidad *In vitro*

de materia seca y la digestibilidad aparente de nitrógeno en materia fecal y orina de cerdos de un alimento extrudido usando frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) como sustituto de harina de soya.

MATERIALES Y MÉTODOS

Desarrollo del estudio. La primera etapa consistió en la estandarización del alimento balanceado con la inclusión de granza de frijol en la dieta. Dos fórmulas diferentes usando harina de maíz (*Zea mays*, variedad Cafime, CF), harina de granza de frijol (*Phaseolus vulgaris* L., variedad Pinto Saltillo, BF) y harina de soya (*Glycine max* L., SBM); se prepararon utilizando las siguientes proporciones: (BF/CF/SBM) 20/67/13% and 30/60/10%, respectivamente. La formulación se balanceó a aproximadamente 13% de contenido de proteína cruda para satisfacer los requerimientos nutricionales de cerdos <6 meses (8). Una dieta control fue compuesta de maíz molido, SBM y salvado de trigo (Tabla 1).

Tabla 1. Ingredientes de las dietas experimentales.

Ingredientes	Componente (g/100g)		
	Dieta control	Dieta extrudida (20/67/13% CF/BF/SBM)	Dieta extrudida (30/60/10% CF/BF/SBM)
Maíz molido	72.5	64.0	57.0
Harina de frijol extrudido	-	20.5	30.0
Harina de soya	20.5	12.5	10.0
Salvado de trigo	4.0	-	-
Mezcla de vitaminas-minerales	3.0	3.0	3.0

Extrusión. Todos los ingredientes se molieron por separado (Lab Mill 3600, Perten Instruments AB, Suecia) a 1680 rpm y pasados a través de un tamiz malla 40 (0.420 mm). El contenido de humedad de todos los tratamientos se ajustó siguiendo el diseño experimental descrito en las Tablas 2 y 3, atomizando agua destilada en cada muestra y fue mezclada a mano por 15 min. Se permitió que el agua se difundiera por al menos 12 h y las muestras se mantuvieron en bolsas selladas de poliuretano a 4°C antes de ser procesadas. La cocción por extrusión

se llevó a cabo en un extrusor Brabender de husillo simple (Modelo E 19/25 D, Instruments Inc., South Hackensack, NJ) con una relación de compresión del husillo de 1:1, relación de longitud/diámetro (L/D) de 20:1 y un diámetro del dado de salida de 6 mm. La velocidad del husillo fue de 150 rpm para evitar oclusiones. El perfil de temperaturas en el extrusor fue de 90, 100 y 110°C en las primeras tres zonas de calentamiento, respectivamente, y la zona final de calentamiento varió siguiendo el diseño experimental (Tablas 2 y 3). La tolva de alimentación del extrusor se ajustó a una velocidad constante de 60 rpm. Después del procesamiento, los extrudidos fueron secados en un horno de convección (Fabbe modelo 170) a 60°C por 4 h, siguiendo el método de Höglound et al (9) y enfriados a temperatura ambiente y colocados en bolsas de plástico para su almacenamiento a 4°C hasta análisis posteriores.

Tabla 2. Factores y niveles de variación del diseño experimental para dos factores ($\alpha=1.41421$).

Factores	Niveles de variación				
	- α	-1	0	+1	+ α
Temperatura (°C)	120	125	135	145.6	150
Humedad (%)	18	18.6	20	21.4	22

Diseño experimental. Se realizó un diseño central compuesto rotatable con la temperatura en el dado de salida (X_1) y el contenido de humedad (X_2) como variables independientes. Un conjunto de once tratamientos fue generado para cada dieta: 20/67/13% y 30/60/10% (CF/BF/SBM respectivamente, Tabla 3). Las variables de respuesta fueron BD, EI, WAI, WSI, H, a_w y parámetros de color (L^* , a^* y b^*). El diseño experimental se realizó utilizando Design-Expert 7.0.0® (State-Ease Inc., Minneapolis, MN, USA).

Tabla 3. Diseño central compuesto para el proceso de extrusión.

Tratamiento	Variables independientes			
	Codificadas		Sin codificar	
	X_1	X_2	Temp [°C]	Humedad [%]
1	1.414	0	135	20
2	0	1.414	125	18.6
3	1	-1	150	20
4	0	0	135	22
5	0	0	135	20
6	-1	1	135	20
7	-1	-1	135	18
7	-1	-1	120	20
9	0	-1.414	145.6	18.6
10	1	1	145.6	21.4
11	0	0	125	21.4

Propiedades fisicoquímicas. Todas las muestras extrudidas fueron analizadas para las siguientes propiedades fisicoquímicas:

El índice de expansión (EI) y la densidad aparente (BD) se obtuvieron siguiendo el método de Oke et al (10) (Ecuaciones 1 y 2, respectivamente).

$$E = D/d \quad (1)$$

Donde D = diámetro promedio del extrudido y d = diámetro interno de la salida del extrusor. Se midieron el diámetro (d) y la longitud (l) de 10 muestras seleccionadas aleatoriamente. Después, cada extrudido fue pesado (Pm) para determinar la densidad utilizando la Ecuación 2. Los resultados fueron expresados en g/cm³.

$$BD = Pm / (\pi(d/2)^2 l) \quad (2)$$

El índice de absorción de agua (WAI) y el índice de solubilidad en agua (WSI) fueron determinados siguiendo el método propuesto por Qing-Bo et al (11). La dureza fue evaluada utilizando un Analizador Universal de Textura TA-XT2 (Texture Technologies Corp., Scarsdale, NY/ Stable MicroSystems, Haslemere, Surrey, UK) (12). La actividad de agua (a_w) fue determinada utilizando un higrómetro electrónico (Rotronic AG, Bassersdorf, Suiza). El color fue determinado usando un colorímetro Hunter lab (MiniScan Hunter Lab, model 45/0L, Hunter Associates Lab., Inc., Reston, Virginia). Los valores de L (claridad), a* (cromaticidad rojo-verde) y b* (cromaticidad amarillo-azul) fueron obtenidos basándose en el sistema CIEL*a*b* (13).

Composición química. Los procedimientos de la AOAC (14) fueron utilizados para evaluar el contenido de humedad (925.09B), proteína cruda (CP, 992.23), grasa cruda (920.39C) y contenido de ceniza (923.03) de las materias primas, dieta extrudida óptima y una dieta comercial que fue utilizada como control. La energía digestible (DE) y energía metabolizable (ME) fueron calculadas de acuerdo con el Requerimiento de Nutrientes de los Cerdos (8).

Optimización numérica. Se realizó una superposición de superficie de respuesta para cada tratamiento. El análisis de datos se realizó utilizando regresiones cuadráticas múltiples (Ecuación 3). Los datos experimentales se ajustaron a los modelos seleccionados y se obtuvieron los coeficientes de regresión. Las

significancias estadísticas de los términos de regresión fueron examinadas mediante análisis de varianza (ANOVA) para cada respuesta (p<0.05).

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2 + B_{12} X_1 X_2 \quad (3)$$

Donde Y es la respuesta, X₁ temperatura, X₂ contenido de humedad y B₀, B₁, B₂, B₁₁, B₂₂ y B₁₂ son los coeficientes de regresión.

Digestibilidad *In vitro* de materia seca (IVDMD) y digestibilidad aparente de nitrógeno en materia fecal y orina.

En la segunda etapa de la investigación, la digestibilidad *In vitro* de materia seca y la digestibilidad aparente de nitrógeno en materia fecal y orina de cerdos alimentados con el tratamiento óptimo previamente obtenido fueron analizados siguiendo el procedimiento de Mireles et al (15). Para evaluar la digestibilidad aparente de nitrógeno, ocho cerdos macho York-Landrace castrados de tres meses de edad (30±5 kg) fueron alojados y alimentados individualmente utilizando ambas dietas: la dieta control y la dieta óptima extrudida (20/67/13% CF/BF/SBM) durante doce días (siete días de adaptación y cinco días de recolección de excremento y orina). Las heces fueron recolectadas diariamente mediante el método de recolección total a las 8:00 a.m. (15). El alimento fue suministrado dos veces al día a las 8:00 y 16:00. A lo largo del experimento, los cerdos tuvieron acceso libre al agua (16). De cada animal, se recolectó una muestra representativa de 100 g de excreta fresca/d, la cual se almacenó a -20°C. La excreta fue secada a 55°C por 48 h y molida (Lab Mill 3600, Perten Instruments AB, Suecia) a 1680 rpm y pasada a través de un tamiz malla 40 (0.420 mm). Los siguientes análisis se realizaron en las muestras de las heces: Materia seca (#930.15) y nitrógeno total por el método de Kjeldahl (#990.03) de acuerdo con los métodos de la AOAC (14). Para calcular la digestibilidad aparente del nitrógeno en la materia fecal y orina, se utilizaron los métodos de Caicedo et al (17) y O'Quinn et al (18) (Ecuación 4).

$$FAD (\%) = (Nc - Ne) / Nc \quad (4)$$

Donde FAD = digestibilidad aparente de nitrógeno en la dieta, Nc = nitrógeno consumido y Ne = nitrógeno excretado.

RESULTADOS

Propiedades fisicoquímicas. Los coeficientes de regresión de las propiedades fisicoquímicas y los parámetros obtenidos de los análisis de color de todos los tratamientos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Análisis de varianza de la temperatura de extrusión, contenido de humedad y concentración de frijol.

Respuesta	R ²	CV	SD	SEM	Valor F	Valor p
BD	0.62	5.59	0.059	0.024	3.04	0.0365
EI	0.58	3.35	0.038	0.016	2.49	0.0696
WAI	0.50	4.03	0.041	0.017	1.78	0.1687
WSI	0.52	5.36	0.270	0.110	1.97	0.1325
H	0.54	26.08	19.800	8.080	2.04	0.1221
aw	0.25	16.12	0.064	0.026	0.54	0.7885
L*	0.60	6.18	0.980	0.400	2.44	0.0737
a*	0.40	1.00	0.320	0.130	1.07	0.4286
b*	0.25	11.66	1.250	0.510	0.48	0.8371

CV= coeficiente de variación, SD= desviación estándar, SEM= error estándar de la media, BD= densidad aparente, EI= índice de expansión, WAI= índice de absorción de agua, WSI= índice de solubilidad en agua, H= dureza, aw= actividad de agua, L*= luminosidad, a*= cromaticidad rojo/verde y b*= cromaticidad amarillo/azul.

Las Tablas 5 y 6 muestran una comparación de las propiedades fisicoquímicas entre tratamientos a diferentes condiciones de procesamiento para ambas formulaciones.

Optimización numérica. Se llevó a cabo mediante superposición de superficies de respuesta para cada tratamiento evaluado. Las condiciones óptimas de procesamiento para ambas formulaciones fueron: temperatura de 124.4°C y contenido de humedad de 18.59% con las siguientes respuestas: WAI 1.022 g/g, WSI 5.07% y H 78.51 N. Sólo la dieta 20/67/13% CF/BF/SBM fue completamente evaluada debido a que pruebas preliminares mostraron un alto contenido de factores antinutricios para la dieta 30/60/10% CF/BF/SBM, posiblemente como resultado de una cocción deficiente y el mayor contenido de harina de frijol.

Composición química. Las composiciones químicas de los ingredientes, alimento óptimo extrudido y un alimento comercial se muestran en la Tabla 7. El contenido de proteína de la harina de frijol (22%) estuvo dentro de otros valores reportados (4). El alimento óptimo extrudido contuvo la cantidad de proteína requerida para cerdos en etapa de crecimiento (15-18%). El bajo contenido de grasa presente en el alimento comercial podría ser explicado debido al bajo contenido de grasa en la harina de soya, uno de sus ingredientes principales.

Tabla 5. Determinación de las propiedades fisicoquímicas de los tratamientos de extrudidos a diferentes temperaturas de extrusión, contenido de humedad y concentración de frijol.

Tratamientos	BD (kg/cm ³)	EI (-)	WAI (g/g)	WSI (%)	H (N)	A _w (-)
20/67/13% (BF/CF/SBM)						
1	0.98 ± 0.046 ^{cdef}	1.18 ± 0.032 ^{bc}	1.06 ± 0.121 ^{ab}	4.79 ± 0.672 ^{ab}	53.91 ± 6.349 ^{fg}	0.38 ± 0.004 ^b
2	1.02 ± 0.088 ^f	1.18 ± 0.038 ^b	0.96 ± 0.051 ^{ab}	4.66 ± 0.082 ^{ab}	67.64 ± 9.455 ^j	0.35 ± 0.002 ^{kl}
3	0.97 ± 0.052 ^{bcde}	1.2 ± 0.033 ^{bc}	1.02 ± 0.029 ^b	4.84 ± 0.083 ^b	46.23 ± 5.780 ^{hg}	0.34 ± 0.002 ^{kl}
4	1.02 ± 0.082 ^{cdef}	1.16 ± 0.041 ^{bc}	1.03 ± 0.068 ^{ab}	5.25 ± 0.218 ^b	68.88 ± 6.713 ^{hg}	0.34 ± 0.003 ^j
5	1.18 ± 0.077 ^{bcd}	1.07 ± 0.023 ^{def}	1.05 ± 0.098 ^b	5.20 ± 1.013 ^{ab}	98.97 ± 6.568 ^{ij}	0.35 ± 0.001 ^{ij}
6	1.06 ± 0.028 ^{ef}	1.18 ± 0.081 ^{bc}	0.93 ± 0.027 ^{ab}	4.70 ± 0.048 ^{ab}	59.64 ± 7.636 ^{hi}	0.34 ± 0.004 ^g
7	1.05 ± 0.095 ^g	1.17 ± 0.039 ^a	0.99 ± 0.088 ^{ab}	5.08 ± 0.181 ^{ab}	61.88 ± 8.553 ^e	0.47 ± 0.007 ^l
8	1.12 ± 0.068 ^{def}	1.14 ± 0.026 ^{bc}	0.93 ± 0.038 ^{ab}	5.18 ± 0.409 ^b	47.13 ± 7.291 ^{ef}	0.35 ± 0.001 ^j
9	0.88 ± 0.100 ^{def}	1.26 ± 0.036 ^{bcd}	1.04 ± 0.107 ^{ab}	4.76 ± 0.615 ^{ab}	72.08 ± 8.224 ^{ef}	0.33 ± 0.005 ^{ij}
10	1.06 ± 0.086 ^{ab}	1.18 ± 0.079 ^f	1.01 ± 0.019 ^{ab}	4.65 ± 0.892 ^{ab}	58.99 ± 10.066 ^{bc}	0.35 ± 0.005 ^{jk}
11	1.06 ± 0.081 ^{cdef}	1.16 ± 0.038 ^{bcd}	1.01 ± 0.047 ^{ab}	5.68 ± 0.864 ^a	94.98 ± 7.296 ^c	0.34 ± 0.003 ^{kl}

30/60/10% (BF/CF/SBM)						
1	1.14 ± 0.104 ^{bc}	1.08 ± 0.054 ^{ef}	1.04 ± 0.089 ^{ab}	5.32 ± 0.805 ^{ab}	105.74 ± 13.50 ^b	0.48 ± 0.003 ^b
2	1.02 ± 0.130 ^{def}	1.14 ± 0.061 ^{cd}	1.05 ± 0.030 ^{ab}	4.95 ± 0.117 ^{ab}	78.81 ± 11.902 ^d	0.48 ± 0.002 ^b
3	1.07 ± 0.149 ^{def}	1.15 ± 0.081 ^{bcd}	1.04 ± 0.142 ^a	4.75 ± 0.229 ^{ab}	82.28 ± 4.582 ^d	0.52 ± 0.002 ^a
4	1.04 ± 0.079 ^{bcdef}	1.13 ± 0.034 ^{cde}	1.09 ± 0.008 ^{ab}	4.84 ± 0.046 ^{ab}	68.47 ± 6.618 ^{ef}	0.44 ± 0.003 ^d
5	1.12 ± 0.091 ^{bcd}	1.11 ± 0.060 ^{def}	1.04 ± 0.040 ^{ab}	4.68 ± 0.136 ^b	105.80 ± 11.43 ^{b7}	0.45 ± 0.002 ^c
6	1.04 ± 0.107 ^{cdef}	1.15 ± 0.058 ^{bcd}	1.02 ± 0.044 ^{ab}	4.85 ± 0.191 ^{ab}	59.14 ± 5.551 ^{hg}	0.41 ± 0.001 ^f
7	1.03 ± 0.162 ^{ef}	1.18 ± 0.102 ^{bc}	1.04 ± 0.088 ^{ab}	4.76 ± 0.181 ^{ab}	47.13 ± 6.568 ^{ij}	0.36 ± 0.003 ⁱ
8	1.01 ± 0.089 ^{ef}	1.17 ± 0.040 ^{bc}	0.96 ± 0.038 ^{ab}	4.66 ± 0.409 ^b	59.09 ± 5.222 ^{hg}	0.34 ± 0.001 ^k
9	1.08 ± 0.171 ^{bcde}	1.13 ± 0.071 ^{cde}	1.06 ± 0.041 ^{ab}	4.73 ± 0.200 ^{ab}	115.24 ± 15.116 ^a	0.42 ± 0.005 ^e
10	1.24 ± 0.140 ^a	1.06 ± 0.060 ^f	1.07 ± 0.116 ^{ab}	4.82 ± 0.031 ^{ab}	103.71 ± 10.721 ^b	0.37 ± 0.002 ^h
11	1.12 ± 0.080 ^{bcd}	1.10 ± 0.057 ^{def}	1.10 ± 0.111 ^a	5.62 ± 0.756 ^{ab}	114.77 ± 7.716 ^a	0.44 ± 0.001 ^c

± SD = desviación estándar, BF = harina de frijol (%). Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$). BD= densidad aparente, EI= índice de expansión, WAI= índice de absorción de agua, WSI= índice de solubilidad en agua, H= dureza, A_w = actividad de agua

Tabla 6. Determinación de los parámetros de color de los tratamientos extrudidos a diferentes temperaturas de extrusión, contenidos de humedad y concentraciones de frijol.

Tratamientos	L*	a*	b*
20/67/13% (BF/CF/SBM)			
1	15.41 ± 0.086 ^{bcde}	32.08 ± 0.207 ^{abc}	13.16 ± 1.309 ^{cd}
2	15.56 ± 0.600 ^h	31.94 ± 0.262 ^a	11.55 ± 0.815 ^{cde}
3	15.47 ± 0.535 ^{bcde}	31.82 ± 0.072 ^{bcdef}	10.24 ± 0.255 ^{def}
4	14.5 ± 0.472 ^{cdef}	32.07 ± 0.145 ^{abcde}	12.21 ± 0.650 ^{cde}
5	14.81 ± 0.573 ^{ab}	32 ± 0.050 ^{bcdef}	12.09 ± 0.600 ^{ab}
6	16.9 ± 0.362 ^{fgh}	31.62 ± 0.185 ^{abcde}	10.75 ± 0.293 ^a
7	16.54 ± 0.423 ^h	31.91 ± 0.180 ^{fg}	12.9 ± 0.345 ^{efg}
8	16.53 ± 0.482 ^{def}	31.63 ± 0.193 ^{bcdef}	11.75 ± 0.145 ^{bcd}
9	15.25 ± 0.340 ^h	31.36 ± 0.174 ^{abcde}	10.09 ± 0.347 ^{bc}
10	16.52 ± 0.205 ^h	31.71 ± 0.145 ^{ab}	10.54 ± 0.359 ^{bcd}
11	15.35 ± 0.614 ^h	31.56 ± 0.032 ^{defg}	10.19 ± 0.249 ^{efg}
30/60/10% (BF/CF/SBM)			
1	18.94 ± 1.045 ^a	31.18 ± 0.343 ^{cdefg}	9.75 ± 0.379 ^{fgh}
2	15.77 ± 0.080 ^{efg}	31.62 ± 0.118 ^{abcde}	10.17 ± 0.416 ^{efg}
3	15.26 ± 0.269 ^{gh}	31.86 ± 0.205 ^{bcdef}	8.89 ± 0.475 ^{hi}
4	14.61 ± 0.704 ^{fgh}	32.05 ± 0.233 ^{abcde}	10.36 ± 0.131 ^{fgh}
5	17.28 ± 0.370 ^{ab}	31.42 ± 0.121 ^{efg}	10.02 ± 0.350 ^{ghi}
6	16.97 ± 0.197 ^{abcd}	31.76 ± 0.202 ^{cdefg}	10.6 ± 0.477 ^{efg}
7	15.62 ± 0.373 ^{gh}	31.71 ± 0.145 ^{bcdef}	10.57 ± 0.153 ^{efg}
8	17.66 ± 0.530 ^{abc}	31.01 ± 0.259 ^g	9.7 ± 0.300 ^{ghi}
9	13.54 ± 0.327 ⁱ	32.26 ± 0.210 ^{ab}	10.48 ± 0.437 ^{gh}
10	15.39 ± 0.477 ^{efg}	31.67 ± 0.073 ^{bcdef}	9.11 ± 0.055 ⁱ
11	15.99 ± 0.513 ^{def}	32.24 ± 0.284 ^{abcd}	10.03 ± 0.128 ^{ghi}

± SD = desviación estándar, BF = harina de frijol (%). Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$). L* = luminosidad, a* = cromaticidad rojo/verde y b* = cromaticidad amarillo/azul.

Tabla 7. Composición química de ingredientes, alimento extrudido óptimo (20/67/13% CF/BF/SBM) y alimento control (g/100 g DM).

Muestra	Proteína cruda	Extracto etéreo	Fibra cruda	Ceniza	NFE
Harina de maíz	9.7 ±0.76	3.5 ±0.13	6.0 ±0.53	1.5 ±0.08	85.3 ±0.93
Harina de frijol	24.3 ±0.26	1.4 ±0.03	4.9 ±0.32	3.9 ±0.22	70.4 ±0.52
Harina de soya	51.2 ±3.72	2.3 ±0.14	4.6 ±0.11	6.0 ±0.07	40.5 ±3.85
Alimento comercial	14.8 ±0.76	1.9 ±0.04	3.9 ±0.21	3.9 ±0.38	79.4 ±1.38
Alimento extrudido	17.5 ±0.38	4.0 ±0.83	7.8 ±0.07	1.4 ±0.11	75.1 ±1.27

±SD = desviación estándar, NFE = extracto libre de nitrógeno, DM = materia seca

Digestibilidad In vitro de materia seca (IVDMD) y digestibilidad aparente de nitrógeno en materia fecal y orina. La digestibilidad In vitro de materia seca (IVDMD) fue mayor para la dieta extrudida de frijol en comparación con la dieta comercial (92.33 vs. 85.33, SEM 0.929, $p < 0.001$). Lo último podría ser explicado debido a que el tratamiento térmico destruye o modifica ciertas propiedades antinutricias del frijol común, lo cual podría limitar la velocidad de la degradación enzimática en el ensayo. Por otro lado, la digestibilidad aparente del nitrógeno en la materia fecal fue mayor para la dieta comercial pero menor en la digestibilidad aparente del nitrógeno en la orina, comparada con la dieta de frijol extrudido (Tabla 8).

Tabla 8. Digestibilidad In vitro de materia seca (IVDMD) y digestibilidad aparente de nitrógeno en materia fecal y orina para cerdos en crecimiento.

Dieta	IVDMD (%)	DNM	DAN
Dieta control	85.33 ±0.488 ^b	90.05 ±0.713 ^a	98.630 ±0.993 ^a
Dieta óptima extrudida (20/67/13 CF/BF/SBM)	92.33 ±0.342 ^a	84.87 ±1.570 ^b	99.371 ±1.871 ^b
SEM	0.929	1.048	0.074
Valor P	0.0065	0.0011	0.0000

DNM: Digestibilidad aparente de nitrógeno en materia fecal (%); DAN: Digestibilidad aparente de nitrógeno en orina (%); *SEM: error estándar de la media; Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$).

La SBM tiene un alto contenido de proteína degradable, por lo tanto, es seguro asumir que la dieta comercial utilizada en estos experimentos (72.5% de SBM) también tendrá una alta degradabilidad (90.5%). La inclusión de 20.5% de frijol común extrudido en la dieta mostró una degradabilidad ligeramente menor (84.87%), aunque aún no es posible evaluar si esta reducción es debido a la naturaleza del sustrato o a una posible reducción en la degradabilidad debido al daño térmico a los complejos de proteína (e.g. reacciones de Maillard) durante su preparación.

DISCUSIÓN

Con respecto a los coeficientes de regresión de las propiedades fisicoquímicas (Tabla 4), T en su término lineal y MC en su término cuadrático tuvieron un efecto significativo negativo ($p < 0.05$) sobre BD, posiblemente debido a que altas temperaturas y contenidos de humedad generan más vapor durante el procesamiento por extrusión, llevando a una ruptura de las paredes celulares y a un producto final más expandido y menos denso, lo cual también se relaciona con EI y el efecto significativo positivo ($p < 0.05$) de MC en su término cuadrático; una mayor cantidad de vapor generará un extrudido más voluptuoso (3). Sin embargo, para EI, la interacción T y MC presentó un efecto significativo negativo ($p < 0.05$). Oke et al (10) concluyó que un MC reducido, incrementa la fuerza de arrastre y por lo tanto ejerce más presión en el dado, resultando en una mayor expansión del producto final. Para WSI, sólo MC en su término cuadrático tuvo un efecto significativo negativo ($p < 0.05$); menor MC podría haber incrementado la fuerza de arrastre en el dado de salida, resultando en un almidón más gelatinizado. Para H, ambos términos cuadráticos de T y MC mostraron efectos significativos negativos ($p < 0.05$); el decremento en H con un incremento de T podría deberse a mayores expansiones a temperaturas elevadas (12). Además, un incremento en MC disminuye la expansión lateral debido a la plastificación de la masa fundida (19). El término cuadrático de T presentó un efecto significativo positivo ($p < 0.05$) sobre L*, esto puede deberse a la formación de pigmentos marrones a través de reacciones de Maillard no enzimáticas entre proteínas y azúcares reductores que ocurren durante el procesamiento por extrusión. El término cuadrático de MC presentó un efecto significativo negativo ($p < 0.05$) sobre a*,

indicando que a alto MC, disminuye la coloración rojiza, lo que contradice los resultados obtenidos de Do Carmo et al (20).

Las propiedades fisicoquímicas de productos extrudidos tienen un impacto directo sobre su aceptabilidad y son un indicador de su calidad nutricional. Los cambios en sus propiedades funcionales, tales como EI y BD de los productos extrudidos ocurren debido a las transformaciones estructurales del almidón (21). El término cuadrático de MC mostró un efecto significativo positivo sobre EI, lo cual concuerda con otros reportes. La presencia de fibras y proteínas en la fórmula tiende a generar productos con bajo EI debido a la interacción de estos componentes con el almidón, más aun, la fibra puede romper las paredes celulares, evitando la formación de burbujas (2). Los resultados obtenidos de BD concuerdan con Sobuñola et al (22), quienes encontraron que incrementar la temperatura decrece significativamente BD, indicando que EI y BD dependen de la temperatura de extrusión (23) ya que BD está directamente relacionada a la expansión producida durante la extrusión.

Los productos con alta BD indican una matriz proteica más uniforme y continua, resultando en un extrudido más denso con capas paralelas, sin bolsas de aire ni hinchamiento después de la hidratación (24). Incrementar MC de 18 a 22% produjo un decremento en EI de pasta a base de almidón de ñame (22). Filli et al (25) reportaron que materiales alimentarios con bajo MC tienden a ser más viscosos y la diferencia de presión puede llevar a un producto menos expandido. EI se relaciona con la densidad aparente (26). Los coeficientes de regresión indican que la temperatura y MC tienen una correlación positiva con EI. Algunos de los factores que afectan EI durante el procesamiento por extrusión son el tipo de extrusor, velocidad del husillo y configuración del husillo, contenido de humedad, tiempo de residencia, presión, perfil de temperatura y velocidad de alimentación (27).

El índice de absorción de agua (WAI) y el índice de solubilidad en agua (WSI) están relacionados a las propiedades funcionales del almidón. WAI es utilizado como un indicador de degradación de componentes moleculares y depende de la disponibilidad de los grupos hidrofílicos y la capacidad gelificante de las macromoléculas (28).

WSI está asociado con la presencia de moléculas de almidón solubles, lo cual está estrechamente relacionado con la dextrinización (23). El

efecto negativo de MC sobre WSI podría estar relacionado con la presencia de agua durante la extrusión y al incremento de almidón gelatinizado junto con el decremento de proteínas desnaturalizadas, debido a la baja fuerza de corte generada por la disminución de la viscosidad en la mezcla. Los cambios en WSI son atribuidos al incremento del área superficial de los extrudidos y la fragmentación de cadenas de almidón al incrementar las energías térmicas de las moléculas. Las cadenas formadas durante el procesamiento son más pequeñas y tienden a volverse más solubles en agua; también, valores bajos de gelatinización de almidón son responsables de bajos WSI (3). Esto indica que a bajos MC, el efecto de la fricción predomina; a alto MC el efecto térmico predomina. Agyekum y Nyachoti (29) reportaron que la baja solubilidad de las dietas animales afecta negativamente su proceso de digestión. Los resultados obtenidos concuerdan con otros reportes (30), donde maíz extrudido presentó una mayor susceptibilidad a las enzimas y su solubilidad en agua es similar a la del maíz convencional.

La textura de los extrudidos es una característica física altamente relacionada a la composición de la fórmula, temperatura y contenido de humedad. Los resultados obtenidos de esta investigación muestran que incrementar T y MC disminuye H. Vukmirović et al (31) recomiendan procesamiento termomecánico para el consumo de dietas para cerdos debido a que facilita la digestión y ayuda a evitar enfermedades gastrointestinales que pudieran poner en peligro la salud del cerdo.

Los cambios de color durante el proceso de extrusión pueden indicar la severidad o intensidad del proceso debido a que relaciona los cambios químicos y nutricionales. La temperatura mostró un efecto adecuado sobre L^* , lo cual podría ser atribuido a la homogeneidad provocada por el proceso de extrusión. Los valores obtenidos de L^* oscilaron entre 13.38 y 18.94; tales valores bajos podrían relacionarse con las condiciones de procesamiento ya que éstas incrementan las reacciones entre aminoácidos y azúcares reductores, lo cual se traduce hacia la formación de compuestos coloridos. Los valores de a^* oscilaron entre 31.01 y 32.32, indicando que todos los tratamientos estuvieron en la clasificación del color rojo. Todos los valores de b^* fueron positivos, indicando una tendencia hacia la región amarilla. El color en los productos alimenticios puede influenciar la aceptabilidad o rechazo del consumidor. Durante

la cocción el procesamiento por extrusión, algún oscurecimiento puede ocurrir debido a las reacciones de Maillard, lo cual pudiera contribuir positivamente al sabor y aroma, como ocurre con el caramelo, café, pan y cereales (32).

Con respecto a la composición química, el contenido de proteína de BF (22%) concuerda con otros reportes (4), asegurando así la nutrición adecuada del cerdo, debido a que el tratamiento extrudido óptimo contiene el contenido de proteína necesario (15-18%) para cerdos en etapa de crecimiento. Debido a su composición de aminoácidos, BF representa una alternativa viable para alimentación porcina que podría sustituir a la proteína de soya como fuente de proteína, lo cual podría reducir los costos de producción.

El nitrógeno ingerido es esencial tanto para la síntesis de aminoácidos como para las bases nitrogenadas de ácidos nucleicos. La digestibilidad del nitrógeno y su asimilación por cerdos varía en gran medida entre los principales componentes de la formulación: de 85% en concentrados (granos de trigo y harina de soya) a 50-60% en alimentos fibrosos (DDGS, cáscara de soya, harina de alfalfa o pulpa de betabel). La digestibilidad del nitrógeno se relaciona a su unión con la pared celular, la cual puede variar según el recurso foliar (15). La producción diaria de excretas es una función del tipo y peso en vivo de cada especie animal, alimento consumido, temperatura y humedad del ambiente y de la cantidad de agua utilizada en producciones confinadas (33). Uno de los factores principales para evaluar el contenido energético de alimentos y forrajes es su digestibilidad. Por lo tanto, los ensayos *in vivo* son requeridos para evaluar la digestibilidad usando animales en periodos específicos de

producción y bajo condiciones controladas. Tales ensayos, aunque no son rutinariamente llevados a cabo, aún son la metodología de referencia. Las técnicas de digestibilidad *in vitro* son rápidas, de bajo costo y producen información que puede ser correlacionada a resultados *in vivo*, al menos desde el punto de vista de digestibilidad de materia orgánica y energía digestible en cerdos (19). En la producción ganadera, las pérdidas de nitrógeno ocurren a través de la orina y material fecal debido a una falta de retención. En promedio, un cerdo excreta más de la mitad del nitrógeno ingerido a través de la materia fecal y orina (30). Sin embargo, el nitrógeno endógeno y el nitrógeno microbiano en la materia fecal son pérdidas que podrían ser minimizadas.

En conclusión, la composición química de la fórmula óptima sin extrudir y extrudida indica que el contenido de proteína fue 18% mayor comparado con una dieta comercial para cerdos en etapa de crecimiento. Las condiciones óptimas de procesamiento se encontraron a 125°C y 18.6% de MC con un contenido de BF del 20%. Los resultados muestran que la inclusión de BF en alimentos para cerdos es una opción viable debido a que las características funcionales de los extrudidos evaluados son similares a las de alimentos comerciales existentes. La digestibilidad de la materia seca y la proteína cruda fueron elevadas tanto en dietas comerciales como en las extrudidas, sugiriendo que la última puede ser utilizada en la alimentación animal, aunque es necesaria más investigación en este campo.

Conflictos de interés

Ningún conflicto de interés fue reportado por los autores.

REFERENCIAS

1. Garcia-Gudiño J, Monteiro ANTR, Espagnol S, Blanco-Penedo I, Garcia-Launay F. Life cycle assessment of Iberian traditional pig production system in Spain. Sustainability. 2020; 12:627. <https://doi.org/10.3390/su12020627>
2. Ball MEE, Magowan E, McCracken KJ, Beattie VE, Bradford R, Thompson A, Gordon FJ. An investigation into the effect of dietary particle size and pelleting of diets for finishing pigs. Livest Sci. 2015; 173:48–54. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.11.015>

3. Jong-Bang E, Fy-Hung H, Ok-Ja Ch. Physicochemical properties of rice-based expanded snacks according to extrusion conditions. *J Korean Soc Food Sci Nutr.* 2014; 43(9):1407-1414. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2014.43.9.1407>
4. Celmeli TS, Hatice C, Huseyin S, Duygu A, Alper E, Tuba TC. The nutritional content of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Landraces in comparison to modern varieties. *Agron.* 2018; 8:166. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090166>
5. SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Acciones y Programas. Cierre de la producción agrícola. 2021. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
6. Olmolola OM, Faramade OO, Fagbemi TN. Effect of extrusion on protein quality, antinutritional factors, and digestibility of complementary diet from quality protein maize and soybean protein concentrate. *J Food Biochem.* 2018; 42(4):e12508. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12508>
7. Caicedo W, Sanchez J, Tapuy A, Vargas JC, Samaniego S, Valle S, Moyano J, Pujapat D. Apparent digestibility of nutrients in fattening pigs (Largewhite x Duroc x Pietrain), fed with taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) meal. Technical note. *Cuban J Agr Sci.* 2018; 52(2):181-186. <http://cjasience.com/index.php/CJAS/article/view/795>
8. National Research Council. Nutrient Requirements of Swine: Eleventh Revised Edition. Washington, DC: The National Academies Press; 2012. <https://doi.org/10.17226/13298>
9. Höglund E, Eliasson L, Oliveira G, Almlí VL, Sozer N. Effect of drying and extrusion processing on physical and nutritional characteristics of bilberry press cake extrudates. *J Food Sci Technol.* 2018; 92:422-428. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.042>
10. Oke MO, Awonorin SO, Sanni LO, Asiedu R, Aiyedun PO. Effect of extrusion variables on extrudates properties of water yam flour - a response surface analysis. *J Food Process Preserv.* 2012; 37:456-473. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2011.00661.x>
11. Qing-Bo D, Ainsworth P, Tucker G, Marson H. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. *J Food Eng.* 2005; 66:284-289. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.03.019>
12. Delgado E, Valles-Rosales DJ, Flores NC, Reyes-Jáquez D, Evaluation of fish oil content and cottonseed meal with ultralow gossypol content on the functional properties of an extruded shrimp feed. *Aquaculture Reports.* 2021; 19:100588. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100588>
13. Pathare P, Opara U, Al-Said F. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A Review. *Food Bioproc Tech.* 2013; 6:36-60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
14. AOAC. Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis. 21st ed. Gaithersburg, Maryland; 2019.
15. Mireles S, Moreno E, Samkol P, Caro Y, Ly J. Cut age and N balance in pigs fed with Moringa oleifera foliage meal. *Cuban J Agr Sci.* 2017; 51(2):191-196. <https://www.cjasience.com/index.php/CJAS/article/view/731>
16. Ly J, Reyes L, Delgado E, Ayala L, Castro M. 2013. Royal palm nut meal for fattening pigs. Influence of body weight on rectal digestibility and faecal output of materials. *Cuban J Agr Sci.* 2013; 7(3):283-287. <https://www.semanticscholar.org/paper/Royal-palm-nut-meal-for-fattening-pigs.-Influence-Ly-Reyes/cef699c533a645e9152fbc5ba867f7b646ed5f9d>
17. Caicedo W, Rodríguez R, Lezcano P, Ly J, Vargas JC, Uvidia H, Samaniego E, et al. Rectal digestibility of nutrients in growing pigs, fed with taro silage (*Colocasia esculenta* (L) Schott). Technical note. *Cuban J Agr Sci.* 2017; 51:337-341. <http://dx.doi.org/10.15381/rivep.v30i2.16078>
18. O'Quinn PR, Knabe DA, Gregg EJ. Efficacy of Natuphos in sorghum-based diets of finishing swine. *J Anim Sci.* 1997; 75(5):1299. <https://doi.org/10.2527/1997.7551299x>

19. Świąch E. Alternative prediction methods of protein and energy evaluation of pig feeds. *J Animal Sci Biotech*. 2017; 8:39. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0171-7>
20. Do Carmo SC, Varela P, Poudroux C, Dessev T, Myhrer K, Rieder A, Zobel H, Sahlstrøm S, Knutsen SH. The impact of extrusion parameters on physicochemical, nutritional and sensorial properties of expanded snacks from pea and oat fractions. *J Food Sci Technol*. 2019; 112:3620–3629. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-1739>
21. Alcázar-Alay SC, Almeida-Meireles MA. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. *Food Sci Technol*. 2015; 35(2):215–236. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457X.6749>
22. Sobuñola OP, Babajide JM, Ogunsade O. Effect of brewers spent grain addition and extrusion parameters on some properties of extruded yam starch-based pasta. *J Food Process Preserv*. 2013; 37(5):734–743. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00711.x>
23. Martynenko A. True, particle, and bulk density of shrinkable biomaterials: Evaluation from drying experiments. *Dry Technol*. 2014; 32:1319–1325. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.894522>
24. Kumar N, Sarkar BC, Sharma HK. Development and characterization of extruded product of carrot pomace, rice flour and pulse powder. *Adv J Food Sci*. 2010; 4:703–717. <https://doi.org/10.2202/1556-3758.1824>
25. Filli KB, Nkama I, Jideani VA. The effect of extrusion conditions on the physical and functional properties of millet – Bambara groundnut based fura. *Am J Food Sci Technol*. 2013; 1(4):87–101. <https://doi.org/10.1108/bfj-may-2010-0091>
26. Berna BB, Jae-Yoon H, Tugrul M, Erkan Y, Sueda C, Gi-Hyung R, Hamit K. Effects of cold extrusion process on thiamine and riboflavin contents of fortified corn extrudates. *Food Chem*. 2012. 132: 2165–2170. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.12.013>
27. Ratankumar-Singh RK, Majumdar RK, Venkateshwrlu G. Optimum extrusion-cooking conditions for improving physical properties of fish-cereal based snacks by response surface methodology. *J Food Sci Technol*. 2012; 51(9):1827–1836. <https://dx.doi.org/10.1007%2Fs13197-012-0725-9>
28. Oikonomou NA, Krokida MK. Water absorption index and water solubility index prediction for extruded food products. *Int J Food Prop*. 2012; 15(1):157–168. <https://doi.org/10.1080/10942911003754718>
29. Agyekum AK, Nyachoti CM. Nutritional and metabolic consequences of feeding high-fiber diets to swine: A review. *Engr*. 2017; 3:716–725. <https://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.010>
30. Zhou X, Beltranena E, Zijlstra RT. Effects of feeding canola press-cake on diet nutrient digestibility and growth performance of weaned pigs. *Anim Feed Sci Technol*. 2016; 44(6):783–792. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.12.001>
31. Vukmirović D, Čolovića R, Rakitaa S, Brleka T, Đuragića O, Solà-Oriolb D. Importance of feed structure (particle size) and feed form (mash vs. pellets) in pig nutrition. *Anim Feed Sci Technol*. 2017; 233:133–144. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.06.016>
32. Nahid T, Niaz M. Food processing and Maillard reaction products: Effect on human health and nutrition. *Int J Food Sci*. 2015; 526762. <https://dx.doi.org/10.1155%2F2015%2F526762>
33. FAO. Water use in livestock production systems and supply chains – Guidelines for assessment (Version 1). *Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership*. Rome; 2019. <https://doi.org/10.4060/ca5685en>