



Universitat Autònoma de Barcelona

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi queda condicionat a l'acceptació de les condicions d'ús establertes per la següent llicència Creative Commons:  http://cat.creativecommons.org/?page_id=184

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis queda condicionado a la aceptación de las condiciones de uso establecidas por la siguiente licencia Creative Commons:  <http://es.creativecommons.org/blog/licencias/>

WARNING. The access to the contents of this doctoral thesis it is limited to the acceptance of the use conditions set by the following Creative Commons license:  <https://creativecommons.org/licenses/?lang=en>



Universitat Autònoma de Barcelona

UTILIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS AGROINDUSTRIALES EN ALIMENTACIÓN LÍQUIDA PARA CERDOS DE ENGORDE

TESIS DOCTORAL PRESENTADA POR:

Cinta Sol Llop

BAJO LA DIRECCIÓN DE LOS DOCTORES:

Josep Gasà Gasó y Lorena Castillejos Velázquez

PARA ACCEDER AL GRADO DE DOCTOR DENTRO DEL PROGRAMA DE DOCTORADO DE
PRODUCCIÓN ANIMAL DEL DEPARTAMENT DE CIENCIA ANIMAL I DELS ALIMENTS

Bellaterra, 2016



FACULTAT DE VETERINÀRIA

El Dr. **Josep Gasà Gasó** y la Dra. **Lorena Castillejos Velázquez**, ambos del Departament de Ciència Animal i dels Aliments de la Facultat de Veterinària, de la Universitat Autònoma de Barcelona,

Certifican:

Que la memoria titulada **“Utilización de subproductos agroindustriales en alimentación líquida para cerdos de engorde”**, presentada por Cinta Sol Llop con la finalidad de optar al grado de Doctor en Veterinaria, ha sido realizada bajo su dirección y, considerándola finalizada, autorizan su presentación para que sea juzgada por la comisión correspondiente.

Y para que conste a efectos oportunos, firman la presente en Bellaterra, 22 de septiembre de 2016.

Dr. Josep Gasà Gasó

Dra. Lorena Castillejos Velázquez

La presente memoria de tesis ha sido realizada *“amb el suport del Comissionat per a Universitats i Recerca del Departament d’Innovació, Universitats i Empresa de la Generalitat de Catalunya”*

*Dedicada als meus pares
Rafel i Olga*

RESUMEN

El uso de la alimentación líquida en la producción porcina permite la introducción de ingredientes, con un alto contenido en humedad, procedentes de la industria alimentaria humana a un bajo coste económico. Sin embargo, la variabilidad y la escasa información relacionada con los subproductos convencionales y no convencionales dificultan su uso, y requiere de un procedimiento adecuado para evaluar tanto su contenido nutricional, como sus condiciones de utilización prácticas.

El objetivo de la presente tesis doctoral fue identificar subproductos potenciales y estudiar el valor nutritivo de algunos subproductos no convencionales, determinando sus características nutricionales no sólo a nivel de laboratorio, sino también a nivel de granja utilizando un modelo animal. Por otro lado, también se estudiaron diferentes ratios de dilución (agua:pienso), con el fin de optimizar los sistemas de alimentación líquida.

Para lograr ambos objetivos, fueron diseñados cuatro capítulos (**Capítulo 4, 5, 6 y 7**):

En el **Capítulo 4**, el objetivo principal fue identificar subproductos potenciales procedentes de la de diferentes industrias de alimentación humana. El primer paso fue un estudio de mercado teniendo en cuenta aspectos importantes de los subproductos, como la disponibilidad, la homogeneidad y variabilidad estacional, los requisitos de almacenamiento, el coste, las fortalezas y las debilidades. Un segundo paso fue determinar cuáles de los subproductos encajaban mejor en la nutrición porcina, mediante la realización del análisis de la composición química, siendo la mayonesa y la harina de almendra los subproductos más energéticos, seguidos de la okara, que también era un subproducto proteico, chocolate con frutos secos y el subproducto de oliva. Los subproductos proteicos fueron los residuos de cefalópodos, la okara, la torta de camelina y el bagazo de cerveza, y, por último, los subproductos de origen vegetal fueron los más fibrosos. En el tercer paso, entre todos los subproductos analizados, se seleccionaron la mayonesa y la harina de almendra para llevar a cabo ensayos en condiciones comerciales con el fin de evaluar los resultados productivos y los beneficios económicos. Se realizaron

tres ensayos con 180 cerdos de engorde cada uno, distribuidos en 10 corrales ($n = 5$), para comparar una dieta líquida control (CON) frente a una dieta líquida con subproducto. En el Ensayo 1, el subproducto evaluado fue la mayonesa a un 3 – 4% de inclusión (MAY1); en el Ensayo 2, un 7,75% de mayonesa (MAY2); y en el Ensayo 3, un 10% de harina de almendra (ALM). Los animales de la dieta CON fueron los menos pesados al final del experimento ($P = 0,16$), con un menor consumo medio diario (CMD) ($P = 0,21$) y ganancia media diaria (GMD) ($P < 0,05$) que los animales del grupo MAY1. El peso vivo (PV) final y la GMD fueron significativamente inferiores en los animales del grupo ALM (-2,1% y -6,1%, respectivamente) que los animales del grupo CON. La inclusión de subproductos en las dietas líquidas no afectó significativamente el índice de conversión (IC). Sin embargo, los animales en las dietas con subproductos mostraron un IC numéricamente superior a los animales de las dietas CON (5,5% en MAY1; 0,7% en MAY2 y 5,3% en ALM). El beneficio económico del coste total del pienso mediante el del uso de la mayonesa fue de un 15% en el Ensayo 2 y de un 10% en el Ensayo 3 con la inclusión de la harina de almendra.

En el **Capítulo 5**, se llevaron a cabo dos experimentos diferentes de digestibilidad *in vivo* para investigar el valor nutritivo de ocho de los subproductos potenciales que se determinaron en el **Capítulo 4**. En el primer experimento, cuatro subproductos convencionales (galleta líquida, bagazo de cerveza, harina zootécnica y pastone), se estudiaron mediante el método por diferencia con una inclusión del 50% del subproducto (en base de materia seca) a la dieta basal (ratio 2,7:1). Un total de 30 cerdos de engorde con 86 kg de PV se distribuyeron de forma individual entre los cuatro subproductos y una dieta control sin subproductos ($n = 6$). El segundo experimento se dividió en cuatro ensayos para el estudio de cuatro subproductos no convencionales (mayonesa, harina de almendra, harina de cacao y kiwi). Los subproductos no convencionales se estudiaron por el método de regresión mediante niveles de inclusión crecientes (2, 4, 7 y 10%, a excepción de kiwi 4, 8, 12 y 16%) en la dieta líquida (2,7:1 ratio) con 16 cerdos de engorde de 40 kg de PV, distribuidos individualmente en cada ensayo ($n = 4$). Los resultados de la digestibilidad de la materia seca (dMS), la digestibilidad de la materia orgánica (dMO) y la digestibilidad de la energía bruta (dEB) fueron superiores al 80% para el pastone, la galleta líquida, la mayonesa y la harina de almendra, pero no alcanzó el 80% en el bagazo de cerveza, la harina zootécnica, la harina de cacao y el kiwi. Los coeficientes de

digestibilidad total aparente (CATTD) del extracto etéreo (EE), la proteína bruta (PB) y las fracciones de fibra siguieron una tendencia similar entre los subproductos. Como era de esperar, los errores estándar de los valores de digestibilidad obtenidos por regresión fueron muy superiores a los obtenidos por diferencia. Se concluyó que la mayonesa, la harina de almendra, la galleta líquida y el pastone tendrían un alto potencial para ser utilizados en las dietas líquidas para cerdos. Sin embargo, el bagazo de cerveza, la harina zootécnica, la harina de cacao y el kiwi, si se usan, deberían incluirse a niveles bajos, debido a su alto contenido en fibra.

En el **Capítulo 6**, el objetivo fue determinar algunas ecuaciones de predicción de la energía bruta (EB), dMO, dEB, energía digestible (ED) y energía metabolizable (EM) de los subproductos utilizando la composición química (**Capítulo 5**) y un método de digestibilidad *in vitro* (IN VITRO). En este estudio se utilizaron las digestibilidades *in vivo* de los ocho por productos testados en el **Capítulo 5**. La mejor ecuación para la predicción de la EB fue: $EB = 9,58 EE + 6,50 PB + 4,28 \text{ Carbohidratos (MO-PB-EE)}$ ($R^2 = 1,00$). Cuando únicamente se utilizó la composición química como variables independientes, la fibra neutro detergente (FND) y la fibra ácido detergente (FAD) fueron los mejores predictores ($R^2 = 0,65 - 0,71$) para la dMO y dEB; y el EE y la NDF para la ED y la EM ($R^2 = 0,88 - 0,94$). Sin embargo, las ecuaciones con un mejor ajuste fueron: $dMO = 30,90 - 0,302 FAD + 0,639 \text{ IN VITRO}$ ($R^2 = 0,95$); $dEB = 34,81 - 0,493 FAD + 0,589 \text{ IN VITRO}$ ($R^2 = 0,96$); $ED = 846,34 + 5,081 EE + 3,045 \text{ IN VITRO}$ ($R^2 = 0,97$); y $EM = 687,45 + 5,057 EE + 3,150 \text{ IN VITRO}$ ($R^2 = 0,97$). Además, cuando los dos subproductos más grasos (mayonesa y harina de almendra; $EE > 50\%$) fueron excluidos, las ecuaciones más precisas de la ED y la EM fueron: $ED = 1.415,96 + 2,764 \text{ IN VITRO}$ ($R^2 = 0,97$); y $EM = 1.262,92 + 2,868 \text{ IN VITRO}$ ($R^2 = 0,97$). Estos resultados indican que la EB, dMO, dEB, ED y la EM pueden predecirse con exactitud a partir de la composición química y en especial de la digestibilidad *in vitro* de la MO.

Por último, en el **Capítulo 7**, se evaluaron diferentes ratios de dilución agua:pienso sobre los CATTD en cerdos de engorde. El experimento duró dos meses y se dividió en dos ensayos. En el primer ensayo, un total de 16 cerdos (46,7 kg de PV) se distribuyeron de forma individual y se asignaron a uno de los cuatro tratamientos siguientes ($n = 4$); 1)

dieta de control en forma seca (CON) y ratios de dilución 2) 0,6:1, 3) 2,1:1 y 4) 2,7:1. En el segundo ensayo, los animales (65,4 kg de PV) fueron re-assignados a: 1) dieta control en forma seca (CON) y ratios de dilución de 2) 1,35:1, 3) 2,7:1 y 4) 3,5:1. Ambos ensayos duraron 26 días. Los resultados del primer ensayo, mostraron como los cerdos alimentados con dietas con ratios de dilución 2,1:1 y 2,7:1 presentaron una dMO y dEB significativamente superior a los animales del CON ($P < 0,05$). Los cerdos alimentados con dietas con un ratio de dilución de 2,7:1 tuvieron un mayor ($P < 0,05$) consumo de materia orgánica digestible (DOMi) y de energía digestible (DEi) que los cerdos del grupo CON. A lo largo del segundo ensayo, los cerdos alimentados con dietas con ratios de dilución 1,35:1, 2,7:1 y 3,5:1 presentaron una mejor dMO y dEB que el CON ($P < 0,05$). A diferencia del primer ensayo, el DOMi y el DEi no se modificaron por el tratamiento ($P > 0,05$). Las regresiones cuadráticas mostraron que la dilución para alcanzar los mejores coeficientes de digestibilidad, fueron 1,83:1 y 2,70:1 para el primer y segundo ensayo, respectivamente. Asimismo, durante el primer ensayo, los cerdos del ratio de dilución 0,6:1 tuvieron mayor ganancia de peso ($P < 0,01$) que los del CON; a lo largo del segundo ensayo, los cerdos de los ratios de dilución 1,35:1 y 2,7:1 presentaron un aumento de peso no significativo ($P = 0,064$) pero mayor que los del grupo CON. El CMD no se vio afectado por el ratio de dilución en ninguno de los ensayos. La GMD siguió un ajuste cuadrático, el efecto del tratamiento reflejó una ganancia máxima en los ratios 1,38:1 y 1,74:1 y un IC mínimo en los ratios 1,30:1 y 1,64:1 para el primer y el segundo ensayo, respectivamente. En conclusión, el ratio de dilución que optimiza la digestibilidad de la MO y la EB varía dependiendo de la edad de los animales, siendo las diluciones más bajas mejor para cerdos más jóvenes y las mayores diluciones mejores para los cerdos de acabado.

SUMMARY

The use of liquid feed in animal production allows the introduction of cheap high moisture ingredients from human food industry into swine diets. However, variability and scarce information related to some conventional or non-conventional by-products make their use difficult and require a proper way to evaluate both their nutritional content and their practical conditions of use.

The aim of this PhD Thesis was to identify potential by-products and to study the feeding value of some new by-products, determining their nutritional characteristics not only at the laboratory level but also at the farm level using the animal model. On the other hand, it also studied different water-to-feed ratios, in order to optimize the liquid feeding systems.

To achieve both objectives, four chapters (**Chapter 4, 5, 6 and 7**) were designed:

In **Chapter 4** the main objective was to identify potential by-products from human food industries. The first step was a benchmarking taking into account important aspects such as availability, homogeneity, and seasonal variability, requirements of storage, cost, strengths and weaknesses. A second step was to determine, which by-products fitted better for swine nutrition, carrying out an exhaustive chemical composition, being mayonnaise and almond meal the most energetic by-products, followed by okara, which was also proteic, chocolate-nuts and olive by-product. The proteic by-products were cephalopods by-products, okara, camelina cake and brewery by-product, and finally, by-products from vegetal origin were the most fibrous. At the third step, among all by-products analyzed, mayonnaise and almond meal were selected to perform production trials in order to evaluate perform results and economic benefits. It was carried out three trials with 180 growing-finishing pigs each, distributed in 10 pens (n=5), comparing a liquid control diet (CON) in front of a by-product liquid diet. In Trial 1, the by-product evaluated was 3-4% of mayonnaise (MAY1); in Trial 2, 7.75% of mayonnaise (MAY2); and in Trial 3, 10% of almond meal (ALM). Animals in the CON diet were the lightest at the end of the experiment (P = 0.16) and had less average daily feed intake (ADFI) (P = 0.21)

and average daily gain (ADG) ($P < 0.05$) than MAY1 animals. Final body weight (BW) and ADG were significantly lower in ALM animals (-2.1% and -6.1%, respectively) than CON animals. The inclusion of by-products in liquid diets did not significantly affect feed conversion ratio (FCR). However, the animals in the by-product diets showed numerically higher FCR than CON diets (5.5% in MAY1; 0.7% in MAY2 and 5.3% in ALM). The economic benefit of using mayonnaise was a 15% in Trial 2 and a 10% using almond meal.

In **Chapter 5**, two different *in vivo* digestibility experiments were conducted to investigate the nutritional value of eight potential by-products found in **Chapter 4** in liquid feed diets. In the first experiment, four conventional by-products (liquid bakery by-product, brewery by-product, hominy feed and high-moisture corn) were studied by the difference method with an inclusion of 50% (in dry matter basis) to the basal diet (2.7:1 ratio). A total of 30 finishing pigs with 86 kg of BW were individually allotted and distributed in the four by-products and a control diet without by-products ($n=6$). The second experiment was divided into four trials for the study of four non-conventional by-products (mayonnaise, almond meal, cocoa meal and kiwi by-product). Non-conventional by-products were studied by the regression method with increasing levels of inclusion (2, 4, 7 and 10%, except for kiwi, at 4, 8, 12 and 16%) to the feed (2.7:1 ratio) with 16 growing pigs with 40 kg of BW, individually allotted in each trial ($n=4$). The dry matter digestibility (DMd), organic matter digestibility (OMd) and gross energy digestibility (GEd) values were $>80\%$ for high-moisture corn, liquid bakery by-product, mayonnaise and almond meal but did not reach 80% for brewery by-product, hominy feed, cocoa meal and kiwi. The coefficient of apparent total tract digestibility (CATTD) of ether extract (EE), crude protein (CP) and fiber fractions followed a similar tendency among by-products. As expected, the standard errors of the digestibility values obtained by regression were higher than those obtained by difference. It might be concluded that mayonnaise, almond meal, liquid bakery by-product and high-moisture corn have a high potential for being used in liquid diet for pigs. However, brewery by-product, hominy feed, cocoa meal and kiwi, if used, should be included in low levels, due to their high fiber content.

In **Chapter 6**, the objective was to determine some prediction equations of gross energy (GE), OMd, GEd, digestible energy (DE), and metabolizable energy (ME) of agro-industrial

by-products for pigs, using chemical composition (**Chapter 5**) and an *in vitro* digestibility method (IN VITRO). The *in vivo* digestibilities of the eight by-products tested in **Chapter 5** were used in this study. The best equation for GE prediction was: $GE = 9.58 EE + 6.50 CP + 4.28 \text{ Carbohydrates (OM-CP-EE)}$ ($R^2 = 1.00$). When only the chemical composition was used as independent variables neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF) were the better predictors ($R^2 = 0.65 - 0.71$) for OMD and GEd; and EE and NDF for DE and ME ($R^2 = 0.88 - 0.94$). However, the best fitted equations were: $OMd = 30.90 - 0.302 ADF + 0.639 \text{ IN VITRO}$ ($R^2 = 0.95$); $GEd = 34.81 - 0.493 ADF + 0.589 \text{ IN VITRO}$ ($R^2 = 0.96$); $DE = 846.34 + 5.081 EE + 3.045 \text{ IN VITRO}$ ($R^2 = 0.97$); and $ME = 687.45 + 5.057 EE + 3.150 \text{ IN VITRO}$ ($R^2 = 0.97$). Additional, when the two fatty by-products (mayonnaise and almond meal; $EE > 50\%$) were excluded, the more accurate equations for DE and ME were: $DE = 1415.96 + 2.764 \text{ IN VITRO}$ ($R^2 = 0.97$); and $ME = 1262.92 + 2.868 \text{ IN VITRO}$ ($R^2 = 0.97$). These results indicated that GE, OMD, GEd, DE and ME may be accurately predicted from chemical composition and specially from the *in vitro* OM digestibility.

Finally, in **Chapter 7**, were evaluated different water-to-feed ratios on CATTD in growing-finishing pigs. The experiment lasted two months and it was divided into two trials. In the first trial, a total of 16 pigs (46.7 ± 1.98 kg of BW) were allotted individually and were assigned to one of the four following treatments ($n=4$); 1) Control diet in dry form (CON) and water to feed ratios of 2) 0.6:1, 3) 2.1:1 and 4) 2.7:1. In the second trial, rearranged animals (65.4 ± 3.14 kg of BW) were assigned to 1) Control diet in dry form (CON) and ratios of 2) 1.35:1, 3) 2.7:1 and 4) 3.5:1. Both trials lasted 26 days. Regarding digestibility, in the first trial, pigs fed diets with a dilution ratio of 2.1:1 and 2.7:1 had a significant, higher OMD and GEd than did CON ($P < 0.05$). Pigs fed diets with a dilution ratio of 2.7:1 had a higher ($P < 0.05$) intake of digestible organic matter (DOMi) and digestible energy (DEi) than pigs fed CON. Along the second trial, pigs fed diets with ratios of 1.35:1, 2.7:1 and 3.5:1 had a significantly better OMD and GEd than did the CON ($P < 0.05$). In contrast to the first trial, DOMi and DEi were not modified by the treatment ($P > 0.05$). The quadratic regressions showed the maximum ratio of dilution to reach higher digestibility coefficients, which were 1.83:1 and 2.7:1 for the first and second trials, respectively. Furthermore, during the first trial, pigs on the 0.6:1 dilution rate had higher weight gain ($P < 0.01$) than did CON, and along the second trial, pigs on the dilution rates of 1.35:1 and

2.7:1 had a non-significant ($P = 0.064$) but higher weight gain than did CON. Average daily feed intake (ADFI) was unaffected by the dilution ratio in both trials. Following a quadratic regression, the effect of the treatment on ADG showed a maximum gain in the 1.38:1 and 1.74:1 ratios and a minimum FCR in the 1.30:1 and 1.64:1 ratio for the first and the second trials, respectively. In conclusion, the optimal water-to-feed ratio which optimized OM and GE digestibility varies depending on the age of the animals, the lowest ratios being better for younger pigs and the highest ratios better for finishing pigs.

ABREVIACIONES

ADF: acid detergent fiber

ADFd: acid detergent fiber digestibility

ADFI: average daily feed intake

ADG: average daily gain

AL: alimentación líquida

ALF: alimentación líquida fermentada

ALM: almidón

AS: alimentación en seco

ATTD: apparent total tract digestibility (%)

AZ: azúcares

BW: body weight

CATTD: coefficient of apparent total tract digestibility

CF: crude fiber

CFd: crude fiber digestibility

CMD: consumo medio diario

CP: crude protein

CPd: crude protein digestibility

CV: coefficient of variation

CZ: cenizas

DE: digestible energy

dEB: digestibilidad de la energía

DEi: digestible energy intake

DM: dry matter

DMD: dry matter digestibility

dMO: digestibilidad de la materia orgánica

DOMi: digestible organic matter intake

EB: energía bruta

Ec.: ecuación

ED: energía digestible

EE: ether extract / extracto etéreo
EE_d: ether extract digestibility
EN: energía neta
EM: energía metabolizable
Eq.: equation
FAD: fibra ácido detergente
FB: fibra bruta
FCR: feed conversion ratio
FND: fibra neutro detergente
GE_d: gross energy digestibility
GMD: ganancia media diaria
IC: índice de conversión
IN VITRO: *in vitro* organic matter digestibility
LAC: lactosa
LIG: lignin
ME: metabolizable energy
MO: materia orgánica
MS: materia seca
NDF: neutral detergent fiber
NDF_d: neutral detergent fiber digestibility
OM: organic matter
OM_d: organic matter digestibility
PB: proteína bruta
r: correlation coefficient /coeficiente de correlación
R²: determination coefficient / coeficiente de determinacion
RMSE: root means standard error
RSD: residual standard deviation
SD: standard deviation

ÍNDICE

Capítulo 1: Introducción	1
Capítulo 2: Revisión bibliográfica	7
2.1. Alimentación líquida.....	9
2.1.1. Estructura y manejo del sistema de alimentación líquida	10
2.1.1.1. Equipos e instalaciones	10
2.1.1.2. Funcionamiento y características.....	12
2.1.1.3. Agua	12
2.1.1.4. Ratios de dilución	13
2.1.2. Tipos de alimentación líquida	17
2.1.2.1. Alimentación líquida tradicional.....	17
2.1.2.2. Alimentación líquida fermentada.....	17
2.1.2.3. Alimentación líquida con acidificantes.....	20
2.1.2.4. Alimentación líquida con adición de cultivos starter	20
2.1.3. Impacto de la alimentación líquida sobre los rendimientos productivos y salud de los animales.....	21
2.1.3.1. Lechones.....	21
2.1.3.2. Cerdas.....	23
2.1.3.3. Cerdos de engorde	23
2.1.4. Impacto de la alimentación líquida sobre el medio ambiente	30
2.1.5. Aspectos a tener en cuenta al utilizar alimentación líquida	31
2.2. Subproductos en alimentación líquida.....	32
2.2.1. Dificultades en el uso de subproductos en alimentación animal	36
2.2.2. Subproductos actualmente disponibles para porcino	39
2.3. Valor nutritivo potencial y utilización real de subproductos	42
2.3.1. Partición de la energía.....	44
2.3.1.1. Energía Bruta	44
2.3.1.2. Energía digestible	44
2.3.1.3. Energía Metabolizable.....	44
2.3.1.4. Energía Neta	45
2.3.2. Metodologías de evaluación	46
2.3.2.1. Digestibilidad in vivo.....	46
2.3.2.2. Digestibilidad in vitro.....	48
2.3.2.3. Ecuaciones de predicción	48
2.3.3. Valoración de subproductos.....	50
2.3.4. Ingestibilidad	51

Capítulo 3: Objetivos	53
Capítulo 4: Identification and use of agro-industrial by-products for liquid feeding systems in fattening pigs	59
4.1. Objective.....	61
4.2. Material and methods	61
4.2.1. Benchmarking of by-products	61
4.2.2. Experimental design, animals, housing and diets.	62
4.2.2.1. Origin and chemical composition of by-products.	62
4.2.2.2. Trial 1	62
4.2.2.3. Trial 2	64
4.2.2.4. Trial 3	64
4.2.3. Cost/benefit analysis.....	66
4.2.4. Chemical analysis	66
4.2.5. Statistical analysis.....	67
4.3. Results.....	67
4.3.1. Benchmarking of by-products	67
4.3.2. Chemical composition of by-products	72
4.3.3. Performance trials results	74
4.4. Discussion	76
4.5. Conclusions.....	78
Capítulo 5: Digestibility of some conventional and non-conventional feedstuff and by-products to be used in liquid feed growing-finishing pigs	81
5.1. Objective.....	83
5.2. Material and methods	83
5.5.1. Chemical composition of by-products	83
5.5.2. Experiment 1: <i>in vivo</i> digestibility trials of conventional by-products.....	84
5.5.2.1. Animals, housing and experimental design	84
5.5.2.2. Diets Experiment 1	85
5.5.3. Experiment 2: <i>in vivo</i> digestibility trials of non-conventional by-products .	86
5.5.3.1. Animals, housing and experimental design	86
5.5.3.2. Diets Experiment 2	87
5.5.4. Sampling, measurements and chemical analysis.....	87
5.5.5. Calculations and statistical analysis	87
5.3. Results.....	89
5.5.6. Experiment 1	91
5.5.7. Experiment 2	94
5.4. Discussion	99
5.4.1. The complexity of including agro-industrial by-products in the diets of pigs.....	99
5.4.2. Methodological difficulties to evaluate the nutritive value of by-products.	100

5.4.3. Digestibility and energy contents of the evaluated by-products.....	102
5.5. Conclusions.....	104

Capítulo 6: By-products used in pig's liquid feed: prediction of the digestibility coefficients and the energy contents from chemical composition and in vitro digestibility 105

6.1. Objective.....	107
6.2. Material and methods.....	107
6.2.1. Chemical composition of the by-products.....	107
6.2.2. <i>In vivo</i> digestibility trials.....	107
6.2.3. <i>In vitro</i> digestibility:.....	108
6.2.4. Statistical analyses.....	110
6.3. Results.....	111
6.3.1. Chemical composition and digestibility coefficients.....	111
6.3.2. Prediction equations.....	116
6.4. Discussion.....	120
6.5. Conclusion.....	122

Capítulo 7: The effects of mixing compound feed with water on diet digestibility of growing-finishing pigs..... 125

7.1. Objective.....	127
7.2. Material and methods.....	127
7.2.1. Experimental design, animals, housing and diets.....	127
7.2.2. Sampling and measurements.....	129
7.2.3. Chemical analysis and calculations.....	129
7.2.4. Statistical analysis.....	130
7.3. Results.....	131
7.3.1. Performance and carcass traits.....	131
7.3.2. Digestibility parameters.....	135
7.4. Discussion.....	137
7.5. Conclusions.....	140

Capítulo 8: Discusión general..... 141

8.1. Identificación de potenciales subproductos.....	144
8.2. Valorización de subproductos.....	145
8.2.1. Análisis químicos.....	145
8.2.2. Estudios <i>in vivo</i>	145
8.2.2.1. Pruebas en condiciones comerciales.....	145
8.2.2.2. Pruebas de digestibilidad en condiciones experimentales.....	147
8.2.3. Estudios <i>in vitro</i> y predicción del valor nutritivo.....	148
8.3. La dilución en alimentación líquida.....	151

8.4. Algunos aspectos a mejorar	153
8.5. Propuestas para futuros estudios y aplicaciones	155
Capítulo 9: Conclusiones.....	157
Capítulo 10: Referencias bibliográficas.....	163

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2

Tabla 2.1. Censo porcino y porcentaje estimado de alimentación líquida (AL) en algunos de los países de la Unión Europea.....	9
Tabla 2.2. Comparación de rendimientos productivos, digestibilidad y rendimiento de la canal mediante diferentes ratios de dilución	15
Tabla 2.3. Efecto de la alimentación en seco (AS) o alimentación líquida (AL) sobre los rendimientos productivos en lechones.....	26
Tabla 2.4. Efecto de la alimentación en seco (AS) o alimentación líquida (AL) sobre los rendimientos productivos en cerdos de engorde	28
Tabla 2.5. Efecto de la alimentación en seco (AS) o alimentación líquida (AL) sobre los rendimientos en matadero.....	29
Tabla 2.6. Cantidad de subproductos líquidos (Tn) de la industria alimentaria utilizados directamente en granjas de porcino en los Países Bajos en 1993, 1996 y 1998.....	34
Tabla 2.7. Cantidad total de nutrientes a Tiempo 0 y tras 144 h, en almidón de trigo líquido, pieles de patatas tratadas por vapor y suero de quesería.....	36
Tabla 2.8. Composición nutricional de algunos de los subproductos (%MS)	40
Tabla 2.9. Límites de inclusión de subproductos recomendados en dietas para porcino	41

Capítulo 4

Table 4.1. Diets composition and chemical analysis of the experimental diets in Trial 1 (as-fed basis; g/kg)	63
Table 4.2. Diets composition and chemical analysis of the experimental diets in Trial 2 and Trial 3 (as-fed basis; g/kg)	65
Table 4.3. Results of questionnaire on identification of the agro-industries and their by-products.....	70
Table 4.4. Chemical composition of different batches of alternative by-products (mean \pm SD; expressed in DM bases).....	73

Table 4.5. Chemical composition of by-product used in Trial 1, Trial 2 and Trial 3 (mean \pm SD; expressed in DM basis)	74
--	----

Table 4.6. Performance results of Trial 1	74
--	----

Table 4.7. Performance results of Trial 2 and Trial 3 and carcass traits of Trial 3	75
--	----

Capítulo 5

Table 5.1. Diet composition and chemical analysis of basal diets in Experiment 1 and 2 (as fed basis; g/kg unless otherwise stated)	85
--	----

Table 5.2. Chemical composition of by-products used in the digestibility trials and samples of other batches (in brackets)	90
---	----

Table 5.3. Feed intake (g DM/kg BW ^{0.75}), dry matter digestibility (DMd), organic matter digestibility (OMd), gross energy digestibility (GE _d) and nutrients digestibility coefficients of the diets in Experiment 1	92
--	----

Table 5.4. Coefficients of dry matter digestibility (DMd), organic matter digestibility (OMd), gross energy digestibility (GE _d) and nutrients digestibility of the by-product estimated “by difference”	93
---	----

Table 5.5. Dry matter digestibility (DMd), organic matter digestibility (OMd), gross energy digestibility (GE _d) and nutrients digestibility coefficients of the by-product evaluated in Experiment 2	95
--	----

Capítulo 6

Table 6.1. Chemical composition of by-products used for <i>in vivo</i> assays and <i>in vitro</i> digestibility of OM (IN VITRO)	112
---	-----

Table 6.2. Coefficients of <i>in vivo</i> digestibility of OM (OMd) and GE (GE _d) and calculated DE and ME contents	114
--	-----

Table 6.3. Correlation coefficients between chemical characteristics and other characteristics of the by-products	115
--	-----

Table 6.4. Prediction equations of OMd (%) and GE _d (%) of by-products from the chemical composition and <i>in vitro</i> OM digestibility (IN VITRO; %)	118
---	-----

Table 6.5. Prediction equations of DE and ME (kcal/kg of DM) of by-products from chemical composition and *in vitro* OM digestibility (IN VITRO; %).....119

Table 6.6. Predicted means and standard deviation (SD) of the OMD (%), GEd (%), DE and ME (kcal/kg DM) obtained from samples of different batches, and using the more accurate equations of Tables 6.4 and 6.5.....123

Capítulo 7

Table 7.1. Diet composition and chemical analysis of the experimental diet (as-fed basis; g/kg).128

Table 7.2. Effect of dilution ratio on performance and carcass traits of the animals132

Table 7.3. Effect of the dilution ratio on the coefficients (g/g) of apparent total tract digestibility and intakes of digestible organic matter (g/kg BW^{0.75}·d) and digestible energy (Kcal/kg BW^{0.75}·d)136

Table 7.4. Regressions equations showing the relation between dilution rate and digestibility coefficients137

Capítulo 8

Tabla 8.1. Valores reales de dMO y dEB de los subproductos ensayados y predicciones obtenidas utilizando las ecuaciones más precisas obtenidas en el Capítulo 6 (Tabla 6.6)150

Tabla 8.2. Valores medios predichos y desviación estándar (SD) de la dMO (%), dEB (%), ED y EM (kcal/kg MS) obtenido de muestras de subproductos no ensayados “in vivo”151

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1. Cocina de un sistema de alimentación líquida	11
Figura 2.2. Composición microbiana (log ₁₀ CFU/g) y pH durante la fermentación (Brooks, 2008).	18

Capítulo 5

Figure 5.1. Evolution of OMD and GE _d	97
Figure 5.1 a. Mayonnaise	97
Figure 5.1 b. Almond Meal	97
Figure 5.1 c. Cocoa Meal	97
Figure 5.1 d. Kiwi	97
Figure 5.2. Evolution of CATT _D of the nutrients	98
Figure 5.2 a. CATT _D of EE of Mayonnaise	98
Figure 5.2 b. CATT _D of EE and CP of Almond Meal	98
Figure 5.2 c. CATT _D of EE, CP and CF of Cocoa Meal	98
Figure 5.2 d. CATT _D of CP and CF of Kiwi	98

Capítulo 6

Figure 6.1. Illustration of some simple prediction equations of OMD (%) and DE (kcal/kg) using chemical composition and/or in vitro digestibility values.....	124
--	-----

Capítulo 7

Figure 7.1. Quadratic regression for ADG in Trials 1 and 2 depending on dilution ratio	133
Figure 7.2. Quadratic regression for FCR in Trials 1 and 2 depending on dilution ratio	134

CAPÍTULO 1: Introducción

Es sabido que el coste de la alimentación representa más del 60% de los costes totales en producción animal. El aumento del precio de las materias primas durante 2007 y 2008 hizo incrementar de forma importante el precio del pienso y, en consecuencia, el coste total de producción del cerdo.

Si la alimentación es el factor que mayor impacto ejerce sobre los costes de producción y el precio de las materias primas está sometido a cambios continuos que en ningún caso se pueden controlar, ni tan siquiera prever; es razonable que las empresas del sector y los ganaderos intenten buscar alternativas reales que permitan mantener, y reducir si fuera posible, el coste de alimentación sin empeorar los rendimientos productivos ni la calidad del producto final.

Entre las alternativas que existen actualmente para mejorar la eficiencia de utilización de los piensos se encuentra, por una parte, una gran variedad de aditivos alimentarios como son los acidificantes, enzimas, probióticos, etc. Por otra parte, también se ha visto que la forma de presentación del pienso en forma líquida, así como la utilización de subproductos procedentes de la industria agroalimentaria, consigue reducir los costes de alimentación en producción porcina.

La alimentación líquida y en especial el uso de subproductos que el ganadero puede adquirir a un coste muy bajo, serán los pilares de esta tesis. Por lo tanto, las primeras páginas de la revisión bibliográfica se centrarán en las posibilidades y alternativas que ofrece este tipo de alimentación en cerdos de engorde. Posteriormente, se expondrá una visión general del uso de subproductos, con sus principales ventajas e inconvenientes así como los procedimientos que se deberían seguir para su valorización y aceptación.

En este contexto, España, aun siendo unos de los mayores productores de porcino de la Unión Europea, queda muy lejos de otros países de la Europa Occidental en términos de implementación de sistemas de alimentación líquida.

Por una parte, la alimentación líquida ofrece beneficios respecto a la alimentación en seco, como la aplicación de una alimentación multifase, donde a partir de dos o más dietas, se puede generar una gran variedad de dietas según la edad y estado fisiológico

de los animales. Conjuntamente con la incorporación a la dieta de subproductos húmedos procedentes de la industria agroalimentaria que consiguen una reducción sustancial del coste de la alimentación. Además de mejorar la salud intestinal en lechones, (Moreau et al., 1992, Brooks et al., 2001; Scholten et al., 2001), así como una mayor flexibilidad y facilidad de administración y manipulación del valor de los ingredientes con enzimas e inoculantes microbiológicos (Scholten et al., 1999; Brooks et al., 2001; Van Winsen et al., 2001; Missotten et al., 2010).

Por otra parte, la inclusión de subproductos en alimentación animal es una práctica habitual, sobre todo con subproductos convencionales o tradicionales. Éste tipo de subproductos, son aquellos que se han utilizado durante décadas, dónde su composición química se conoce perfectamente, así como el efecto sobre los animales. Sin embargo, la alimentación líquida permite no solamente la introducción de éste tipo de subproductos, sino también la inclusión de subproductos líquidos y subproductos no convencionales.

El uso de recursos económicamente más rentables, como los subproductos no convencionales, ha cobrado real interés recientemente debido al incremento de precios de las materias primas, ya que continuamente se buscan subproductos procedentes de la industria agroalimentaria para ser revalorizados y reaprovechados como ingredientes alternativos.

El uso de estos subproductos en alimentación líquida ofrece un doble beneficio permitiendo, en primer lugar, reducir los costes en la eliminación de éstos por parte de las industrias agroalimentarias, reduciendo además la cantidad de residuos generados y conseguir un medio ambiente más sostenible a lo largo de la cadena alimentaria (Scholten et al., 1999). Y en segundo lugar, la reducción del coste de alimentación debido al bajo coste de los subproductos no convencionales respecto a las materias primas convencionales (Moreau et al., 1992; Scholten et al., 2001). Además, las granjas que implementan estos sistemas suelen concentrarse cerca de áreas industriales donde dichos subproductos están realmente disponibles, con el fin de reducir los costes de transporte y mejorar los beneficios.

Sin embargo, la incorporación de un nuevo subproducto implica una serie de pasos previos como son: conocer sus características logísticas, la variabilidad debido a la estacionalidad del subproducto y la composición química e ingredientes de qué está formado. Todos estos factores, entre otros, pueden comportar una alta variabilidad en su composición química (Serena y Bach Knudsen, 2007) y puede resultar un verdadero problema a la hora de formular las raciones para los animales (Brooks, 2001). Por este motivo, es necesario llevar a cabo una correcta valorización de los subproductos, muestreos continuos y análisis químicos frecuentes de estos subproductos con el objetivo de formular las dietas con la mayor precisión posible. Finalmente, se debe valorar cuales serían los niveles máximos de inclusión en las fórmulas de estos subproductos, de los que no existe información al respecto, para garantizar el mínimo coste de la dieta sin asumir excesivo riesgo y penalizar los rendimientos productivos de los animales.

CAPÍTULO 2: Revisión Bibliográfica

2.1. Alimentación líquida

El principio básico de la alimentación líquida (AL) es la utilización de un vehículo líquido, principalmente agua o sueros, o cualquier subproducto líquido disponible, para transportar los nutrientes (normalmente en forma sólida o semisólida) en suspensión, o algunos subproductos alternativos en solución, hasta el comedero de los animales a través de un sistema de válvulas y tuberías (Gadd, 2003).

De la práctica de la AL existe constancia desde 1814 (Russell et al., 1996), aunque ha recibido mayor interés en las últimas décadas (Cumby, 1986) gracias al uso de las nuevas tecnologías y automatización de los sistemas.

Los sistemas de AL son comunes en aquellas áreas donde existe disponibilidad de subproductos por parte de las industrias agroalimentarias y donde una elevada producción de éstos justifica su incorporación (Brooks et al., 2001).

Por este motivo los sistemas de AL están muy extendidos en el norte de Europa donde se estima que alrededor de un 30% de los cerdos en la Unión Europea son alimentados con AL incorporando algún subproducto procedente de la industria láctea (**Tabla 2.1**; EFSA, 2006). Por el contrario, fuera de Europa, es una tecnología emergente en Norte América, donde únicamente se tiene constancia del porcentaje de implementación en Ontario, Canadá, donde se estima que el 20% de los cerdos de engorde son alimentados mediante AL (Braun y Lange, 2004).

Tabla 2.1. Censo porcino y porcentaje estimado de alimentación líquida (AL) en algunos de los países de la Unión Europea.

País	Censo 10 ⁶	% AL en todas las fases	% AL en cerdas
Islandia	0,04	70	0
Dinamarca	12,7	60	30
Finlandia	1,2	60	20
Suiza	1,5	50-60	30
Holanda	12,5	50	15
Irlanda	1,6	40-50	20
Italia	8,7	40	5-10
Suecia	1,4	30	10

Francia	13,3	30	5-10
Austria	2,8	30	5-10
Alemania	27,7	30	3-5
Noruega	0,8	25-30	2
Reino Unido	4,4	20	10
Bélgica	6,4	10	2
Grecia	0,9	10	2
España	28,4	1-3	0
Portugal	2,2	0	0
UE	147,6	30	

Fuente: Adaptado de EFSA, 2006; Eurostat, 2015.

2.1.1. Estructura y manejo del sistema de alimentación líquida

La AL queda definida como aquella dieta compuesta a partir de la mezcla de materias primas y subproductos líquidos procedentes de la industria alimentaria o por la mezcla exclusiva de pienso con agua en proporciones o ratios diferentes en una unidad central o tanque de mezclas en la propia granja (Geary et al., 1996; Chae, 2000; Brooks et al., 2003).

2.1.1.1. Equipos e instalaciones

Existen pocos estudios basados en la evaluación de los aspectos relacionados con las instalaciones de los sistemas de AL, y la mayoría están basados en estudios observacionales y experiencias obtenidas bajo condiciones comerciales.

Los equipos e instalaciones básicos en los sistemas de AL son los siguientes (de Lange y Zhu, 2012):

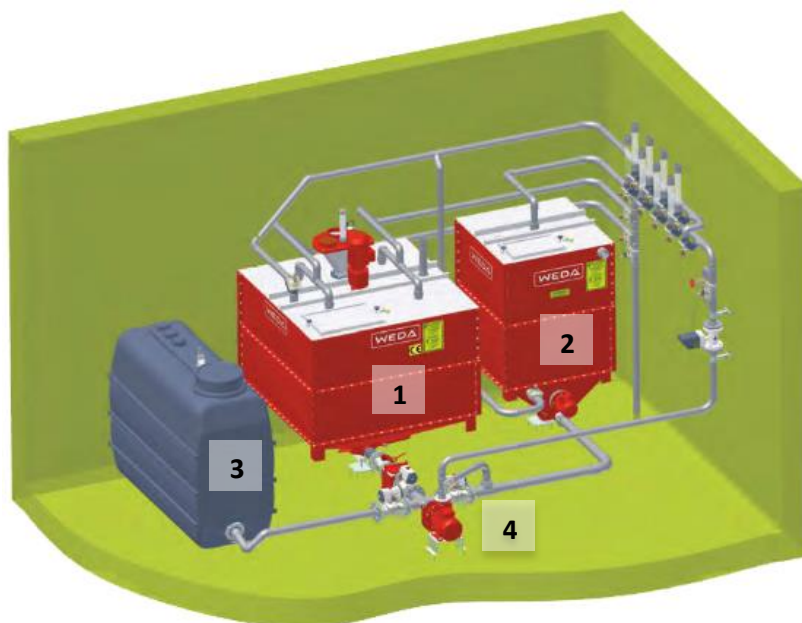
En el área de preparación del alimento o “cocina” encontramos:

- a) El tanque central dónde se preparan las mezclas (agua, pienso y subproductos)
- b) El tanque del agua residual donde se recibe el exceso de sopa de una toma y se reincorpora al tanque central de mezcla en la siguiente comida.

- c) Un ordenador central que controla todos los equipos así como la preparación del alimento.

En la zona de distribución del alimento a los animales son necesarios:

- d) Un sistema de bombas, tuberías y válvulas, controlados por el ordenador central, que transfieren el alimento líquido hasta los comederos de los animales.
- e) Comederos con o sin sensores para monitorizar el consumo de alimento.



1. Tanque central
2. Tanque agua residual
3. Tanque agua limpia
4. Bomba

Figura 2.1. Cocina de un sistema de alimentación líquida (Fuente: WEDA)

En los sistemas de AL más modernos, el área de preparación permite generar un amplio abanico de dietas que se adecuan a los requerimientos de los animales según su edad o estado de producción. A partir del ordenador central, se controlan todos los equipos. Desde la descarga de todos los componentes que formarán la mezcla (pienso, agua y/o subproductos), hasta la salida a través de las tuberías que llevan la mezcla, comúnmente llamada “sopa”, hasta las bajantes, accionando las válvulas para que el alimento caiga a los comederos.

En cuanto a los equipos para la distribución del alimento encontramos las bombas que ejercen la fuerza para impulsar la sopa. Las tuberías por dónde circula ésta, provistas, en algunos casos, de un espiral interior para provocar un flujo turbulento del alimento y evitar de ésta forma, desmezclas de la sopa. Existen dos diseños básicos de comederos, comederos largos que permiten que todos los cerdos del corral coman

simultáneamente y los comederos cortos para una alimentación semi *ad libitum* equipados con sensores. En los sistemas con comederos largos, los cerdos son alimentados varias veces al día y el espacio de comedero suele ser respetado. Este sistema permite una fácil inspección cuando los animales están comiendo, así como una modesta restricción del consumo para optimizar la eficiencia alimentaria y el magro de la canal, observándose niveles elevados de consumo similares a los obtenidos con alimentación en seco y reduciendo al mínimo el desperdicio de alimento (de Lange et al., 2006). Por otra parte, en el uso de comederos *ad libitum*, el espacio de comedero se reduce a 3 o 4 cerdos por comedero. En este sistema, se debe prestar especial atención a los sensores que aseguran que el alimento líquido está siempre disponible. En ambos diseños, un punto crítico es que los comederos deben quedar al menos una vez al día vacíos para evitar el deterioro del alimento remanente (Columbus et al., 2006).

2.1.1.2. Funcionamiento y características

En el sistema de AL tradicional se ha observado que, la frecuencia de alimentación puede tener poco o no efecto sobre los rendimientos productivos de los animales (Cumby, 1986), aunque en la práctica el alimento se ofrece dos o más veces al día, probablemente para evitar un estrés indebido a los animales cuando el agua no está disponible por separado (Yang et al., 1981) y evitar las restricciones alimentarias en aquellos animales más sumisos.

La precisión de la distribución del alimento en los sistemas actuales se estima en aproximadamente un $\pm 5\%$ (Cumby, 1986), teniendo en cuenta posibles fallos en la precisión del cerrado de las válvulas, el ritmo de caída de la mezcla, etc.

2.1.1.3. Agua

La máxima cantidad de agua incorporada en la ración líquida está limitada por la capacidad del estómago de los cerdos. Una excesiva dilución puede reducir la densidad de nutrientes por debajo del nivel al cual los requerimientos de los animales están cubiertos (Cumby, 1986).

Los requerimientos mínimos para cerdos de entre 20 y 90 kg de peso está alrededor de los 2 kg de agua por cada 1 kg de alimento (2:1) (citado por Cumby, 1986). El consumo voluntario de agua en cerdos de engorde alimentados *ad libitum* está entorno a los 2,5:1 y para cerdos que reciben alimento seco restringido en condiciones comerciales está entorno a los 3,7:1 (citado por Cumby, 1986). Esta diferencia podría ser debida a la tendencia que tienen los animales para saciarse con agua si su apetito no se satisface con la disponibilidad de alimento (Yang et al., 1981).

El rango de diluciones o ratios de dilución comúnmente utilizados para cerdos de engorde se encuentra entre 2:1 y 4:1 (Cumby, 1986). Estudios sobre las propiedades reológicas han demostrado que se comportan como fluidos no Newtonianos y que los ingredientes secos tienden a formar grumos durante las mezclas (citado por Cumby, 1986). Además, el mantenimiento del alimento en remojo antes de la alimentación tiene un efecto positivo sobre las propiedades reológicas de éste ya que se consigue reducir la potencia de bombeo (Cumby, 1986).

En la literatura no hay datos experimentales precisos sobre cuál sería la potencia adecuada, pero la comparación que hizo Cumby (1987) con los requisitos de mezcla de los purines, sugirió que sería necesario un mínimo de 20 W/m^3 para mezclas diluidas, aunque podría ser necesaria una mayor potencia para los alimentos más concentrados o los que contienen partículas más groseras.

2.1.1.4. Ratios de dilución

Otro factor influyente y del cual también depende el éxito de la AL es el ratio de dilución o materia seca del alimento (Niba et al., 2009). Hay pocos estudios que confirmen cual es la materia seca ideal que debe contener el alimento líquido (Choct et al., 2004a) ya que existen muchos factores que pueden afectar el ratio de dilución óptimo, como por ejemplo, la edad de los animales (Choct et al., 2004a), la composición del pienso, las condiciones ambientales y la calidad del agua (de Lange y Zhu, 2012). En lechones por ejemplo, el contenido en materia seca del alimento líquido debería ser maximizado debido a la baja capacidad de ingestión la cual limita la ingesta de nutrientes (Geary et al., 1996; Russell et al., 1996). Varios estudios realizados en cerdos con diferentes ratios de dilución han observado resultados muy variables (**Tabla**

2.2). Desde los primeros estudios donde se afirmaba que el ratio de dilución comúnmente utilizado era de 2,5:1 (2,5 kg de agua por 1 kg de pienso) (Cumby, 1986) a estudios posteriores en los que se trabajaba con ratios de 2:1 (Kornegay et al., 1981; Dung et al., 2005), 2,5:1 (Russell et al., 1996; Canibe y Jensen, 2003; Choct et al., 2004b), 2,7:1 (Mößeler et al., 2014), 3,5:1 (Geary et al., 1996), 3:1 y 4:1 (Choct et al., 2004a).

Tabla 2.2. Comparación de rendimientos productivos, digestibilidad y rendimiento de la canal mediante diferentes ratios de dilución

Referencia	Edad de los animales	Duración del experimento	Ratios de dilución	Resultados productivos (kg)			Resultados Digestibilidad** (%)		Rendimiento canal (%)
				CMD	GMD	IC	MS	EB	
Geary et al., 1996	Lechones (7,2 kg)	28 días	2,9:1	0,475	0,403	1,20			
			3,5:1	0,433	0,344	1,22			
			4,6:1	0,466	0,366	1,23			
			5,7:1	0,451	0,380	1,20			
Choct et al., 2004a	Lechones (8,2 kg)	21 días	Seco	0,548	0,460	1,16 ^a			
			2:1	0,460	0,466	0,99 ^b			
			3:1	0,444	0,420	1,07 ^b			
			4:1	0,479	0,464	1,04 ^b			
Barber et al., 1963‡	Cerdos en crecimiento (18 kg)	Hasta sacrificio, 94 kg	1,5:1	2,260	0,690	3,27			75,9 ^a
			2:1	2,270	0,710	3,19			74,9 ^b
			3:1	2,240	0,700	3,22			74,5 ^b
Gill et al., 1987	Cerdos en crecimiento (14,6 Kg)	12 semanas	2:1	1,480	0,730 ^a	2,01 ^a			
			2,5:1	1,490	0,740 ^a	2,00 ^a			
			3:1	1,460	0,750 ^{ab}	1,95 ^{ab}			
			3,5:1	1,470	0,770 ^b	1,90 ^b			
Barber et al., 1991 ‡	Cerdos en crecimiento (33,7 kg)		1,63:1				79,1		
			3,25:1				82,9		
Royer et al., 2007 (Exp. 1)	Cerdos en crecimiento (22,7 kg)	Hasta sacrificio, 115 kg	2,8:1	2,490 ^b	0,879	2,83			77,0
			2,8:1*	2,550 ^a	0,884	2,89			76,9
			2,2:1*	2,550 ^a	0,881	2,90			76,7

Tabla 2.2. Continuación. Comparación de rendimientos productivos, digestibilidad y rendimiento de la canal mediante diferentes ratios de dilución

Referencia	Edad de los animales	Duración del experimento	Ratios de dilución	Resultados productivos (kg)			Resultados Digestibilidad** (%)		Rendimiento canal (%)
				CMD	GMD	IC	MS	EB	
Royer et al., 2007 (Exp. 2)	Cerdos en crecimiento (27,3 kg)	43 días	2,7:1	2,310	0,977	2,37			
			2,7:1*	2,280	0,985	2,31			
			2,3:1	2,270	0,978	2,35			
			2,3:1*	2,340	1,001	2,35			
Royer et al., 2007 (Exp. 2) (continuación del anterior)	Cerdos en crecimiento (68,4 kg)	Hasta sacrificio, 115 kg	2,7:1	2,850	0,939	3,03			77,9
			2,7:1	2,710	0,896	3,03			78,2
			2,3:1	2,630	0,887	2,99			78,3
			2,3:1	2,690	0,874	3,15			78,5
Hurst et al., 2008‡	Cerdos crecimiento (46,8 Kg)	Hasta sacrificio, 85 Kg	Seco	2,000 ^a	0,962 ^a	2,09 ^a			
			1,5:1	1,998 ^a	1,041 ^b	1,94 ^a			
			3:1	1,935 ^b	1,051 ^b	1,87 ^b			
Pedersen y Stein, 2010	Cerdos acabado (77,2 kg)	7 días	Seco				90,4	89,7	
			1:1				90,4	90,0	
			3:1				90,2	90,2	

CMD, consumo medio diario; GMD, ganancia media diaria; IC, índice de conversión; MS, materia seca; EB, energía bruta

‡ Únicamente se exponen los resultados referentes a AS (alimentación en seco) y a AL (alimentación líquida) tradicional y sin subproductos (forman parte de estudios con más tratamientos)

*adición de aditivos reológicos

** digestibilidad total aparente

a, b diferentes superíndices indican diferencias significativas (P < 0,05)

2.1.2. Tipos de alimentación líquida

2.1.2.1. Alimentación líquida tradicional

Como se ha definido anteriormente, la AL consiste en la mezcla de pienso y agua en un tanque central antes de su administración a los animales, en forma de sopa. Ésta sopa contiene alrededor de 200 – 300 g de materia seca (o ingredientes secos) por Kg (Brooks et al., 2003; Brooks et al., 2001).

La AL tradicional no debería confundirse con el sistema líquido/seco, dónde el agua y el pienso se mantienen por separado hasta que se mezclan en el momento que se ofrece a los animales, lo que permite que el alimento y el agua estén disponibles en el mismo comedero y además permite la salida del agua mediante un válvula activada con el hocico del animal (Brooks, 2003; Gadd, 2003). La principal diferencia entre estos dos sistemas es que en el primero existe un periodo de tiempo, de aproximadamente 10 minutos, en el que el pienso y el agua están en contacto antes de ser administrados a los animales, mientras que en el segundo no; además de trabajar a ratios de dilución más bajos entre 1:1 y 1,5:1 formando un material pastoso (Liptrap y Hogberg, 1991; Chae, 2000).

Cuando el pienso se mezcla con el agua y/o con subproductos no fermentados, normalmente tiene un pH superior a 6 el cual permite una rápida proliferación de microorganismos no deseables. Para evitarlo es recomendable la disminución del pH en torno a 3,5-4,5 mediante la fermentación, la acidificación o una combinación de ambos (Russell et al., 1996; Geary et al., 1999; Brooks et al., 2001; Plumed-Ferrer et al., 2005), consiguiendo mejorar las propiedades del alimento e incluso los resultados productivos de los animales (Russell et al., 1996; Jensen y Mikkelsen 1998; Scholten et al., 1999; Canibe et al., 2007a)

2.1.2.2. Alimentación líquida fermentada

Por definición, la alimentación líquida fermentada (ALF) se produce cuando el agua y el pienso son mezclados a una ratio de 1,5:1 a 4:1 y mantenidos, antes de ser administrados a los animales, en un tanque a una cierta temperatura y durante un

periodo de tiempo hasta alcanzar unas condiciones estables como son: una bajada de pH en torno a 4, un alto contenido en ácido láctico y bacterias ácido lácticas y un descenso de enterobacterias (Chae, 2000; Brooks, 2003; Brooks et al., 2003; Canibe et al., 2003; Canibe y Jensen, 2003). Si el periodo de fermentación es demasiado corto para que ésta se produzca y las condiciones estables no se alcanzan entonces no se puede hablar de ALF sino más bien de alimentación líquida no fermentada (Canibe y Jensen, 2003; Plumed-Ferrer y von Wright, 2009; Missotten et al., 2010).

Durante el tiempo en el que el pienso está en contacto con el agua, las bacterias ácido lácticas y las levaduras presentes en los ingredientes proliferan y producen principalmente ácido láctico, ácido acético y etanol, reduciendo el pH de la mezcla (Figura 2.2).

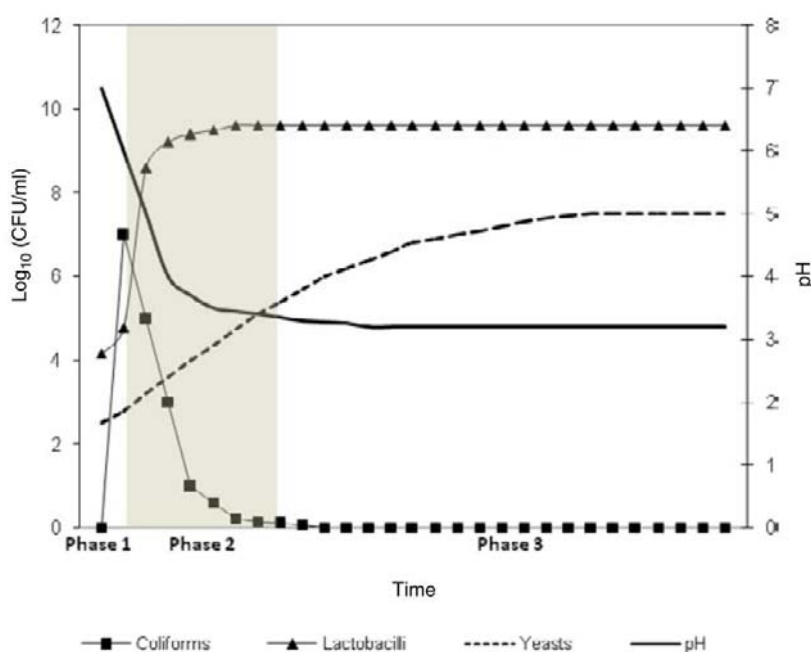


Figura 2.2. Composición microbiana (\log_{10} UFC/g) y pH durante la fermentación (Brooks, 2008).

Mientras que la influencia del etanol sobre la calidad de la ALF no está del todo clara, la alta concentración de ácido láctico y la bajada del pH en el pienso son deseables para prevenir la proliferación de microorganismos patógenos (Van Winsen et al., 2000; Van Winsen et al., 2001; Carlson y Poulsen, 2003; Missotten et al., 2010). Se ha observado como la ingestión de alimento líquido con éstas características pueden resultar en altas concentraciones de ácido láctico y bajo pH en el estómago de los

animales, evitando la proliferación de patógenos a lo largo del tracto gastrointestinal (*Enterobacteriaceae* como coliformes y *Salmonella*) (Van Winsen et al., 2001b; Canibe et al., 2003; Hong et al., 2009) y mejorando en algunos casos la digestibilidad de los nutrientes (Lyberg et al., 2006). También se ha observado como la ALF puede disminuir la seroprevalencia de *Salmonella* en cerdos (van der Wolf et al., 2001), la incidencia de disentería en cerdos infectados con *Brachyspira hyodysenteriae* (Lindecrona et al., 2003) y *Lawsonia intracelularis* (Pedersen et al., 2002; Boesen et al., 2004) comparado con cerdos alimentados en seco.

Como se observa en la **Figura 2.2**, la proliferación de coliformes (potencialmente patógenos) también ocurre durante la fermentación, cuando el alimento es incubado a 20°C, alcanzando su máximo a las 24 h de incubación, y disminuyendo progresivamente debido a la bajada de pH y el incremento de la concentración de ácidos orgánicos de la mezcla. Éste es uno de los motivos por el cual la ALF se ha consolidado como una estrategia alimentaria para reducir los antibióticos promotores del crecimiento en la producción porcina, sobre todo en países del norte de Europa (Brooks, 2008; Niba et al., 2009; Plumed-Ferrer y von Wright, 2009; Canibe y Jensen, 2012).

Sin embargo, varios estudios han demostrado que el efecto de la ALF sobre los parámetros productivos podría ser inconsistente. En este sentido la producción de ácido acético, por parte de levaduras y bacterias ácido lácticas heterofermentativas, y aminas biógenas podría afectar negativamente a la palatabilidad de la ALF (Van Winsen et al., 2001; Brooks, 2003; Niven et al., 2006). Por otra parte, la fermentación del alimento también puede causar la pérdida de nutrientes esenciales del pienso como vitaminas y aminoácidos, en concreto aminoácidos sintéticos añadidos al pienso (Canibe y Jensen, 2003; Niven et al., 2006). Con el fin de evitar éstas pérdidas de nutrientes esenciales por parte de los microorganismos presentes en el pienso, surge la posibilidad de la fermentación exclusiva de los cereales. Este proceso se lleva a cabo mediante la inoculación de bacterias ácido lácticas para producir una gran cantidad de ácido láctico que sea suficiente para compensar el efecto de dilución y de tampón cuando se mezcle con el resto de componentes de la dieta (Brooks et al., 2003; Niven et al., 2006; Missotten et al., 2010).

2.1.2.3. Alimentación líquida con acidificantes

Con el fin de acelerar la primera fase de la fermentación, y reducir o impedir el desarrollo de fermentaciones no deseadas del alimento y evitar el desarrollo de bacterias indeseables, cuando el pH todavía es elevado en las primeras fases de la fermentación, se ha establecido como alternativa el uso de acidificantes, como los ácidos orgánicos. Las propiedades atribuidas a estos ácidos son la reducción de los problemas debidos a la proliferación excesiva de levaduras ya que éstas producen ácido acético, olores desagradables en el pienso y etanol, lo que contribuye a la reducción de la palatabilidad, así como la materia seca y el contenido de energía del alimento (Jensen y Mikkelsen, 1998).

Se ha observado que el uso de ácido orgánicos, tiene efectos positivos sobre las características microbianas del alimento ya que, aparte de reducir el crecimiento de levaduras, impide la proliferación de enterobacterias durante las primeras horas de la fermentación (Canibe et al., 2007a Canibe et al., 2007b; Canibe et al., 2008) sin interferir en el desarrollo de las bacterias ácido lácticas (Plumed-Ferrer y von Wright, 2011) consiguiendo un alimento líquido acidificado (Jensen y Mikkelsen, 1998; Geary et al., 1999).

2.1.2.4. Alimentación líquida con adición de cultivos starter

La fermentación del alimento líquido se puede conseguir tanto espontáneamente como ser inducida. Con el fin de conseguir una correcta fermentación desde el inicio y evitar o acelerar la primera fase de la fermentación, muchos autores proponen la adición de bacterias ácido lácticas como cultivos starter al pienso (Van Winsen et al., 2000; Plumed-Ferrer et al., 2005; Niven et al., 2006; Plumed-Ferrer y von Wright, 2009). Por otra parte, la fermentación también se puede inducir mediante “backslopping” es decir, dejando un remanente de alimento fermentado en el tanque para que sirva de inóculo para la siguiente tanda (Canibe, 2007).

Estos cultivos favorecen y aceleran la proliferación de bacterias ácido lácticas descendiendo el pH de la mezcla (Canibe, 2007). Entre los microorganismos más usados en la práctica están las bacterias ácido lácticas como *Lactobacillus* (Van Winsen

et al., 2001; Demecková et al., 2002; Plumed- Ferrer et al., 2005; de Lange et al., 2006; Canibe et al., 2008; Olstorpe et al., 2008) y *Pediococcus* (Geary et al., 1999; Van Winsen et al., 2001; Plumed-Ferrer et al., 2005; Missotten et al., 2010; Missotten et al., 2015).

2.1.3. Impacto de la alimentación líquida sobre los rendimientos productivos y salud de los animales

En la mayoría de los estudios donde se ha evaluado el uso de la AL tradicional se ha observado una mejora en la utilización del alimento, en el crecimiento de los animales y en la digestibilidad del pienso (Geary et al., 1996; Russell et al., 1996; Jensen y Mikkelsen, 1998; Kim et al., 2001). Sin embargo, algunos autores no han observado dichos beneficios (Lawlor et al., 2002; Pedersen et al., 2005; Lange et al., 2006).

Por otro lado, la ALF parece ser bastante prometedora ya que muchos son los estudios que se han realizado hasta la fecha mostrando los efectos beneficiosos de este sistema de alimentación comparado con el seco o con la AL tradicional (Missotten et al., 2010), como por ejemplo mejoras en la salud gastrointestinal, el crecimiento de los animales y la reducción de la mortalidad y morbilidad tanto en lechones como en cerdos de engorde (den Hartog y Sijtsma, 2009; Russell et al., 1996). No obstante, los resultados sobre los rendimientos productivos siguen siendo bastante variables (Russell et al., 1996; Jensen y Mikkelsen, 1998; Canibe y Jensen, 2003), posiblemente debido a la desaparición de aminoácidos y a la reducción de la palatabilidad, como se ha comentado anteriormente.

2.1.3.1. Lechones

En condiciones comerciales los lechones son destetados entre las 3 y las 4 semanas de edad, momento en el cual el tracto digestivo está todavía inmaduro. El estrés del destete, causado principalmente por la separación de la madre, la reagrupación de camadas y la transición de la leche materna al alimento sólido, está normalmente acompañado de una reducción en la ingestión (Lallès et al., 2007). Todo ello resulta en un acortamiento de las vellosidades y profundidad de las criptas del intestino delgado,

el cual se asocia generalmente a la aparición de diarreas y proliferación de patógenos (Deprez et al., 1987).

Existen estudios que sugieren que las mejoras en los rendimientos de los lechones recién destetados alimentados con AL son debidas a un incremento en la ingesta diaria, ya que al ofrecer el agua a la vez que el alimento, los lechones no necesitan un aprendizaje previo (Russell et al., 1996), junto con el mantenimiento de la arquitectura intestinal (Deprez et al., 1987; Pluske et al., 1997), contribuye al mantenimiento de la capacidad digestiva de los lechones.

La AL podría estar facilitando la transición, de la leche materna al alimento convencional, ayudando a mantener en equilibrio la microflora gastrointestinal (Russell et al., 1996) y contribuyendo a mejorar los resultados productivos (Chae et al., 1997; Jensen y Mikkelsen, 1998; Pedersen, 2001; Hadjiconstantouras, 2003; Choct et al., 2004a; Pedersen et al., 2005) e incluso en términos de mejora de la digestibilidad (Choct et al., 2004b) que en algunos casos se mantienen hasta el sacrificio (Kim et al., 2001), aunque en otros no (Lawlor et al., 2002). En la revisión de 10 estudios realizada por Jensen y Mikkelsen (1998) se observó que el uso de la AL mejoraba la ganancia media diaria (GMD) en un $12,3 \pm 9,4\%$ comparado con la alimentación en seco. También observaron que cuando el alimento se fermentaba, la GMD incrementaba en un $13,4 \pm 7,1\%$ respecto al alimento líquido no fermentado. Geary et al. (1999) también obtuvieron mejoras productivas similares con el alimento líquido acidificado y fermentado. Otros estudios no mostraron diferencias en la eficiencia alimentaria, e incluso en algunos casos los índices de conversión empeoraron con la AL (Kornegay et al., 1981; Russell et al., 1996; Lawlor et al., 2002; Han et al., 2006), tampoco se observaron beneficios en cuanto a la digestibilidad de la materia seca, energía o proteína bruta (Kornegay et al., 1981). En la **Tabla 2.3** quedan resumidos 16 estudios en los que se evaluó únicamente, el efecto de la AL respecto a la alimentación en seco, sobre los rendimientos productivos en lechones. A la vista de los resultados de los diferentes estudios se observó cómo los índices de conversión son extremadamente variables, desde mejoras de un 40% en el estudio de Choct et al. (2004b) hasta empeoramientos de casi el 50% del estudio de Lawlor et al. (2002).

2.1.3.2. Cerdas

En cerdas en lactación, y principalmente en épocas calurosas, el consumo es de vital importancia. Se ha visto como la AL permite maximizar el consumo de pienso (Brooks et al., 2001) y por lo tanto de nutrientes, durante la lactación, mejorando la producción de leche y el peso de la camada al destete. Minimizando al mismo tiempo, el riesgo de pérdida de peso corporal que afecte al resto de parámetros reproductivos, mejorando el índice de partos y reduciendo la mortalidad de los lechones (Gadd, 2003). Además permite llevar a cabo la reducción e incremento progresivo del consumo en los días previos y posteriores al parto, reduciendo el riesgo de trastornos metabólicos e infecciosos del periparto (Gadd, 2003).

En cerdas gestantes, la presencia de coliformes en el intestino aumenta considerablemente justo antes del parto debido al estrés, por lo que los lechones recién nacidos están expuestos a un alto riesgo de infección (Demecková et al., 2002). Se ha observado que tanto las cerdas alimentadas con ALF, como sus lechones, tienen menores recuentos de coliformes fecales (Demecková et al., 2002). El calostro procedente de estas cerdas tiene mayores concentraciones de inmunoglobulinas y mayor actividad mitogénica de linfocitos y células epiteliales intestinales (Demecková et al., 2002). Esto sugiere que la ALF podría reducir la transmisión vertical de enteropatógenos (Brooks y Beal, 2005).

Por otra parte, con estos sistemas se consigue adecuar la curva de alimentación por fases, según genéticas y estado corporal en el momento de la inseminación y entrada a partos, manteniendo una condición corporal más homogénea (Brooks et al., 2001) y ajustando la curva diariamente después de la inspección diaria de los comederos (Royer et al., 2007).

2.1.3.3. Cerdos de engorde

Ésta es la fase donde existen multitud de estudios con el fin de evaluar el efecto de la AL sobre los rendimientos productivos y donde los resultados obtenidos son bastante variables e incluso contradictorios en algunos casos. Esto puede ser debido a las diferencias en las condiciones utilizadas en cada estudio, como el empleo de diferentes

materias primas, subproductos o mezclas de ambos; diferencias en cuanto a los ratios de dilución; fermentación total o parcial del alimento; aditivos incluidos (ácidos o cultivos starter); y condiciones utilizadas para tal fin (tiempos de fermentación, temperaturas, etc.).

Varios estudios han observado mejoras en la ganancia media de los cerdos (Kornegay y Graber, 1968; Patterson, 1989; MLC, 2004; Moon et al., 2004; Hurst et al., 2008) así como mejor eficiencia alimentaria (Forbes y Walker, 1968; Patterson, 1989; Hadjiconstantouras, 2003; MLC, 2004) debido en algún caso a un menor desperdicio de pienso (Russell et al., 1996).

Esta variabilidad en los resultados referentes a los rendimientos productivos queda patente en la revisión que realizaron los autores Jensen y Mikkelsen (1998), tras analizar los resultados de nueve estudios, donde el uso de la AL mejoraba la GMD en un 4,4% respecto al pienso seco pero con un rango de variación entre el -2,6 y el 15%. En cuanto al índice de conversión, se observaba una mejora del 6,9% pero con variaciones entre el 1,9 y el 12,7%. Otros estudios donde se evaluó el efecto de la AL respecto a la alimentación en seco, en cerdos de engorde, quedan resumidos en la **Tabla 2.4**, donde se observó, como en la revisión de Jensen y Mikkelsen (1998), una mejora del índice de conversión promedio del 6%, aunque variaba desde unas mejoras del 17% en el caso del estudio de Hadjiconstantouras (2003), a un empeoramiento de los resultados de un 7% en el estudio de Kornegay y Graber (1968). Comparando éstos resultados con los revisados para lechones (**Tabla 2.3**), se observa cómo, a diferencia de los animales más jóvenes, en los cerdos de engorde es donde se observan mayor número de estudios con mejoras significativas en los rendimientos productivos mediante la utilización de AL. Por el contrario, pocos estudios denotaban mejoras estadísticas en los rendimientos en lechones alimentados con AL, debido posiblemente a una limitación de la ingestión de materia seca.

Más escasos son los trabajos dirigidos a evaluar la digestibilidad, únicamente Pedersen y Stein (2010) realizaron varios estudios evaluando diferentes ratios de dilución (seco, 1:1 y 3:1) sobre la digestibilidad total aparente así como la digestibilidad ileal. Los resultados mostraron que el ratio 1:1, no aportaba beneficios para la digestibilidad, y

el ratio 3:1, tendía a reducir la digestibilidad ileal de la energía, la materia seca y la proteína, comparado con el seco. Por el contrario, Barber et al. (1991) sí que observaron una mejora de la digestibilidad de la materia seca, del 79% al 83%, cuando el ratio de dilución pasaba de 1,63:1 a 3,25:1.

Por lo que respecta a resultados observados a nivel de matadero, en la mayoría de los casos no se observan diferencias entre los animales alimentados con pienso seco o con AL (**Tabla 2.5**). Únicamente en los estudios realizados por Hadjiconstantouras (2003) y por el Meat and Livestock Commission en 2004 (MLC, 2004), se observó una reducción en el rendimiento de la canal en los cerdos alimentados con AL. En el estudio realizado por Kim et al. (2001), los lechones alimentados con AL durante dos semanas tras el destete, mostraron mejoras en los rendimientos productivos que se tradujeron al final del engorde en la salida al matadero 3,7 días antes ($P < 0,01$) que aquellos alimentados con pienso seco, sin afectar a la calidad de la canal. Sin embargo, en los estudios realizados por Lawlor et al. (2002), no mostraron tales mejoras al final del engorde.

Finalmente, Uchewa y Nwakpu (2013) encontraron mejoras significativas en la calidad de la canal (olor sexual de la carne) gracias a una reducción de la producción de escatol en el intestino en aquellos cerdos alimentados con AL tradicional y ALF respecto a los alimentados con pienso seco. Además, la evaluación sensorial también reflejó una mayor aceptación, posiblemente debido a la reducción del olor sexual de la carne de los animales alimentados con ALF y AL tradicional respecto a los del pienso seco. Con ello concluyeron que se podría reducir la necesidad de la castración sin pérdidas en la productividad.

Tabla 2.3. Efecto de la alimentación en seco (AS) o alimentación líquida (AL) sobre los rendimientos productivos en lechones.

Referencia	Edad de los animales	Duración experimento	Ratio dilución en AL (agua:pienso)	Consumo medio diario (Kg/día)		Ganancia media diaria (Kg/día)		Índice de conversión	
				AS	AL	AS	AL	AS	AL
Kornegay et al., 1981	Lechones (9,2 kg)	35 d	2:1	0,970	0,940	0,430	0,400	2,40**	2,54
Kornegay et al., 1981	Lechones (7,9 kg)	35 d	2:1	0,730	0,740	0,380	0,380	1,85**	1,93
Kornegay et al., 1981	Lechones (7,2 kg)	35 d	2:1	0,630	0,710	0,360	0,380	1,77**	1,84
Partridge et al., 1992	Lechones (5,8 kg)	21 d	1:1	0,310	0,351*	0,281	0,312**	1,12	1,12
Russell et al., 1996	Lechones (22,6 d)	28 d	2,5:1	0,443***	0,807	0,343	0,428***	1,31**	1,89
Russell et al., 1996	Lechones (22,6 d)	28 d	2,5:1	0,545***	0,654	0,397	0,454***	1,37**	1,44
Kim et al., 2001	Lechones (11 Kg)	14 d	5,3:1	0,292	0,369	0,257	0,397**	1,14	0,92
Pedersen, 2001 (Exp. 1)	Lechones (9 kg)	42 d	2,7:1	0,800	0,910**	0,387	0,535**	2,08	1,71**
Yang et al., 2001‡	Lechones (5,8 kg)	28 d	2:1	0,497	0,524	0,330	0,355	1,51	1,47
Lawlor et al., 2002 (Exp. 1)	Lechones (¹ 8,4 kg; ² 16,9 kg)	¹ 27 d ² Hasta sacrificio, 95,5 kg	2:1	¹ 0,384	¹ 0,482***	¹ 0,338**	¹ 0,286	¹ 1,13	¹ 1,68
				² 1,550	² 1,567	² 0,738	² 0,750	² 2,10	² 2,09
Lawlor et al., 2002 (Exp. 2)	Lechones (¹ 7,8 kg; ² 17,8 kg)	¹ 27 d ² Hasta sacrificio, 95,5 kg	2:1	¹ 0,460	¹ 0,549***	¹ 0,391**	¹ 0,352	¹ 1,18***	¹ 1,56
				² 1,552	² 1,511	² 0,715	² 0,704	² 2,17	² 2,15
Lawlor et al., 2002 (Exp. 3) ‡	Lechones (¹ 7,7 kg; ² 18,7 kg)	¹ 27 d ² Hasta sacrificio, 96 kg	2:1	¹ 0,473	¹ 0,554**	¹ 0,408	¹ 0,416	¹ 1,16**	¹ 1,33
				² 1,562	² 1,565	² 0,769	² 0,766	² 2,03	² 2,04

Tabla 2.3. Continuación. Efecto de la alimentación en seco (AS) o alimentación líquida (AL) sobre los rendimientos productivos en lechones.

Referencia	Edad de los animales	Duración experimento	Ratio dilución en AL (agua:pienso)	Consumo medio diario (Kg/día)		Ganancia media diaria (Kg/día)		Índice de conversión	
				AS	AL	AS	AL	AS	AL
da Silva et al., 2002	Lechones (6,7Kg)	Hasta sacrificio, 90Kg	2:1	2,051	1,985	0,755	0,720	2,73	2,78
Hadjiconstantouras, 2003	Lechones (7,9 kg)	18 d	2,7:1	0,510	0,440***	0,260	0,270	2,01	1,66***
Hadjiconstantouras, 2003	Lechones (12,7 kg)	41 d	3,4:1	1,270	1,030***	0,600	0,510**	2,10	2,01*
Hadjiconstantouras, 2003	Lechones (36,8 Kg)	27 d	3,0:1	2,240	2,100	0,870	0,930*	2,57	2,24*
Choct et al., 2004b‡	Lechones (8,2 kg)	21 d	2,5:1	¹ 0,518	¹ 0,353	¹ 0,365	¹ 0,365***	¹ 1,64	¹ 0,98***
	¹ Molino rodillo			² 0,622	² 0,390	² 0,541	² 0,471***	² 1,16	² 0,82***
Pedersen et al., 2005	Lechones (9,1 kg)	35 d	2,8:1	0,732	0,558**	0,547	0,453*	1,34	1,24**
Columbus et al., 2006‡	Lechones (5,8 kg)	42 d	2,6:1	-	-	0,399	0,334	1,41	1,50
Columbus et al., 2006‡	Lechones (23,5 kg)	Hasta sacrificio, 105 kg)	2,6:1	-	-	0,982	1,1011	2,63	2,64
Han et al., 2006	Lechones (5,7 kg)	40 d	3:1	0,713 ^b	¹ 0,751 ^a	0,459 ^b	¹ 0,482 ^a	1,55 ^b	¹ 1,56 ^{ab}
		¹ AL 10 d + AS 30 d			² 0,760 ^a		² 0,475 ^{ab}		² 1,60 ^a
Mößeler et al., 2014‡	Lechones (13,6 kg)	44 d	3:1	¹ 1,340	¹ 1,534**	¹ 0,713	¹ 0,848**	¹ 1,88	¹ 1,81
	¹ Harina			² 1,309	² 1,530**	² 0,722	² 0,852**	² 1,81	² 1,80
	² Pellet fino								

‡ Únicamente se exponen los resultados referentes a alimentación en seco (AS) y a AL tradicional y sin subproductos

* P<0,05; ** P<0.01; ***P<0.001

Tabla 2.4. Efecto de la alimentación en seco (AS) o alimentación líquida (AL) sobre los rendimientos productivos en cerdos de engorde.

Referencia	Edad de los animales	Duración experimento	Ratio dilución en AL (agua:pienso)	Consumo medio diario (Kg/día)		Ganancia media diaria (Kg/día)		Índice de conversión	
				AS	AL	AS	AL	AS	AL
Kornegay et al., 1968	Cerdos acabado (72 kg)	14 d	1:1	1,870	1,850	0,570	0,630*	3,28	2,93*
Kornegay et al., 1968	Cerdos acabado (56 kg)	14 d	1:1	1,530	1,560	0,410	0,390	3,73	4,00
Forbes y Walker, 1968 (Exp. 1)	Cerdos crecimiento (38,5 Kg)	Hasta sacrificio, 83 kg	2,5:1	-	-	0,700	0,705	3,14	2,91
Forbes y Walker, 1968 (Exp. 2)	Cerdos crecimiento (36 Kg)	Hasta sacrificio, 83 kg	2,5:1	-	-	0,764	0,777	3,34	3,07
Forbes y Walker, 1968 (Exp. 3)	Cerdos crecimiento (33,7 Kg)	Hasta sacrificio, 83 kg	2,5:1	-	-	0,673	0,659	3,46	3,05**
Patterson, 1989 (Exp. 1)	Cerdos crecimiento (33,6 Kg)	Hasta sacrificio, 87,4 kg	2,5:1	2,120	2,120	0,738	0,758	2,92	2,85
Patterson, 1989 (Exp. 2)	Cerdos crecimiento (32,8 Kg)	Hasta sacrificio, 87,7 kg	3:1	2,110	2,070	0,686	0,736*	3,07	2,86*
Canibe y Jensen, 2003‡	Cerdos crecimiento (30,7 Kg)	Hasta sacrificio, 112Kg	2,5:1	2,060	2,140***	0,961	0,995	2,14	2,15
Hadjiconstantouras, 2003	Cerdos engorde (63,1 kg)	17 d	3,5:1	2,730	2,250*	0,930	0,870	2,95	2,57**
Hadjiconstantouras, 2003	Cerdos acabado (79,4 kg)	22 d	3,6:1	2,730	2,270*	0,690	0,700	4,00	3,31*
MLC, 2004	Cerdos crecimiento (34,2 Kg)	Hasta sacrificio, 103 Kg	4:1	1,850	1,750***	0,754	0,796***	2,53	2,27***
Moon et al., 2004‡	Cerdos acabado (56 kg)	Hasta sacrificio, 110 Kg	2,5:1	2,703	2,857*	0,797	0,862*	3,38	3,32
Dung et al, 2005‡	Cerdos crecimiento (27,3 kg)	Hasta sacrificio, 80 Kg	1,5:1	2,090	2,030	0,552	0,541	3,79	3,76
Hurst et al., 2008	Cerdos crecimiento (47 Kg)	42 d Hasta sacrificio, 84,7Kg	3:1	2,241	2,383	0,831	0,963**	2,58	2,53

‡ Únicamente se exponen los resultados referentes a AS y a AL tradicional y sin subproductos. * P<0,05; ** P<0.01; ***P<0.001

Tabla 2.5. Efecto de la alimentación en seco (AS) o alimentación líquida (AL) sobre los rendimientos en matadero.

Referencia	Ratio dilución (agua:pienso)	Espesor de grasa dorsal (mm) a P2		% Magro		Rendimiento de la canal	
		AS	AL	AS	AL	AS	AL
Hadjiconstantouras, 2003		15,10	14,70			60,90	59,90**
Moon et al., 2004	2,5:1	2,16 ²	2,10 ²	53,21	53,40	74,40	73,65
Lawlor et al., 2002 (Exp. 1)	2:1	-	-	58,30	58,40	75,30	75,20
Lawlor et al., 2002 (Exp. 2)	2:1	-	-	58,60	59,60	76,10	76,10
Lawlor et al., 2002 (Exp. 3) ‡	2:1	-	-	58,60	58,50	76,30	75,80
Forbes y Walker, 1968 (Exp. 1)	2,5:1	-	-	-	-	73,51	74,53
Forbes y Walker, 1968 (Exp. 2)	2,5:1	-	-	-	-	73,15	72,98
Forbes y Walker, 1968 (Exp. 3)	2,5:1	-	-	-	-	73,48	73,15
Patterson, 1989 (Exp. 1)	2,5:1	14,40	14,50	-	-	77,50	77,30
Patterson, 1989 (Exp. 2)	3:1	13,60	13,90	-	-	76,70	76,20
Hurst et al., 2008	3:1	10,30	10,80	-	-	78,00	78,00
MLC, 2004	4:1	11,39	11,45	-	-	74,62	73,96**
Dung et al, 2005	1,5:1	13,90 ¹	13,80 ¹				
Columbus et al., 2006	2,6:1			61,20	60,90	82,20	80,40

¹ Medido a la altura de la décima costilla ² Medido a la altura de la última costilla

2.1.4. Impacto de la alimentación líquida sobre el medio ambiente

En primer lugar, los sistemas de AL crean una oportunidad de reutilización de subproductos en la alimentación animal como alternativa medioambiental a la destrucción de éstos mediante secado, vertido o quemado (Scholten et al., 1999).

Por otra parte, con los sistemas de AL es posible confeccionar una serie de dietas consecutivas, a partir de dos o tres piensos, que son preparadas y distribuidas en una sola línea. Por tanto, se puede llevar a cabo una alimentación multifase, modificando la composición nutritiva tantas veces como sea necesario, variando la proporción de cada uno de los piensos que formarán la dieta final automáticamente (Torrallardona, 2003). Con ello se logra una adecuación del aporte de los nutrientes a las necesidades de los animales, según la fase productiva en la que estén, y se disminuye la excreción de nitrógeno y fósforo en los purines y al medio ambiente, gracias a un mejor ajuste de los nutrientes en las dietas.

La reducción en la excreción de fósforo también se consigue gracias a la activación de las fitasas endógenas en los granos de cereales cuando estos son mantenidos en remojo durante un cierto tiempo (Brooks et al., 2001; Carlson y Poulsen, 2003; Nitrayová et al., 2009), así como, la digestibilidad de la proteína, del fósforo y de otros minerales que también se ven mejorados (Barber et al., 1991b; Carlson y Poulsen, 2003).

La AL contribuye además, a la reducción tanto del desperdicio de alimento (Gadd, 2003) como del polvo dentro de la granja que se genera durante la manipulación del pienso seco (Forbes y Walker, 1968). Esta reducción del polvo dentro de las naves ayuda a mejorar la salud de los animales así como la de los trabajadores y también reduce la acumulación en las estructuras de las instalaciones (Liptrap y Hogberg, 1992; Brooks et al., 2001; Gadd, 2003).

Otro aspecto a destacar es la generación de efluentes cuando se trabaja con ratios de dilución elevados. Un estudio realizado por Hilliger (1986) (citado por Mroz et al., 1995) con 160 cerdos de engorde (30-100 kg de peso) comparando AL (ratio 3:1) vs alimentación en seco, ambos con libre acceso al agua, no observó diferencias en la

generación de purines (3,9 vs. 3,5 l/día), mientras que el consumo de agua difirió considerablemente (6,6 vs. 9,4 l/día, respectivamente). Gadd (2003) también realizó un estudio sobre la generación de purines durante el invierno (septiembre - mayo) en dos granjas. En la primera granja, observó una reducción de purines del 15% al utilizar AL (148 vs 126 l/cerda/semana), sin embargo en la segunda granja no se observó tal reducción, siendo la producción de purines un 2% superior con el uso de AL (115 vs 117 l/cerda/semana).

2.1.5. Aspectos a tener en cuenta al utilizar alimentación líquida

Teniendo en cuenta la información revisada en los epígrafes anteriores, se resumen a continuación las principales ventajas e inconvenientes derivados del uso de los sistemas de AL en el ganado porcino.

Entre las ventajas hemos visto, que al ser sistemas automatizados con un control centralizado para la preparación de las dietas y su distribución, se mejora el manejo y flexibilidad en el uso de los piensos, ingredientes y agua, generando diferentes dietas para adecuarlas a los requerimientos de los animales según su edad y estado productivo. Además, con los avances tecnológicos de hoy en día es posible controlar el sistema desde dispositivos móviles.

Por otra parte también hemos visto que existen diversas alternativas para mejorar las características de las materias primas y/o subproductos mediante la fermentación y la adición de aditivos como acidificantes o cultivos starter.

Con respecto a los rendimientos productivos, en lechones, se consigue mantener la capacidad digestiva y la arquitectura intestinal, gracias a que se facilita la transición entre de la leche materna al pienso. En cerdas en lactación, se logra una mejor adecuación de la curva de alimentación y se favorece el consumo, sobretodo en épocas calurosas disminuyendo el estrés por calor. En cerdos de cebo, se observan mejoras en los rendimientos productivos cuando se compara con el pienso seco, que se podían relacionar con mejoras en la digestibilidad de los nutrientes y energía, aunque en otros

estudios, dichas mejoras las relacionan con un menor desperdicio de pienso (Russell et al., 1996).

Esta reducción en el desperdicio junto con la reducción de polvo en las naves, gracias a las menores pérdidas desde la preparación hasta la distribución del alimento, se ha considerado como un factor importante en la reducción de problemas respiratorios tanto en los animales como en los trabajadores (Brooks et al., 2001; Brooks, 2003).

No se pueden olvidar las mejoras medioambientales que se consiguen con los sistemas de AL, ya que al permitir un gran abanico de dietas según las necesidades de los animales, se reduce la excreción de nitrógeno y fósforo al medio ambiente. Así como, las ventajas medioambientales y el ahorro económico que conllevan el uso de subproductos en AL.

Por el contrario, los inconvenientes en este tipo de instalaciones vienen determinados en primer lugar por el alto coste de la inversión inicial requerido, respecto a un sistema de alimentación en seco. En segundo lugar, al ser sistemas altamente automatizados, requieren de mano de obra especializada. Y en tercer lugar, se debe tener en cuenta la logística en la utilización de subproductos, debido a que la inestabilidad de la oferta y la baja homogeneidad de algunos subproductos, conlleva a una reformulación continua de las dietas.

2.2. Subproductos en alimentación líquida

Sin duda, la AL es un sistema de administración de alimentos (pienso u otros productos) adecuado para el porcino, pero su máximo rendimiento se obtiene cuando la mezcla incorpora subproductos que suponga una reducción importante del coste económico. El uso de subproductos procedentes de la industria alimentaria ha aumentado de forma importante en las últimas décadas y continuará aumentando en toda Europa debido a que son fuente de nutrientes a un coste muy inferior al de las materias primas convencionales. Sin embargo, la alta demanda que están sufriendo los subproductos es posible que lleve a un aumento de su coste, con lo cual podría verse mermada la competitividad que ofrecen actualmente con respecto a las materias primas.

En general, un subproducto queda definido como aquel producto no principal obtenido en un determinado proceso y que tiene o puede tener determinadas aplicaciones o aprovechamientos. De hecho, lo que para una industria es un subproducto para otra puede constituir una de las materias primas de su proceso productivo, obteniendo a su vez un producto principal. Los subproductos también pueden ser generados antes del procesado como desechos durante la preparación de determinados productos y/o materias primas para su posterior elaboración. Por otra parte, Scholten et al. (1999) definían los subproductos líquidos, en concreto, como subproductos orgánicos originados de la industria de la alimentación humana con un contenido en humedad de al menos 600 g/kg.

La reutilización de subproductos para su uso en alimentación animal no beneficia únicamente a la industria animal sino también a la propia industria de alimentación humana, de donde proceden estos subproductos, con un ahorro económico significativo debido a que se evita el coste derivado de su gestión y eliminación, y a su vez se previene la polución derivada de su destrucción. Además, la industria agroalimentaria puede revalorizar estos subproductos, dándoles un valor no previsto hasta el momento. Aunque esta revalorización puede ser negativa para los ganaderos, hay que tener en cuenta que estos subproductos serán una fuente de nutrientes alternativa a las materias primas tradicionales, siempre a menor coste, si consiguen mantener los mismos rendimientos productivos de los animales (Crickenberger y Carawan, 1996). La alimentación con subproductos no sólo tiene beneficios ambientales sino también económicos, por lo que los costes de alimentación pueden reducirse entre un 10 y un 17% (Scholten et al 1999).

La información disponible sobre la cantidad y tipo de subproductos utilizados en cada país es muy limitada. En los Países Bajos (**Tabla 2.6**) encontramos uno de los mejores ejemplos de la utilización de subproductos, donde se estima que cerca de 2,5 millones de toneladas de subproductos se usan anualmente en granjas (Scholten et al., 2000). En el norte de Francia la cantidad de almidón de trigo líquido, suero de quesería y piel de patata reutilizados se estima en 0,5 millón de toneladas por año. También en Suiza se están utilizando alrededor de 1,3 millones de toneladas de suero de quesería, y aproximadamente 1,7 millones de toneladas en Dinamarca (Scholten et al., 2000). En el

caso particular de Norte América el uso de la AL utilizando subproductos está creciendo recientemente debido al incremento y constantes fluctuaciones en los precios de las materias primas convencionales, y paralelamente a la gran disponibilidad y bajo coste de subproductos líquidos procedentes de la producción de biocombustibles (Shurson, 2008).

Tabla 2.6. Cantidad de subproductos líquidos (Tn) de la industria alimentaria utilizados directamente en granjas de porcino en los Países Bajos en 1993, 1996 y 1998 (Scholten et al., 1999; Scholten et al., 2000).

Subproducto	1993	1996	1998
Industria del almidón de trigo	650.000	885.000	918.000
Industria de patata	350.000	525.000	640.000
Industria lechera	300.000	300.000	500.000
Industria de fermentación	80.000	120.000	150.000
Industria cervecera	80.000	100.000	120.000
Industria de azúcar	25.000	50.000	40.000
Otros	170.000	360.000	270.000
Total	1.655.000	2.340.000	2.638.000

Los subproductos se pueden clasificar siguiendo diferentes criterios; según el origen, según los nutrientes principales (Crickenberger y Carawan, 1996; Scholten et al., 1999), según si son convencionales o no convencionales, etc. En el contexto que ocupa esta revisión una forma de clasificación adecuada podría ser la de sólidos o líquidos.

Los *subproductos sólidos*, con una materia seca similar a la del pienso seco o algo inferior (65 – 95%), son fácilmente manejables. Suelen tener una mejor conservación que los líquidos, sin necesidad de realizar grandes modificaciones en las instalaciones para su almacenaje. Suelen ser más estables, debido a que no existe tanto riesgo de contaminación microbiana como en el caso de los líquidos, aun así, existen ciertos parámetros de calidad que deberían ser controlados como el enranciamiento de las grasas, hongos y micotoxinas. Sin embargo, los parámetros que será necesario analizar para evaluar la calidad y seguridad del subproducto siempre dependerán del subproducto y de su procesado previo en la industria (Llanes y Gozzini, 2013).

Los *subproductos líquidos*, con un contenido bastante inferior en materia seca (< 30%), tienen un manejo más complicado al ser más perecederos que los sólidos. Su alto contenido en agua hace que las fermentaciones sean inevitables, como en el caso de las dietas líquidas. Los microorganismos fermentan los almidones y azúcares, y como resultado generan ácido láctico, ácidos orgánicos, etanol y CO₂ (Prescott et al., 1996), disminuyendo el contenido en materia seca y de energía debido a cambios en la composición de los nutrientes (Scholten, 2001; Stickney, 2009; Canibe y Jensen, 2012). Estas fermentaciones, contienen ácidos orgánicos y alcohol que al evaporarse durante su almacenamiento o secado pueden ocasionar resultados de materia seca erróneos (Braun y de Lange, 2004). Se estima que la evaporación del ácido láctico, ácidos grasos volátiles y etanol está en torno el 8, 50 y 100%, respectivamente cuando se seca a 103°C (Scholten et al., 1999; Scholten et al., 2001) y debería tomarse en cuenta cuando se calcula el valor de energía y cuando se determina el contenido en materia seca.

Finalmente, los *subproductos semisólidos*, son aquellos con una materia seca variable (entre 30 y 65%), que sin llegar a ser subproductos sólidos por el alto contenido en humedad, se comportan como tales, ya que serían incapaces de fluir a través de las tuberías de un sistema de AL, provocando problemas como atascos. En estos casos, a nivel de granja, se opta por incluir agua en proporciones variables dependiendo de la naturaleza del subproducto y manejarlo como si se tratara de un subproducto líquido.

En el caso de los subproductos sólidos, el manejo será sencillo gracias a su baja humedad, sin embargo en cuanto a los subproductos líquidos y semisólidos se deberán controlar las fermentaciones con el uso de bacterias ácido lácticas, ácidos orgánicos y sus sales para que baje el pH, y por otro lado dar rotaciones altas a los subproductos. Por regla general un subproducto líquido no debería de estar más de 7 días en la explotación ya que la composición química puede variar radicalmente (Scholten et al., 2001), siendo la variación en la energía la menos afectada (Jensen y Mikkelsen, 1998; Scholten et al., 2001) como se presenta en la **Tabla 2.7**. También es importante dejar vaciar completamente los tanques entre descargas. Si queda un remanente de producto en el tanque y se descarga el producto fresco encima, ya que este remanente actuaría como acelerador de las fermentaciones (Llanes y Gozzini, 2013).

Tabla 2.7. Cantidad total de nutrientes a Tiempo 0 (T_0 ; g por 45 kg de subproducto) y tras 144 h (T_{144} ; como ratio de la cantidad inicial¹), en almidón de trigo líquido, pieles de patatas tratadas por vapor y suero de quesería (Adaptado de Scholten et al., 2001).

	Almidón de trigo líquido	Pieles de patetas	Suero de quesería
<i>Extracto etéreo</i>			
T_0 (g)	339,3	63,0	59,9
T_{144} (ratio) ¹	0,91	1,11	0,97
<i>Proteína bruta</i>			
T_0 (g)	1411,2	818,6	465,3
T_{144} (ratio) ¹	1,00	1,00	1,06
<i>Almidón</i>			
T_0 (g)	3377,3	3836,7	-
T_{144} (ratio) ¹	0,97	0,76	-
<i>Ácidos orgánicos + etanol²</i>			
T_0 (g)	1256,4	342,9	358,7
T_{144} (ratio) ¹	1,12	2,93	2,25
<i>Energía bruta³</i>			
T_{144} (ratio)*	0,97	0,97	0,99

¹ Calculado como: $(\text{kg a } T_{144} \times \text{g/kg a } T_{144}) / (\text{kg a } T_0 \times \text{g/kg a } T_0)$

² Calculado como: ácido láctico + ácido fórmico + ácido acético + ácido propiónico + ácido (iso)butírico + ácido (iso)valérico

³ Ratio calculado como: Energía bruta a T_{144} / Energía bruta a T_0

2.2.1. Dificultades en el uso de subproductos en alimentación animal

Existe un gran abanico de subproductos procedentes de la industria agroalimentaria disponibles para su uso en la AL de los cerdos, incluyendo subproductos de la industria láctea y derivados, panadería y pastelería, dulces, y alcoholes. Sin embargo, en la mayoría de estos subproductos no se han evaluado la presencia de patógenos, contaminantes químicos y podrían representar un riesgo tanto para la salud de los animales, como posteriormente, para su introducción en la cadena alimentaria y su repercusión en la salud pública (Braun y de Lange, 2004). La información de la que se dispone de los subproductos en general, y en particular de los subproductos no convencionales, es muy limitada.

Con el uso de subproductos, no todo son ventajas, existen algunas dificultades que se deben tener en cuenta a la hora de su utilización, como indicó Shurson (2008):

- a) **Aprovisionamiento:** Es esencial disponer de contratos formales con los proveedores de subproductos para obtener una cantidad y calidad consistente. Las premezclas de pienso seco y suplementos se formulan teniendo en cuenta los subproductos disponibles en cada momento. Un cambio inesperado de los ingredientes, incluido un subproducto, puede llevar a una reducción de los rendimientos de los animales, debido bien a dejar de satisfacer las necesidades o bien a la dificultad de adaptación digestiva a los cambios de composición de los nutrientes del pienso final.
- b) **Estacionalidad de la oferta:** Los subproductos de estacionalidad muy marcada obligan al nutrólogo a modificar continuamente las fórmulas de las dietas y en ocasiones a realizar cambios bruscos de alimentación perjudiciales para los animales.
- c) **Variabilidad en el contenido en nutrientes:** Los subproductos han de ser una fuente de nutrientes para los animales a muy bajo coste, aunque su composición varíe substancialmente entre diferentes lotes, dentro del mismo lote y entre diferentes proveedores. Esta variabilidad en la composición nutricional suele ser elevada, con lo cual, la formulación con subproductos suele ser un problema para los nutricionistas (Brooks et al., 2001) y desincentiva su utilización por parte de los ganaderos. En este contexto, se deberían realizar muestreos y análisis frecuentes de los subproductos con el fin de asegurar una formulación precisa de las dietas, e idealmente, se deberían obtener certificados de calidad y del perfil de nutrientes de los proveedores (Braun y de Lange, 2004).
- d) **Elevado contenido en agua:** Es obvio que los subproductos líquidos no pueden ser utilizados en sistemas de alimentación en seco, por lo que la AL es una buena alternativa para su utilización en producción porcina. La gran mayoría de subproductos tiene un contenido en humedad elevado (60 – 80%), lo que hace difícil justificar económicamente su transporte a largas distancias, con un alto coste por kg de materia seca. En este caso, las granjas que utilizan habitualmente subproductos, suelen estar situadas cerca de las áreas industriales que los generan, consiguiendo de esta forma reducir los costes del transporte (Crickenberger y Carawan, 1996; Serena y Bach Knudsen, 2007).

- e) Elevado contenido en sal: Algunos subproductos tienen un alto contenido en minerales por lo que un aporte adicional de agua (bebederos) es fundamental para mantener el balance homeostático, a parte de la ofrecida con la AL (Brooks y Carpenter, 1990). Por ejemplo, el suero líquido y los subproductos de panadería pueden contener altas concentraciones de sal. El suero dulce es el subproducto de la producción de quesos blandos, mientras que el suero ácido es producido en la elaboración de quesos curados. Como la sal se añade al queso antes del prensado, el suero que queda tras el prensado puede contener hasta un 10% de sal en base a materia seca. En este caso, el aporte extra de agua fresca evitaría la conocida toxicidad por sal. Por otra parte, los altos contenidos en sal junto con el bajo pH de los sueros ácidos pueden acelerar el deterioro de los suelos, comederos y otros equipos de las instalaciones. De forma similar, debido al alto contenido en sal de algunos subproductos de panadería será necesario reducir o eliminar la sal de la formulación de la dieta e incluso limitar la inclusión de este subproducto.
- f) Palatabilidad: El subproducto debe ser consumido por los animales y en ningún caso ha de conferir a la ración desequilibrios que causen disminución del consumo o problemas como consecuencia de su ingestión. En este sentido es crucial evitar la presencia de potenciales contaminantes físicos o químicos.
- g) Seguridad alimentaria y valor nutritivo: Los subproductos con un elevado contenido de humedad deben consumirse, como se ha comentado anteriormente, en un plazo de siete días ya que pueden deteriorarse y contaminarse (Crickenberger y Carawan, 1996).
- h) Manejo, almacenaje y conservación: Es especialmente importante la capacidad de almacenamiento y conservación del material en la granja; es conveniente disponer de instalaciones adecuadas y estabilizar el producto para evitar contaminaciones con mohos, micotoxinas o fermentaciones no deseadas.
- i) Relación coste / beneficio: Sin duda es el factor fundamental, se trata de comparar el coste y prestaciones del subproducto con el de materias primas alternativas. La opinión de un nutricionista experto es importante para determinar si un subproducto alcanza el umbral de rentabilidad.

Por tanto, conocer el valor integral potencial para los animales de un determinado subproducto es de gran interés. Sin embargo, antes de utilizar un determinado subproducto para la alimentación animal es conveniente considerar, además de su potencial valor nutritivo, las limitaciones logísticas y precauciones que conlleva su utilización.

2.2.2. Subproductos actualmente disponibles para porcino

Como se ha dicho anteriormente la información acerca de la cantidad y tipo de subproductos que existen actualmente es limitada y diversificada según la especie de destino, así como el tipo de alimentación en la que serán finalmente incluidos.

Antiguamente, los subproductos más utilizados eran principalmente de naturaleza fibrosa, procedentes de la industria de procesamiento de los vegetales, y se solían destinar a la alimentación de los rumiantes (Serena y Knudsen, 2007). Debido a su alto contenido en fibra, estos subproductos apenas se incluían en las dietas de los cerdos de cebo, por su capacidad limitada para fermentar la fibra (Etienne, 1987; Bach Knudsen y Jørgensen, 2001). Sin embargo, en cuanto a las cerdas, la situación es diferente, ya que la administración de alimentos voluminosos puede influenciar el vaciado gástrico (Miquel et al., 2001), prolongar la sensación de saciedad y con ello aminorar el hambre, con lo que se podría reducir la agresividad y las estereotipias en cerdas alojadas en grupo (Danielsen y Vestergaard, 2001).

En cuanto a los subproductos disponibles actualmente, Braun y de Lange (2004) describieron y resumieron algunos de los comúnmente utilizados en AL en Ontario (Canadá). Entre ellos figuraban los procedentes de la industria láctea y derivados (suero dulce, suero ácido, suero de leche, suero de mantequilla), panadera (pan, galletas), dulces (siropes), cervecera (levaduras) y de la producción del etanol. En España, los más comunes suelen ser los derivados lácteos (sueros, yogures y sus mezclas), los derivados de la industria del alcohol (levaduras y bagazo de cerveza) y los subproductos de la industria del pan y la bollería (harina de pan, de galleta y sus mezclas). A parte de éstos, hay muchos más, no tan convencionales, pero también utilizados en ganadería, como son los subproductos de la industria de la patata, de la soja, frutos secos o caramelos,...

(Llanes y Gozzini, 2013). La **Tabla 2.8** refleja la composición nutritiva aproximada de algunos de los subproductos más utilizados actualmente en alimentación porcina, la mayoría con bajo contenido en componentes fibrosos.

Tabla 2.8. Composición nutricional de algunos de los subproductos (%MS)

	MS %	CZ	PB	GB	AL	AZ	LAC
Suero ácido (fresco)	5,4	12,3	13,3	0,31			60,6
Suero permeate condensado (fresco)	31,1	11,1	8,18	1,06			62,6
Suero leche	5,50	8,30	16,70	13,0			38,0
Suero leche concentrado	25,0	6,00	12,5	1,60			40,0
Suero quesería	6,95	10,1	14,6	1,90			68,1
Yogurt	14,0	5,30	20,2	17,6			24,0
Suero de mantequilla	16,4	17,4	35,5	15,8			
Sbp. Panadería	92,7	7,61	15,2	10,9	38,2	9,40	
Levadura de cerveza	12,5	7,55	38,4 - 52,42	2,62	5,70	0,20	
Bagazo de cerveza	21,2	4,80	21,5	11,7	6,00	0,20	
Jarabe de azúcar	69,2	0,42	0,32	1,83	0	82,8	
CDS	30,5	8,40	22,3	18,9	9,90	3,50	
DDGS	89,0		27,2	9,5			
Sbp. Patata (Piel)	14,3 - 14,0	5,30 - 11,1	16,3- 12,9	0,5 - 0,90	60,4	0,90	
Sbp. Patata (Pulpa)	14,2	3,60	6,10	0,60	24,9	0,30	
Pastone	60,0 – 70,0	4,00	7,00 – 10,0	3,00 - 4,00			
Almidón líquido de trigo	22,4	2,75	13,5	3,23	32,3	12,5	

CDS = Solubles destilados de maíz

MS, materia seca; PB, proteína bruta; GB, grasa bruta; CZ, cenizas; ALM, almidón; AZ, azúcares; LAC, lactosa

Adaptado de: Braun y de Lange, 2004; Llanes y Gozzini, 2013; Niven et al., 2006; Shurson et al., 2004; Scholten et al., 2001

De forma general, cuando no existe demasiada información sobre los subproductos y sólo se dispone del valor nutricional estimado a partir de la materia seca, se asume que el

máximo nivel de inclusión en cerdos de engorde no debería superar el 15% de la dieta sin comprometer los resultados productivos de los animales (de Lange et al., 2006), en otros casos, algunos estudios (**Tabla 2.9**) han recomendado límites de inclusión según el subproducto evaluado y el animal de destino.

Tabla 2.9. Límites de inclusión de subproductos recomendados en dietas para porcino

Subproducto	Animales de destino	Límites de inclusión en la dieta	Referencia
Subproducto panadería	Lechones	10%	Llanes y Gozzini, 2013
Levadura de cerveza	Lechones	5%	Llanes y Gozzini, 2013
Bagazo de cerveza	Lechones	< 30%	Aguilera-Soto et al., 2009
Bagazo de cerveza	Lechones	0%	Llanes y Gozzini, 2013
DDGS	Lechones	0% (< 2 semanas) 20% (>2 semanas)	Stein y Lange, 2007
DDGS	Lechones	25%	Shurson et al., 2004
Okara	Lechones	5%	Llanes y Gozzini, 2013
Pastone	Lechones	20%	Llanes y Gozzini, 2013
Yogurt	Lechones	15%	Llanes y Gozzini, 2013
Suero de leche	Lechones	10%	Llanes y Gozzini, 2013
Glicerol	Lechones	< 8%	Zijlstra et al., 2009
Subproducto panadería	Cerdos	< 30%	Braun y Lange, 2004 Llanes y Gozzini, 2013
Levadura de cerveza	Cerdos	2- 5 % < 80% de la proteína	Braun y de Lange, 2004
Levadura de cerveza	Cerdos	15%	Llanes y Gozzini, 2013
Levadura de cerveza	Cerdos	5%	Boucqué y Fiems, 1988
Bagazo de cerveza	Cerdos	< 45%	Aguilera-Soto et al., 2009
Bagazo de cerveza	Cerdos	5%	Llanes y Gozzini, 2013
Sirope de caramelo	Cerdos	<5%	Braun y de Lange, 2004
CDS	Cerdos	<15%	Squire et al., 2005
DDGS	Cerdos	20%	Shurson et al., 2004; Stein y de Lange, 2007;
Piel de patata cocidos	Cerdos	30 %	Van Lunen et al., 1989

Pieles de patata cocidos	Cerdos	< 25%	Edwards et al., 1986
Pastone	Cerdos	50%	Columbus et al., 2010; Llanes y Gozzini, 2013
Suero de leche	Cerdos	15%	Llanes y Gozzini, 2013
Yogurt	Cerdos	20%	Llanes y Gozzini, 2013
Okara	Cerdos	15%	Llanes y Gozzini, 2013
Glicerol	Cerdos	5%	Madrid et al., 2013
Subproducto panadería	Cerdas	20% gestación 10% lactación	Llanes y Gozzini, 2013
Levadura de cerveza	Cerdas	16% gestación 0% lactación	Llanes y Gozzini, 2013
Bagazo de cerveza	Cerdas	20% gestación 10% lactación	Llanes y Gozzini, 2013
DDGS	Cerdas	< 30% gestación 20% lactación	Stein y de Lange, 2007
DDGS	Cerdas	50% gestación 20% lactación	Shurson et al., 2004
Pastone	Cerdas	30% gestación 20% lactación	Llanes y Gozzini, 2013
Suero de leche	Cerdas	15% gestación 10% lactación	Llanes y Gozzini, 2013
Yogurt	Cerdas	15% gestación 0% lactación	Llanes y Gozzini, 2013
Okara	Cerdas	15% gestación 0% lactación	Llanes y Gozzini, 2013
Glicerol	Cerdas	6% gestación 0% lactación	Hernández et al., 2016

2.3. Valor nutritivo potencial y utilización real de subproductos

Una de las mayores ventajas de la AL es poder incorporar subproductos líquidos o semisólidos a las dietas para reducir los costes de alimentación. Debido a que la

información nutricional de estos subproductos es escasa, resulta imperativo realizar una evaluación exhaustiva de su composición nutricional, para tener actualizadas las bases de datos y poder formular con garantías, dietas que satisfagan los requerimientos nutricionales de los animales.

El valor nutritivo de los alimentos se basa principalmente en su contenido en energía y proteína (en especial aminoácidos), que son los dos principales componentes cuantitativos y de mayor coste de la dieta. Sin embargo, la dieta incluye una amplia gama de otros nutrientes, incluyendo minerales, oligoelementos y vitaminas, aunque estos están en cantidades más bajas y que generalmente se suplementan a un costo relativamente bajo. La energía es el componente más caro de la dieta y a pesar de que no es un nutriente *per se*, es esencial para satisfacer las necesidades de mantenimiento y de producción de los animales. La energía deriva de los carbohidratos, proteínas y grasas (Patience et al., 2009). Disponer de valores energéticos fiables para todos los componentes de un pienso es fundamental para formular a mínimo coste.

Conocer el valor energético de piensos y materias primas requiere entender la secuencia de partición que sufre la energía de los alimentos en el organismo animal. Esta secuencia se expresa en Energía Bruta (EB), Energía Digestible (ED), Energía Metabolizable (EM) y Energía Neta (EN) (Henry et al., 1988).

Tradicionalmente, se han utilizado ensayos de digestibilidad y metabolismo para determinar el valor de energía en piensos y materias primas. Sin embargo, debido al coste económico que supone y al trabajo que requieren, se han propuesto métodos capaces de predecir estos valores, incluyendo el uso de ensayos *in vitro* (Boisen y Fernández, 1997; Noblet y Jaguelin-Peyraud, 2007) y ecuaciones de predicción construidas a partir de los nutrientes digestibles o simplemente nutrientes analizados en el propio alimento (Henry et al., 1988; Batterham, 1990; Noblet y Pérez, 1993).

2.3.1. Partición de la energía

2.3.1.1. Energía Bruta

La EB es la energía liberada en la combustión completa del alimento. Se determina evaluando el calor generado por la combustión de la muestra, en una bomba calorimétrica adiabática. La cantidad de EB depende en gran medida de su composición química. Los hidratos de carbono, proteínas y grasas aportan energía, mientras que el agua y los minerales no lo hacen. Los hidratos de carbono suponen entre 3,7 y 4,2 kcal/g, las proteínas alrededor de 5,6 kcal/g, y las grasas unas 9,4 kcal/g (NRC, 1998). La EB representa el potencial energético del alimento pero no tiene en cuenta la fracción que el animal es incapaz de aprovechar.

2.3.1.2. Energía digestible

La ED es una medida de la cantidad de energía consumida (EB) menos la cantidad de energía excretada en heces; proporciona una primera estimación de lo que el cerdo utiliza realmente. Se determina a través de ensayos de digestibilidad, por la recolección total de heces o mediante el uso de marcadores con muestreo fecal y de alimento, tras un periodo de adaptación y 5 a 7 días de recogida de heces. La energía digestible es a menudo etiquetada como *aparente* y no *verdadera*, ya que la ED no tiene en cuenta las pérdidas de energía endógena (células intestinales descamadas, enzimas, etc.). Las pérdidas de energía en las heces pueden llegar a representar entre un 10 y un 30% de la EB. La mayor parte de la energía perdida por heces es debido al componente fibroso e, indirectamente, puede afectar también la digestibilidad de las grasas y proteínas (Batterham, 1990).

2.3.1.3. Energía Metabolizable

Además de las pérdidas de energía en heces, la EM tiene en cuenta las pérdidas de energía en forma de orina y gases. Las pérdidas de energía por gases en cerdos son pequeñas y poco variables (0.5 – 1%) e incluso pueden ser ignoradas sin un gran riesgo (Henry y Noblet, 1986). Con todo, las pérdidas de metano es probable que sean

significativas en animales más viejos, especialmente con las dietas que contienen un alto nivel de carbohidratos fermentables (Henry et al., 1988). En cambio, la energía perdida a través de la orina no es constante y dependerá del contenido proteico de las materias primas o de la dieta. Se estima que para los cereales, las pérdidas de energía por la orina representan un 2%, para los concentrados proteicos un 10% y para las dietas balanceadas un 4-5%. En general, la EM representa un 95 – 96% de la ED en dietas balanceadas (Batterham, 1990) y, en porcino, las pérdidas en orina y gases raramente exceden el 3% de la EB. Obviamente, en los piensos equilibrados, la relación ME:DE es inversamente proporcional al nivel de proteína. (Henry et al., 1988).

Los efectos relacionados con el animal, tales como la edad, el sexo y el genotipo, tienen generalmente poco efecto, si alguno, sobre la ED o EM de los alimentos. En los cerdos, existe, sin embargo, una tendencia hacia un valor ligeramente superior al aumentar la edad, probablemente debido a una mejor capacidad de los individuos adultos para digerir la fibra. Esto explica por qué las determinaciones de ED y EM en cerdos en crecimiento se realizan generalmente dentro del rango de peso vivo de 30-60 kg. Los valores de ED y EM en cerdos se reducen ligeramente, mucho menos que en rumiantes, cuando hay un nivel alto de alimentación casi *ad libitum*. Esta reducción depende principalmente de la composición de la dieta y sobre todo del contenido de fibra, que ejerce un efecto negativo en la utilización total de energía a un ritmo fraccional que varía según el tipo de componente fibroso. Por tanto, el contenido en fibra resulta un aceptable predictor de la digestibilidad de la energía (Henry, 1976; Pérez et al., 1984).

2.3.1.4. Energía Neta

La EN es una medida de la cantidad de energía realmente útil para el animal y que éste utiliza para su mantenimiento y producción. La EN se obtiene al sustraer de la EM la fracción de energía que se pierde por ineficiencia de los procesos metabólicos y que se desprende en forma de calor (*incremento térmico o extra calor*). La producción total de calor incluye, además del incremento térmico, la EN de mantenimiento o cantidad EN que el animal utiliza en las funciones de ingestión, mantenimiento de la temperatura corporal o consecuencia de la actividad física. La relación EN/EM se conoce como eficiencia de

utilización de la EM (K) y varía con el destino de la energía (K mantenimiento > K leche > K cebo...) y con el tipo de nutriente absorbido (K grasa > K glucosa > K aminoácidos). Para la mayoría de los alimentos las pérdidas en forma de incremento térmico varían entre el 10 y el 25% de la EB. El contenido en EN es el que mejor refleja la cantidad de energía verdaderamente aprovechable para el animal. Sin embargo, dado que medir la producción de calor es muy costoso y complicado, el contenido en EN de los alimentos se obtiene a partir del contenido en EM (o ED) dado que los valores de K son bastante constantes para el porcino o bien se predicen con un alto grado de precisión a partir del contenido en EM.

2.3.2. Metodologías de evaluación

En definitiva, el principal factor que condiciona el contenido energético de los alimentos y piensos es su digestibilidad. Para conocer el contenido en ED, EM o EN de los alimentos se recurre a diferentes metodologías. Medir o determinar la digestibilidad requiere realizar ensayos *in vivo* utilizando animales. Estos ensayos, aunque no suelen realizarse de forma rutinaria, siguen siendo la metodología de referencia. La digestibilidad también se puede estimar a partir de pruebas *in vitro* o, mejor aún, una vez se dispone de los valores de referencia *in vivo*, la digestibilidad de una determinada partida de alimento o pienso se puede predecir utilizando ecuaciones de predicción.

2.3.2.1. Digestibilidad *in vivo*

Existen diferentes metodologías para medir la digestibilidad *in vivo*. Los métodos *in vivo* proporcionan el modelo biológico que mejor representa la digestión de nutrientes y la utilización real para la misma edad, peso, sexo, o la fase de producción. Sin embargo, debido a la duración, el costo, la mano de obra, y posibles problemas de bienestar de los animales cuando se utilizan en modelos *in vivo*, se han explorado otras metodologías (ver siguientes epígrafes).

Genéricamente existen dos métodos para determinar la digestibilidad *in vivo*. El método de recolección total, en el que se requiere una medición precisa de la cantidad ingerida de alimento y de la cantidad de heces producida. Esta metodología requiere disponer de

jaulas de digestibilidad o utilizar marcadores inertes que colorean las heces, como el óxido férrico, óxido de cromo o índigo carmín (Adeola, 2001; Kong y Adeola 2014) y su aparición en las heces determina el inicio y el fin del periodo de recolección de heces.

El método alternativo es utilizar marcadores de digestibilidad. El método se basa en que el marcador es indigestible y por tanto, tras alcanzar el equilibrio, la cantidad de marcador ingerida por unidad de tiempo equivale a la excretada en las heces en el mismo periodo. Conocida la concentración del marcador en el alimento y heces y la composición del alimento y de las heces, se calcula la digestibilidad. Además de indigestible, el marcador debe representar una fracción pequeña de la dieta, ser completamente inerte y estar mezclado uniformemente con el pienso o dieta. Los marcadores más usados en estudios en porcino son el óxido de cromo, dióxido de titanio y las cenizas insolubles. Se suelen añadir a la dieta entre un 0,1% a 0,5% (Jagger et al., 1992; Kong y Adeola, 2014).

El diseño de los ensayos de digestibilidad *in vivo* será diferente dependiendo del alimento, ingrediente o materia prima a valorar. Por una parte, cuando el alimento a estudio resulta equilibrado y se puede administrar como dieta única, se utiliza el *método directo*. Este método es simple, el ingrediente problema es la propia dieta y se requieren pocos animales para determinar la digestibilidad. En algunos casos, sin embargo, el ingrediente/alimento a ensayo no puede ser administrado solo durante un período suficientemente largo de tiempo por ser nutricionalmente desequilibrado pero puede formar parte de la ración en una proporción considerable. En este caso es necesario formular una dieta basal y otra de prueba en la que una parte importante (generalmente 40% o más) de la dieta basal se sustituye por el ingrediente a ensayo. La digestibilidad del alimento problema se calcula *por diferencia* y se supone que no hay interacción digestiva entre los componentes del ingrediente a ensayo y de la dieta basal. Finalmente, algunos ingredientes solamente pueden ser incluidos en la dieta global en proporciones pequeñas, debido a la baja palatabilidad, a factores anti-nutricionales o cualquier factor de riesgo que aconseje su restricción. En este caso se determina la digestibilidad *por regresión*; se administran varias dietas (mínimo 3, mejor 4 o más) que constan de una dieta equilibrada y conocida a la que se añade proporciones crecientes del ingrediente a ensayo; se calcula la digestibilidad de las distintas dietas y la del ingrediente a ensayo se

obtiene por extrapolación a 100% de inclusión de dicho ingrediente. Con cualquiera de estos métodos, la digestibilidad se puede determinar utilizando el método de la recolección total o con el uso de marcadores inertes (Adeola, 2001; Kong y Adeola, 2014).

2.3.2.2. Digestibilidad *in vitro*

Los métodos *in vitro* son una alternativa a los métodos *in vivo*, ya que requieren menos mano de obra, son menos laboriosos, más rápidos, no son necesarios animales vivos y el coste económico es mucho menor (Boisen y Eggum, 1991; Boisen y Fernández, 1997; Spanghero y Volpelli, 1999). Sin embargo el valor de digestibilidad obtenido en el mejor de los casos será una buena estimación de la digestibilidad *in vivo*.

Varias metodologías han sido desarrolladas para los estudios *in vitro* (Boisen y Eggum, 1991), entre los cuales, el método utilizado por Boisen y Fernández (1997). En éste se realiza una digestión enzimática en dos o tres pasos con diferentes enzimas (pepsina y/o pancreatina y Viscozyme®) para determinar la digestibilidad de la materia orgánica y energía (Boisen y Fernández, 1997) o de la proteína (Boisen y Fernández, 1995; Boisen, 2007). Este proceso ha sido diseñado para imitar la digestión gástrica, pancreática y el intestino grueso en los cerdos. El producto Viscozyme®, es un complejo multienzimático que contiene una amplia variedad de carbohidrasas incluyendo arabinasa, celulasa, β -glucanasa, hemicelulasa, pectinasa y xilanasas.

Otras técnicas *in vitro* han empleado el uso de muestras fecales de cerdos alimentados con las dietas en estudio, en lugar de enzimas comerciales como en el caso anterior, para imitar la digestión y fermentación del intestino grueso (Wang et al., 2004).

2.3.2.3. Ecuaciones de predicción

Aunque la digestibilidad *in vivo* sigue siendo el método de referencia, en la práctica es de gran interés disponer de ecuaciones de predicción fiables para piensos acabados como control de calidad y por grupos de ingredientes para optimizar el proceso de formulación. Para piensos compuestos las ecuaciones de predicción suelen basarse en sus componentes químicos (Just et al., 1984; van der Meer y Perez, 1992; Noblet y Perez,

1993; Anderson et al., 2012), que además, muy comúnmente, se obtienen por metodología NIRs más que por vía húmeda. De hecho existen ecuaciones que no sólo predicen la digestibilidad sino también el contenido en ED, EM o EN (Noblet et al., 1994).

Las predicciones de la ED y la EM en los piensos han sido desarrolladas con la intención de definir los factores que influyen en estos valores. Por una parte, estudiar la relación entre la digestibilidad de los nutrientes y el contenido en ED y EM. Por otra parte, determinar si pueden ser predichos usando ecuaciones de regresión teniendo en cuenta diferentes fracciones químicas de la dieta.

Por lo que se refiere a las materias primas, en la bibliografía se encuentran los valores de referencia recopilados en tablas de referencia, basadas en el estudio de un amplio rango de muestras (FEDNA, 2013; NRC, 2012). Estas tablas son de interés para materias primas convencionales, donde la variabilidad en la concentración de energía es baja (Batterham, 1990). Desafortunadamente, esto no ocurre con los subproductos, donde la variabilidad suele ser elevada, o en la mayoría de los casos no existe información disponible.

Predicir el contenido en energía a partir del análisis químico es relativamente sencillo y se puede llevar a cabo en la mayoría de laboratorios. Se supone que la proteína bruta, la grasa bruta y los extractivos libres de nitrógeno contribuyen positivamente en la determinación de la ED y la EM de las dietas. Las cenizas actúan como diluyentes de la energía y por esto tienen un efecto negativo así como el contenido en fibras. Aunque esta máxima está relacionada con las dietas, también puede ser aplicado a las materias primas (Batterham, 1990; Just et al., 1984).

Aunque existen innumerables estudios que han determinado ecuaciones de predicción de la digestibilidad o del contenido energético a partir de la composición química o valores de digestibilidad *in vitro*, la aplicación de dichas ecuaciones dependerá de su fiabilidad y precisión. El grado de confianza con el cual las ecuaciones de predicción pueden ser utilizadas se evalúa a partir de los valores del coeficiente de determinación (R^2) y el error standard residual (RSD); la ecuación ofrecerá mayor fiabilidad conforme más se acerque a 1,0 el primer valor y más bajo sea el segundo. Para el caso de los subproductos, como la variabilidad de la composición química es muy alta, no se pueden utilizar ecuaciones de

predicción generales sino que son necesarias ecuaciones específicas para grupos de subproducto (Batterham, 1990).

2.3.3. Valoración de subproductos

En el caso particular de los subproductos, por lo general, debido a la falta de homogeneidad y a las fluctuaciones en su composición nutricional, es necesaria una evaluación precisa y continuada de su valor nutritivo. La composición química de subproductos puede variar en gran medida como resultado de diferentes materiales y métodos de procesado. La industria de piensos quiere materias primas con una composición constante y un suministro regular. Por lo tanto, son necesarios métodos de análisis simples que ofrezcan una evaluación precisa y rápida de las materias primas en general y de los subproductos en particular. En general, los datos analíticos no dan suficiente información sobre la digestibilidad de los diferentes nutrientes y de la materia orgánica. Los estudios de digestibilidad ofrecen una mayor y mejor información. Sin embargo los ensayos con animales son indispensables para evaluar la digestibilidad, la palatabilidad, el rendimiento de los animales, los riesgos potenciales asociados a su uso, así como determinar los niveles máximos de inclusión, que se derivan de los resultados obtenidos por los factores anteriores, y que darán como resultado final el valor potencial del subproducto (Boucqué y Fiems, 1988).

Muchos subproductos contienen una cantidad apreciable de fibra bruta. Estos recursos son menos valiosos para los cerdos, debido a su bajo valor de digestibilidad y de contenido en energía. Además de la baja digestibilidad, los materiales lignocelulósicos se caracterizan a menudo por una palatabilidad y capacidad de consumo baja (Boucqué y Fiems, 1988). En alimentos altamente fibrosos que producen dietas muy voluminosas, el aporte de energía puede llegar a ser crítica debido a una limitación del consumo voluntario. Esto puede ser debido a una limitación provocada por factores físicos relacionados con el llenado del estómago. Limitaciones similares se pueden producir con sustancias de sabor desagradable, con frecuencia asociados con la fibra, que están presentes en la dieta, así como sustancias tóxicas y antinutricionales (Henry et al., 1988).

Aunque los subproductos fibrosos no sean de gran interés en porcicultura se pueden utilizar en dietas para cerdas gestantes o en casos esporádicos de dietas finalizadoras de cerdos pesados de engorde.

2.3.4. Ingestibilidad

Aunque la digestibilidad y el contenido energético de un ingrediente sean altos, no tendrá ningún valor si los animales de destino no la ingieren o no lo hacen en cantidad suficiente.

En general, los factores que afectan a la palatabilidad y a la ingestión del alimento son: la forma física de presentación, los factores antinutritivos presentes en las materias primas, la adición de aditivos como aromas y los métodos de alimentación (Lawrence, 1990). La ingesta voluntaria de alimento está influenciada por varios factores: las condiciones ambientales, la capacidad física del tracto digestivo y el volumen de la ración (Garnsworthy y Cole, 1990). El factor más importante que determinará la productividad de los animales es el aporte de energía y satisfacer los requerimientos energéticos es uno de los objetivos en el control de la ingesta voluntaria (Garnsworthy y Cole, 1990).

El nivel de alimentación puede afectar la habilidad de los animales para extraer los nutrientes de la dieta. Los animales digieren una mayor proporción de nutrientes cuando son alimentados de forma restringida (Schneider y Flatt, 1975). Sin embargo, la digestibilidad se ve afectada negativamente cuando las dietas son altas en fibra bruta así como, administradas *ad libitum* ya que se aumenta el ritmo de paso (Garnsworthy y Cole, 1990).

Por su propia naturaleza, ciertos ingredientes, pueden afectar a la ingestión y/o aprovechamiento de otras materias primas cuando son incorporados en dietas mixtas. Estos efectos se conocen con el nombre de *efectos asociativos*, que pueden ser positivos pero que muy comúnmente son negativos. En algunos casos, pueden ser considerados como cualitativos más que cuantitativos (por ejemplo, ingredientes que transfieren olores o sabores extraños al pienso cuando se deterioran y pueden reducir el consumo de los animales). Otros ingredientes pueden contener factores antinutricionales que interfieren en los procesos digestivos. Estos *efectos asociativos* son difíciles de determinar en los

piensos ya que dependen de otros ingredientes de la dieta. Por ello, lo que normalmente se realiza es limitar el nivel de inclusión en las dietas (Garnsworthy y Cole, 1990).

CAPÍTULO 3: Objetivos

La presente tesis doctoral está asociada a la concesión, en el año 2011, de un proyecto CDTI a la empresa Ramadera Montbri, SAT. Se trata de una granja comercial de titularidad familiar que cuenta con una S1 de 900 madres y una S2 (transición) con 3600 plazas. La ampliación e instalación de alimentación líquida (AL) en la S3 (cebo) constituyó el objetivo estructural del proyecto CDTI. La empresa dispone de fábrica de piensos propia, tiene experiencia en la utilización de la AL e incluso utiliza habitualmente algunos subproductos agroindustriales (residuos de pan, yogurt, sueros...). Además, se pretende producir parte de las materias primas en la propia finca, ya sea en forma de cereal convencional o de "pastone", y buscar, valorizar y utilizar subproductos no convenciones para abaratar el coste de alimentación, aprovechando la utilización de la AL.

La revisión bibliográfica realizada en el capítulo anterior ha puesto de manifiesto que: 1) La versión más simple de AL, mezcla y distribución inmediata de pienso y agua, se ha empleado en alimentación porcina desde hace varias décadas obteniendo mayoritariamente resultados productivos satisfactorios, comparados con la alimentación en seco. Uno de los factores que mayor efecto muestra sobre los resultados es el ratio de dilución de la mezcla y existen algunos datos bibliográficos que sugieren que dicho ratio de dilución se reduce (menos agua para el mismo pienso) conforme lo hace la edad del cerdo. Sin embargo, las evidencias productivas son parciales e incompletas y no se ha encontrado un estudio sistemático que valore el efecto de la ratio de dilución sobre el aprovechamiento digestivo del pienso. La razón fundamental quizás sea de carácter técnico y práctico dado que tanto la bomba de presión que impulsa la mezcla, como las tuberías de distribución que integran el sistema requieren un ratio de dilución mínima para su funcionamiento adecuado. 2) Un segundo aspecto a destacar es que el máximo provecho económico del sistema de AL se obtiene cuando se introducen subproductos de bajo coste a la dieta, en especial aquellos que tengan una consistencia líquida o semilíquida. De hecho, hay empresas especializadas que ofrecen subproductos convencionales con garantías suficientes para ser utilizados sin riesgo (p. ej. yogurt, mayonesa, sueros...). Sin embargo, también existe un abanico de otros subproductos agroindustriales de proximidad que, sin coste o a un coste testimonial, podrían incluirse en las dietas del porcino a través de la AL. La utilización sistemática y efectiva de este tipo de recursos tropieza con su alta variabilidad (como subproductos son el resultado

colateral de la obtención de un producto principal), dificultades logísticas de aprovisionamiento (algunos son estacionales, requieren transporte y condiciones especiales para su conservación) y escaso conocimiento nutricional (desde aspectos toxicológicos hasta contenido en energía y nutrientes). Se requiere disponer de un primer inventario de subproductos candidatos y realizar la elección de los más prometedores para su utilización en condiciones prácticas. 3) Finalmente, salvo algunos subproductos de uso muy común (p. ej. DDGS, sueros de quesería, subproductos de panadería o cervecería), la información disponible relativa tanto al valor nutricional como a las condiciones de utilización práctica en alimentación porcina son escasas o incluso inexistentes. Los resultados bibliográficos se limitan a datos de composición química y algunas pruebas de producción y poco más. Disponer de esta información es fundamental si se pretende utilizar estos recursos de manera continuada en la alimentación del ganado sin comprometer los resultados productivos y económicos. Este hecho es más importante si cabe, cuando se pretende utilizar proporciones importantes de subproductos en un sistema de AL, dado que este conocimiento es esencial para realizar el reajuste periódico del pienso complementario.

En este contexto, el **objetivo general** de la presente tesis doctoral ha sido contribuir a optimizar el funcionamiento del sistema de AL instalado en la granja y estudiar el valor nutricional de subproductos de proximidad para su uso en la AL de cerdos de engorde. Para ello los **objetivos concretos** de este estudio son:

- 1) Identificar los subproductos agroindustriales, disponibles en un radio cercano a la granja, que puedan ofrecer un valor potencial para el ganado porcino. Seleccionar aquellos más prometedores, a partir de la composición química proximal y las propiedades físicas y logística de utilización y conservación, y que mejor se adapten a la AL porcina (**Capítulo 4**).
- 2) Estudiar el valor nutricional y principales limitaciones de utilización de los subproductos seleccionados utilizando dos enfoques generales: a) Para algunos subproductos (dos), evaluar los rendimientos productivos de los animales tras la introducción del subproducto en la dieta a niveles de inclusión bajos o moderados (**Capítulo 4**) y b) utilizar pruebas de digestibilidad *in vivo* para evaluar el contenido

energético y nivel máximo de incorporación (sólo en algunos casos) de todos los subproductos seleccionados (**Capítulo 5**).

- 3) Buscar métodos alternativos, menos costosos y laboriosos a la utilización de animales, y construir ecuaciones de predicción de la digestibilidad y del contenido energético de los subproductos agroindustriales para ganado porcino (**Capítulo 6**).
- 4) Finalmente, en otro contexto, estudiar en animales de diferentes edades un amplio rango de ratios de dilución (agua:pienso sólido) para determinar aquellos que optimizan la digestibilidad de la ración y, en menor medida también, los rendimientos productivos (**Capítulo 7**).

CAPÍTULO 4:
Identification and use of agro-industrial by-
products for liquid feeding systems in fattening
pigs

4.1. Objective

The lack of homogeneity, seasonability and variability in composition makes the inclusion of by-products into the pig diets an issue for the nutritionist which require a process to identify and evaluate the most suitable by-products (Brooks et al., 2001; Braun and Lange, 2004; Shurson, 2008). In this context, a benchmarking, a chemical analysis and production trials with two by-products were performed in order to study performance, carcass traits and economic benefits in growing-finishing pigs.

4.2. Material and methods

4.2.1. Benchmarking of by-products

Camp de Tarragona is located at the northeast of Spain and is surrounded by lots of agro-industrial companies. This study started with one survey conducted for each company that was agreeable to collaborate, in order to identify, quantify and evaluate the potential by-products generated in that region to be used in swine diets. The information was collected by detailed questionnaires to provide basic data on type and quantity of by-products generated, following some aspects listed by Crickenberger and Carawan (1996), which previously described the most important information about the practical use of by-products at a commercial farm. Firstly, the information collected was about the by-product supplied: information about the food industry or supplier, by-product supplied, a brief description of by-product with the principal ingredients known, technological processes used in their manufacture, and the physical procedures (time, temperature and pressure), microbiological stability, etc. Secondly, the information was also completed with logistic characteristics, such as: by-product production capacity, seasonality variation and storage conditions. And finally, information about the needs of a commercial farm: transport costs, storage capacity and storage conditions.

At the second stage of this study, several batches of by-products from factories, obtained during September 2011 and May 2015, that were considered logistical, technological, chemical and microbiological acceptable were analyzed for their chemical composition in the Department of Animal and Food Science of Universitat Autònoma de Barcelona.

4.2.2. Experimental design, animals, housing and diets.

The benchmarking used at the beginning of this experiment and subsequent chemical composition served to select two by-products (mayonnaise and almond meal) for their inclusion in the diets of growing-finishing pigs as a new ingredients.

4.2.2.1. Origin and chemical composition of by-products.

Mayonnaise is made up mainly of emulsion of oil in water with pasteurized eggs and other additives. The mayonnaise by-product was provided from a local waste supplier company. This by-product can come from residues of mayonnaise not edible for human consumption due to the recommended time of consumption has expired, or on the other hand, it can come from residues of cleaning lines of manufacturing. In both cases, it could not be discarded the possibility of other dressings were present in low percentage in this by-product.

Almond meal by-product consisted in residues of almond nuts without hulls. It was provided by a local industry transformer of nuts for cakes' dressings, it means that it could not be discarded the possibility of concurrence of other nuts such as chestnuts, walnuts and peanuts but in small proportion, adding more nutritional variability to the by-product.

4.2.2.2. Trial 1

A total of 180 growing-finishing pigs (Landrace x Large White) with 24.6 ± 3.93 Kg of initial body weight (BW), were distributed into two dietary treatments according to their initial BW in 10 pens with 18 pigs per pen (n=5). The treatments were: (1) a control diet (CON) and (2) diet containing mayonnaise by-product (MAY1).

The experimental period lasted 14 weeks and it was divided in 3 phases of growing (growing, 0 – 38 days; fattening, 39 – 72 days; and finishing, 73 – 98 days). In each phase, experimental diets were formulated to be isoenergetic and isoproteic and to meet the energy and nutrient recommendations of FEDNA (2013). The experimental MAY1 diets contained 4.0, 3.5 and 3% of mayonnaise inclusion in each phase of growing. Ingredients and chemical composition of dietary treatments are summarized in **Table 4.1**. Feed was

delivered in a liquid form (2.7:1, water:feed ratio) through WEDA automatic liquid feeding system. Animals were weighted at the beginning and at the end of each phase of the trial in order to evaluate average daily gain (ADG). Animals were fed automatically 6 times a day aiming to ensure that all animals intake their meal. Average daily feed intake (ADFI) was recorded from WEDA software and feed conversion ratio (FCR) was calculated and expressed in dry matter bases.

Table 4.1. Diets composition and chemical analysis of the experimental diets in Trial 1 (as-fed basis; g/kg).

Ingredient (g/kg)	Phase 1		Phase 2		Phase 3	
	CON	MAY1	CON	MAY1	CON	MAY1
Barley	300.0	236.5	300.0	0.5	300.0	52.9
Maize	247.6	-	159.1	-	174.7	-
Soya bean 47+2	203.8	175.3	204.4	161.4	190.1	144.7
Triticale	200.0	200.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Rapeseed meal	16.4	60.0	9.6	60.0	10.8	60.0
Wheat	-	258.9	-	417.5	-	389.3
By-product	-	40.0	-	35.0	-	30.0
Calcium carbonate	10.5	9.9	10.9	10.0	10.4	9.6
Monocalcic phosphate	6.7	5.5	5.0	4.5	3.4	2.9
Lysine-HCl	4.8	4.2	2.7	2.7	2.4	2.5
Salt	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Vitamin and mineral premix ^a	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Threonine	1.3	1.2	-	-	-	-
Natuphos 500-P ^b	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
DL-Methionine	0.8	0.6	0.3	0.3	0.04	0.06
Axtra [®] XB 201 TPT ^c	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Price (€/Tn)	325.52	322.61	318.70	310.42	313.74	305.45

Analyzed (DM basis)

Dry Matter	88.63	88.89	88.74	88.27	87.87	87.01
GE (Kcal/kg)	4,470	4,469	4,395	4,516	4,464	4,531

CP (%)	20.05	20.28	20.41	20.23	20.05	20.32
EE (%)	3.59	4.90	1.92	3.74	2.22	2.42
CF (%)	4.83	4.69	3.72	4.49	4.67	4.38
<i>Calculated (DM basis)</i>						
Lys (%)	1.35	1.35	1.17	1.21	1.13	1.16
Methionine	0.38	0.38	0.35	0.36	0.32	0.33
Cysteine	0.37	0.39	0.38	0.40	0.38	0.40
Threonine	0.86	0.87	0.71	0.74	0.69	0.72
Tryptophan	0.24	0.25	0.24	0.25	0.24	0.24
Calcium	0.87	0.87	0.85	0.85	0.80	0.80
Phosphorous	0.60	0.62	0.56	0.60	0.53	0.56

^a The premix provided vitamins and minerals (per kg) as follows: vitamin A, 3,000,000 IU; vitamin D3, 600,000 IU; vitamin E, 3,644 mg; vitamin K3, 345 mg; vitamin B1, 294 mg; vitamin B2, 1,248; Pantothenic acid, 3,920 mg; Nicotinic acid, 8,036 mg; vitamin B6, 686 mg; vitamin B12, 7 mg; Choline, 25,020 mg; Biotin, 16 mg; Zn, 40,052 mg as ZnO; Fe, 30,000 mg as FeSO₄ · 7H₂O; Mn, 16,554 mg as MnO; Cu, 8,000 mg as CuSO₄ · 5H₂O; I, 300 mg as Ca(IO₃)₂; and Se, 66 mg as Na₂SeO₃.

^b 500 FTU of *Aspergillus Niger* (Natuphos® BASF)

^c Xylanase and beta-glucanase

4.2.2.3. Trial 2

In the same facilities than in Trial 1, 180 growing pigs (Landrace x Large White) with 28.0 ± 3.47 Kg of BW, were distributed into two dietary treatments according to their initial BW (n=5). Two experimental diets were formulated to be isoenergetic and isoproteic and to meet the energy and nutrient recommendations of FEDNA (2013). The treatments were: (1) a control diet (CON) and (2) diet containing 7.75% of mayonnaise by-product (MAY2). Ingredients and chemical composition of dietary treatments are summarized in **Table 4.2**. As in the previous study, feed was delivered 6 times a day through WEDA automatic liquid feeding system. The experimental period lasted 4 weeks. The productive parameters were recorded in the same way than in Trial 1.

4.2.2.4. Trial 3

Animals from Trial 2, after 4 weeks of wash-out were rearranged in the same facilities than in Trial 1 and Trial 2. A total of 180 finishing pigs (Landrace x Large White) with 65.9

± 8.97 Kg of initial BW were distributed into two dietary treatments (n=5). The treatments were: (1) a control diet (CON) and (2) diet containing 10% of almond meal by-product (ALM). As mentioned in the previous trials, the experimental diets were formulated to be isoenergetic and isoproteic and to meet the energy and nutrient recommendations of FEDNA (2013). Ingredients and chemical composition of feed are summarized in **Table 4.2**. As mentioned in Trial 1 and 2, feed was delivered, 6 times a day, in a liquid form through WEDA liquid feeding system. The experimental period lasted 5 weeks and animals were weighted at the beginning and at the end of the trial in order to evaluate productive parameters as mentioned in Trial 1 and 2.

At the end of the trial animals were slaughtered in a commercial slaughterhouse and parameters of dressing percentage and lean meat percentage using AutoFOM were recorded.

Table 4.2. Diets composition and chemical analysis of the experimental diets in Trial 2 and Trial 3 (as-fed basis; g/kg).

Ingredient (g/kg)	Trial 2		Trial 3	
	CON	MAY2	CON	ALM
Wheat	-	-	300.0	272.5
Maize	368.0	300.0	300.0	243.0
Soybean 47+2	115.0	210.9	204.1	188.9
Soy full fat	145.0	-	-	-
Barley	250.0	322.8	160.5	170.3
Fat	30.0	-	10.4	-
Rapeseed meal	60.0	60.0	-	-
By-product	-	77.5	-	100.0
Calcium carbonate	8.9	9.8	10.2	10.1
Monocalcic phosphate	11.4	7.5	4.7	5.2
Salt	4.0	4.0	4.0	3.8
Vitamin and mineral premix ^a	3.0	3.0	3.0	3.0
Lysine-HCl	2.5	2.2	1.9	1.8
Natuphos 500-P ^b	1.0	1.0	1.0	1.0
DL-Methionine	0.6	0.6	0.1	0.3

Axtra [®] XB 201 TPT ^c	0.1	0.1	0.1	0.1
Price (€/Tn)	345.63	297.58	300.69	273.24
<i>Analyzed (DM basis)</i>				
Dry Matter	89.06	86.36	90.09	91.18
GE (Kcal/kg)	4,682	4,882	4,403	4,310
CP (%)	22.79	22.99	18.81	18.68
EE (%)	8.39	4.03	3.51	3.12
CF (%)	3.71	4.28	3.41	3.19
<i>Calculated (DM basis)</i>				
Lys (%)	1.30	1.30	1.10	1.05
Methionine	0.40	0.41	0.32	0.33
Cysteine	0.38	0.39	0.36	0.33
Threonine	0.85	0.89	0,70	0.70
Tryptophan	0.25	0.25	0.23	0.23
Calcium	0.90	0.93	0.78	0.77
Phosphorous	0.75	0.66	0.52	0.50

^a The premix provided vitamins and minerals (per kg) as follows: vitamin A, 3,000,000 IU; vitamin D3, 600,000 IU; vitamin E, 3,644 mg; vitamin K3, 345 mg; vitamin B1, 294 mg; vitamin B2, 1,248; Pantothenic acid, 3,920 mg; Nicotinic acid, 8,036 mg; vitamin B6, 686 mg; vitamin B12, 7 mg; Choline, 25,020 mg; Biotin, 16 mg; Zn, 40,052 mg as ZnO; Fe, 30,000 mg as FeSO₄ · 7H₂O; Mn, 16,554 mg as MnO; Cu, 8,000 mg as CuSO₄ · 5H₂O; I, 300 mg as Ca(IO₃)₂; and Se, 66 mg as Na₂SeO₃.

^b 500 FTU of *Aspergillus Niger* (Natuphos[®] BASF)

^c Xylanase and beta-glucanase

4.2.3. Cost/benefit analysis

Assuming the same raw material prices than in 2013, when the trials were performed (€ per tonne). Diet prices were calculated with or without by-products. Taking into account the diet price, ADFI and days of study, total cost of diet in each trial was calculated and compared between them.

4.2.4. Chemical analysis

A representative sample of each by-product obtained during the benchmarking and the by-products used in experimental trials and their feed were collected and dried. Samples were analyzed for dry matter (DM), gross energy (GE), ether extract (EE), crude protein

(CP) and fiber fractions, crude fiber (CF), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF) and lignin (LIG) following the procedures outlined by the Association of Official Analytical Chemists, 2007. The DM was determined on an aliquot sample to establish the residual water content after drying for 24 h at 103°C and the ash content was determined after ignition of a weighed sample in a muffle furnace (Carbolite CWF 1100) at 550°C for 6 h. The corresponding analytical result was expressed on a DM basis. The gross energy (GE) was determined using oxygen bomb calorimeter (IKA – Calorimeter System C 4000 Adiabatic). The ether extract was analyzed by solvent extraction system (Soxtec™ 2055 FOSS). Fiber fractions were analyzed using Ankom220 Fibre Analyser Unit (Ankom Technology Corporation, Macedon, NY, USA) and expressed including residual ash as described by Van Soest et al. (1991). The crude protein (CP) was determined by Kjeldhal system (Kjeltec 8400 Analyzer Unit FOSS). Crude protein was determined as total N x 6.25.

4.2.5. Statistical analysis

Data were analyzed by a one-way ANOVA using the GLM procedure of SAS (SAS Institute INC., Cary, NC) and are presented as mean. Statistical differences among mean values were assessed by the Tukey t-test. The level of significance was established at 5%. The pen was the experimental unit for all performance variables studied and, in each trial, initial BW was introduced in the model as a covariable.

4.3. Results

4.3.1. Benchmarking of by-products

The first step in the identification of potential by-products to be used in pig diets was to perform a benchmarking. There were identified around 20 potential by-products from different origins. To this purpose a first survey was conducted and the most relevant information obtained is presented in **Table 4.3**.

Cephalopods by-product consisted of skins and legs removed from mainly sepia, prior to frozen. It was a constant and homogeneous by-product with an interesting percentage of protein and without cost. However, the high moisture content, which would have

increased the transport costs, and the difficulties to storage at farm level (frozen), discarded its use.

By-products from cereal origin, for instance, high moisture corn and hominy feed from corn origin, have been already used in animal nutrition, mainly in ruminants, and their chemical and logistic characteristics made them good alternatives. Brewery by-product was a residue after beer making using mainly barley malt; this was a homogeneous by-product with high protein content, fiber fractions and water that would make its storage complicated with special treatments to control the spoilage of microorganisms. By-products from bakery industries, such as, liquid and dry bakery by-products consisted of mass of bread, cookies, cakes, etc. They were slightly homogeneous with no fluctuations along the year and with a great GE content. Camelina meal and husks by-products were derived from *Camelina sativa* after oil extraction. The major problem with those by-products were the high price, because of some companies are specializing with these by-products. By-products from cereal origin, in general, were available along the whole year, some due to the specific storage (i.e. ensiling of high moisture corn), homogeneous and with high price.

Residues from nuts production were the almond meal, based on residues of nuts, basically broken almonds; cocoa meal, a mixture of rest of cocoa seeds, chocolate bars with a low percentage of crushed wraps, and finally, chocolate-nut, a mixture of the above two with a low proportion of candies. Those by-products came from different factories, mainly human food industries specialized in chocolate components of bakery products or from almond industry. In general, they were by-products with an interesting chemical composition (high energy content), but the main problem was the lack of supplying and homogeneity between batches.

The by-products from vegetable and fruit industries were very heterogeneous, as expected, those by-products had seasonal variability. Most of them were rich in fiber fractions and in some cases the industries could not ensure the composition of their residues. Okara, sugar beet pulp and potato starch has been already used as animal feed and are well characterized, for this reason, those by-products usually have an additional price.

The last group was by-products that did not fit in another group. For example, mayonnaise was the richest by-product in energy but also the highest in price; wine yeast came from the residues of wine fermentation, interesting by-product for the percentage in protein but the high content in water (96%) and the possibility of alcohol content declined its further study; oils from frying were discarded because of possible dioxin presence.

Table 4.3. Results of questionnaire on identification of the agro-industries and their by-products.

Origin	By-products	Continue availability	Homogeneity	Seasonal variability	Storage conditions	Cost of by-product	Strengths	Weaknesses
Animal origin								
	Cephalopods by-product	Yes	Yes	No	Special treatments	No	High % CP	High % of water Storage
Cereal origin								
	High moisture corn	Yes	Yes	No	Ensiling	Yes	Homogeneous	Cost and storage
	Hominy feed	Yes	Yes	No	Big bags	Yes	Homogeneous	Cost and storage
	Brewery by-product	Yes	Yes	No	Special treatments	Yes	High % CP	Storage
	Liquid bakery by-product	Yes	Yes	No	Special treatments	Yes	High % GE and storage Use in liquid feed	High % of water Cost and storage
	Dry bakery by-product	Yes	Yes	No	Big bags	No	High % GE and storage	Some packages
	Camelina husk	Yes	Yes	No	Big bags	Yes		Cost
	Camelina cake	Yes	Yes	No	Big bags	Yes	High % CP	Cost
Nuts								
	Cocoa meal	No	No	No	Big bags	No	High % fiber fractions	Variability
	Almond meal	Yes	Yes	No	Big bags	No	High % EE and GE	
	Chocolate-nuts	No	No	No	Big bags	No	High % GE, palatability	Variety in composition
Vegetables and fruits								
	Sugar beet pulp	Yes	Yes	No	Ensiling	Yes	High % fiber fractions	Storage
	Potato starch	Yes	Yes	No	Special treatments	Yes	High starch content	Storage
	Olive by-product	No	Yes	Yes (Fall)	Special treatments	No	High % EE and GE	Seasonability
	Okara	Yes	Yes	No	Special treatments	Yes	High % CP	Storage

Agro-industrial by-products for liquid feeding pigs

Kiwi	No	No	Yes	Special treatments	No	High % sugars and fiber	Heterogeneity depending on the fruit
Vegetable by-products	No	No	Yes	Special treatments	No	High % fiber fractions	High % of water
<i>Others</i>							
Mayonnaise	Yes	Yes	No	Special treatments	Yes	High % EE and GE	Microbial concerns Cost
Wine yeast	Yes	Yes	Yes	Special treatments	No	High % CP	High % of water
Oils from frying	Yes	Yes	No	Special treatments	No	High % GE	Biological concerns (dioxins)

4.3.2. Chemical composition of by-products

Table 4.4 shows the chemical composition of all batches of by-products obtained during September 2011 and May 2015. The main reason why some by-products only have just one batch is because the samples arrived at the end of the study.

The by-products were classified according their potential balance between their energy and protein content (Ratio GE:CP).

In the first group, among the energetic by-products, mayonnaise was the most energetic, followed by olive by-product. As expected, mayonnaise presented the highest percentage of EE, 75.6%. Although mayonnaise was supplied by a waste supplier, the homogeneity in the chemical composition was low, as it is shown in the variability in DM, GE and EE content. This by-product was low in CP, and fiber fractions were not analyzed due to the lack of fiber components in its process of production, mainly oil and pasteurized eggs. Olive by-product presented a low content of crude protein and high content of fiber fractions due to its vegetable origin. Potato starch was also included in this group due to its low content of CP respect to GE, its nutritive value come from the starch content.

In the second group or proteic by-products, residues from cephalopods presented the highest percentage of crude protein (81%), despite its physical aspect was solid, the DM was just around 10%. Okara was classified as a proteic by-product (42%), although it was also an energetic by-product with a 6221 kcal/kg of GE, due to the content of EE around 24%. Camelina cake and brewery by-products were also considered proteic by-products with higher percentages of fiber fractions that reduced the percentage of energy in these by-products. Almond meal was considered as a proteic owing to its CP percentage was higher than GE, although it also had high GE content due to its high EE (57.4%).

The third group was represented by equilibrated by-products in GE:CP, some of those by-products also presented high levels of fiber fractions. Their GE never reached 5000 kcal/kg. Camelina husks was the most fibrous by-product, followed by sugar beet pulp and kiwi. Cocoa meal, hominy feed, high-moisture corn, and bakery by-products, presented a moderate content of CP with moderate-high percentages of fiber fractions.

Table 4.4. Chemical composition of different batches of alternative by-products (mean ± SD; expressed in DM bases).

Class	By-product	n	Ratio GE:CP*	DM	OM	GE (Kcal/kg)	CP	EE	CF	NDF	ADF	LIG
Potentially energetic												
	Mayonnaise	4	6.05	48.0 ± 13.20	96.9 ± 1.95	8480 ± 624.8	1.4 ± 0.38	75.6 ± 8.04	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Olive by-product	1	0.88	35.4 ± 0.00	94.2 ± 0.00	5088 ± 0.00	5.8 ± 0.00	10.9 ± 0.00	38.9 ± 0.00	50.0 ± 0.00	39.5 ± 0.00	23.9 ± 0.00
	Potato starch	1	10.08	51.5 ± 0.00	99.5 ± 0.00	4035 ± 0.00	0.4 ± 0.00	0.3 ± 0.00	0 ± 0.00	0 ± 0.00	0 ± 0.00	0 ± 0.00
Potentially proteic												
	Cephalopods by-product	3	0.06	10.3 ± 1.70	91.5 ± 2.31	4913 ± 548.9	80.9 ± 1.54	5.3 ± 0.14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Okara	1	0.14	18.8 ± 0.00	95.9 ± 0.00	6221 ± 0.00	42.2 ± 0.00	24.2 ± 0.00	4.8 ± 0.00	12.2 ± 0.00	6.9 ± 0.00	0.6 ± 0.00
	Camelina cake	1	0.13	90.7 ± 0.00	93.9 ± 0.00	4933 ± 0.00	39.5 ± 0.00	3.9 ± 0.00	15.1 ± 0.00	40.9 ± 0.00	20.8 ± 0.00	5.0 ± 0.00
	Brewery by-product	3	0.16	23.2 ± 0.14	95.7 ± 0.12	4492 ± 927.5	28.5 ± 1.67	7.8 ± 0.70	14.2 ± 0.60	51.6 ± 6.93	18.2 ± 1.36	2.6 ± 0.80
Equilibrated												
	Camelina husk	1	0.71	91.0 ± 0.00	92.4 ± 0.00	4594 ± 0.00	6.4 ± 0.00	6.0 ± 0.00	35.6 ± 0.00	54.7 ± 0.00	37.2 ± 0.00	7.4 ± 0.00
	Sugar beet pulp	2	0.50	27.3 ± 1.73	90.7 ± 0.85	3897 ± 86.8	7.8 ± 0.53	0.4 ± 0.04	17.6 ± 1.51	48.3 ± 1.90	23.1 ± 1.79	0.9 ± 0.014
	Kiwi	4	0.37	7.0 ± 3.67	90.8 ± 3.99	4381 ± 711.8	11.8 ± 4.47	4.2 ± 1.44	17.4 ± 1.93	22.5 ± 7.34	18.6 ± 5.86	7.0 ± 0.71
	Cacao meal	2	0.50	83.4 ± 1.67	95.3 ± 0.18	4460 ± 552.9	9.0 ± 0.19	14.0 ± 0.56	6.9 ± 0.04	22.7 ± 3.69	14.8 ± 1.95	6.5 ± 0.64
	Hominy feed	2	0.50	80.4 ± 6.19	97.4 ± 0.21	4527 ± 108.1	9.1 ± 0.17	5.7 ± 3.40	6.1 ± 1.54	30.4 ± 16.18	6.9 ± 2.44	0.6 ± 0.36
	High moisture corn	4	0.54	64.2 ± 4.32	98.5 ± 0.64	4476 ± 237.7	8.3 ± 1.03	3.9 ± 0.26	1.8 ± 0.36	7.4 ± 0.50	2.3 ± 0.25	0.1 ± 0.01
	Liquid bakery by-product	4	0.60	43.0 ± 8.03	98.7 ± 0.36	4491 ± 90.2	7.5 ± 0.55	6.2 ± 0.55	0.4 ± 0.09	2.2 ± 3.18	0.2 ± 0.20	0.1 ± 0.08
	Dry bakery by-product	2	0.62	95.0 ± 0.28	99.0 ± 0.01	4591 ± 206.2	7.4 ± 0.35	3.9 ± 0.19	0.5 ± 0.20	1.4 ± 0.10	0.6 ± 0.03	0.1 ± 0.01
	Almond meal	1	0.44	94.5 ± 0.00	98.0 ± 0.00	7462 ± 0.00	16.9 ± 0.00	57.4 ± 0.00	2.9 ± 0.00	3.7 ± 0.00	2.6 ± 0.00	0.7 ± 0.00
	Chocolate-nuts	3	0.31	97.1 ± 0.81	98.1 ± 0.34	5483 ± 455.8	17.6 ± 4.12	32.0 ± 3.65	0.7 ± 0.00	1.7 ± 2.10	1.4 ± 1.51	0.6 ± 0.42

*Ratio GE:CP (Mcal/%)

4.3.3. Performance trials results

Once, the surveys and chemical composition were analyzed, the by-products selected to carry out experimental trials were mayonnaise and almond meal, due to their chemical composition, continuous availability and homogeneity. The chemical composition of the by-products are presented in **Table 4.5**.

Table 4.5. Chemical composition of by-product used in Trial 1, Trial 2 and Trial 3 (mean \pm SD; expressed in DM basis).

%	Trial 1; Mayonnaise	Trial 2; Mayonnaise	Trial 3; Almond meal
DM	64.2 \pm 0.92	33.2 \pm 0.05	94.5 \pm 0.06
CP	1.48 \pm 0.02	1.0 \pm 0.06	16.9 \pm 0.30
EE	82.5 \pm 0.34	73.8 \pm 0.93	57.4 \pm 0.61
CF	0.0	0.0	2.9 \pm 0.25
GE (kcal/kg)	9217 \pm 93.5	7707 \pm 2.15	7462 \pm 0.75

The results of performance in Trial 1 (**Table 4.6**) showed that with the inclusion of 4, 3.5 and 3% of mayonnaise in MAY1 diets, in each phase of fattening, animals in the CON diet tended to weigh 4 kg less than MAY1 diet, at the end of the study ($P=0.16$). Animals in MAY1 diet ate around 40 g/day more than CON group ($P>0.05$), and the ADG was significantly higher in that group ($P<0.05$).

Table 4.6. Performance results of Trial 1.

	Trial 1		RSD	P-value
	CON	MAY1		
Initial BW (Kg)	24.60	24.58	0.016	1.0000
Final BW (Kg)	96.39	100.43	1.830	0.1620
ADFI (Kg/d)	0.73	0.77	0.020	0.2156
ADG (Kg)	1.76	1.95	0.050	0.0286
FCR (Kg/Kg)	2.41	2.55	0.121	0.4525

Regarding to Trial 2, including a higher percentage of mayonnaise in the MAY2 diet (7.75%) during 4 weeks, did not show significant differences between diets (**Table 4.7**). In

the last trial (Trial 3), ALM diet containing almond meal (10%) during 5 weeks significantly affect performance, decreased final BW (2.1%) and ADG (6.1%) compared with CON diet (Table 4.7).

For all trials, the inclusion of by-products in liquid diets did not significantly affect FCR (Tables 4.6 and 4.7). However, the animals in by-product diets showed a FCR numerically higher than CON diets in the three trials (5.5% in Trial 1, 0.7% in Trial 2 and 5.1% in Trial 3).

The results regarding to carcass traits (Table 4.7) were only measured at the end of Trial 3. Parameters such as carcass weight, dressing percentage and lean meat percentage were not affected by the inclusion of almond meal in the diet.

The inclusion of by-products in liquid diets showed an economic benefit of 15% in Trial 2 for mayonnaise and 10% in Trial 3 for almond meal. However, those benefits were not found in Trial 1 (-3%).

Table 4.7. Performance results of Trial 2 and Trial 3 and carcass traits of Trial 3.

	Trial 2				Trial 3			
	CON	MAY2	RSD	P-values	CON	ALM	RSD	P-values
<i>Productive parameters</i>								
Initial BW (Kg)	27.97	27.98	0.137	0.9681	65.55	66.30	0.599	0.4028
Final BW (Kg)	49.61	49.20	0.558	0.6259	96.24	94.26	0.498	0.0287
ADFI (Kg/d)	1.69	1.67	0.016	0.6383	2.30	2.26	0.114	0.8089
ADG (Kg/d)	0.62	0.61	0.058	0.7875	0.82	0.77	0.014	0.0293
FCR (Kg/Kg)	2.74	2.76	0.111	0.9000	2.81	2.96	0.155	0.5450
<i>Carcass traits</i>								
Carcass weight (Kg)					76.24	76.09	0.451	0.8177
Dressing percentage (%)					75.04	75.33	0.149	0.2127
Lean meat percentage (%)					61.19	61.08	0.347	0.8254

4.4. Discussion

Dietary inclusion of by-products from human food industries and bio-fuel production have become increasingly attractive for use in swine diets, as alternative feedstuffs to reduce feed costs, and thereby enhance economic sustainability of the swine industry (Jha et al., 2010; Zijlstra and Beltranena, 2013). However, some of these by-products still lack studies about its adequate nutritional composition, level of inclusion, as well as its economic viability (Perondi et al., 2014). Liquid feeding systems allow the incorporation of wet by-products into swine diets, especially if the swine farm is nearby a processing plant. Otherwise, transportation, storage and handling becomes an issue (Boucqué and Fiems, 1988; Zijlstra and Beltranena, 2013).

For this reason, the surveys performed at the first stage of this study, as mentioned by Crickenberger and Carawan (1996) and Valizadeh and Sobhanirad (2009), were used to detect the potential by-products generated near to the target farm. With the surveys, preliminary ideas of the potential by-product were evaluated. Those by-products that could represent a risk for the animals were removed for further evaluation, such as oils from drying. The homogeneity in by-product and the continuous availability were in general stable with no important fluctuations, instead of by-products from vegetal and fruit origin, and also cocoa meal and chocolate-nuts, which were the most variables in availability. The needs of storage were also evaluated taking into account the requirements of the farms. As expected, solid by-products were easier to handle than those liquids, and normally are supplied in big-bags. However, solid by-products, such as bakery by-products, were supplied with some packages. Even though that by-product could be high palatable for the animals (Braun and Lange, 2004; Stickney, 2009), the need for separating the packages from the by-product, could be a problem in a commercial farm.

Once the surveys were performed and potential by-products were identified, it was important to take into account the nutritive value (Stickney, 2009). There are lots of studies and bibliography that have studied the nutritive value of different by-products and feedstuffs (i.e. Crawshaw, 2001; Braun and de Lange, 2004; NRC, 2012; FEDNA, 2013), however, most of them are regarding to conventional by-products from vegetal origin,

and ruminants as a target animals (Boucqué and Fiems, 1988; Gasa et al., 1989). To evaluate properly a new by-product, the analysis of the nutritive composition of several batches is required in order to study its composition and its variability within batches (Braun and Lange, 2004; Stickney, 2009) and within the same batch during storage (Gasa and Castrillo, 1991; Stickney, 2009). In this way, the chemical composition revealed that the most interesting by-products were mayonnaise and almond meal because of the high energetic content, their homogeneity and the easy handle at farm level.

With all the information regarding to the by-product, the nutritive value and its bioavailability in the target animals has to be confirmed. In Trial 1, the first interpretation of the results suggests that the inclusion of mayonnaise by-product at 3 – 4% in grower-finishing pig diets, was not competitive because slightly improved ADG, significantly increased ADFI and numerically impaired FCR (5.5%). However, a more exhaustive analysis of the results showed that, having an equivalent chemical and nutrient composition, of control and experimental diets, did not mean that both diets are composed with the same raw materials. In fact, in order to achieve an equivalent chemical and nutritional composition, the introduction of a small percentage of mayonnaise by-product in the control feed determined that to maintain the minimum price, the experimental diet replaced the corn and soybean in CON diet by barley, wheat and rapeseed cake. For this reason, the results obtained in Trial 1 might be due to the inclusion of mayonnaise or to the use of different raw materials.

Trial 2 and Trial 3 were carried out to test mayonnaise again and almond meal. The diets used in those trials were isoenergetic and isonutritives, as in the first trial, but with few variations in the ingredient composition between control and experimental diets.

The results showed that the use of mayonnaise (Trial 2) slightly reduced ADG in a 1.8%, and the inclusion of almond meal (Trial 3) reduced ADG in a 6.5%, those results of performance are in agreement with Jha et al. (2012) who found that the inclusion of commercial co-product (made from co-extruded flaxseed and field pea) from 10 to 45% in growing – finishing pigs, decreased ADFI, ADG and BW. Moreover, Chu et al. (2011), using fermented agro by-products (brewer's grain, rice bran and by-product of king oyster mushrooms), also found a significant decrease in ADG and feed efficiency respect to

control diets without by-products. However, feeding up to 20% of expeller – pressed canola meal to weaned pigs reduced the feed costs without impairing performance parameters in a study performed by Landero et al. (2012), even Scholten et al. (1999) found a significant improvement in ADG, ADFI and FCR, in pig fed diets with fermented by-products.

On the other hand, although there was a slight reduction in performance, the reduction in feed cost using mayonnaise and almond meal represented a 15% and a 10%, respectively. The economic benefits that we achieved using by-products are in accordance to Scholten et al. (1999), who found similar benefits (10-17% of feeding cost reduction) using liquid diets with fermented by-products (liquid wheat starch, potato steam peel and cheese whey) compared with dry diets. Moreover, Jha et al. (2012) increasing commercial co-product inclusion up to 65% in growing-finishing pigs, decreased by 14% the feed cost per tonne, and Chu et al. (2011) also found an economical benefit through decreased feed cost up to 33%.

Performance trials are long lasting experiments that require for high level of labour, are expensive and eventually, the data obtained are limited. Depending on the characteristics of the feeding system, only two experimental diets can be assessed (control vs treatment), and when there is no information about the new by-product, the level of inclusion in the treatment diet would be low in order to avoid risks.

In order to increase the knowledge about the nutritional value of non-conventional by-products and (Gasa et al., 1989; Serena and Bach Knudsen, 2007) to reduce the time, labour and cost of by-products evaluation in a field trials, other alternatives could be explored, such as *in vivo* or *in vitro* digestibility trials. Such alternatives are easier ways to characterize new ingredients and could help to determine which would be the optimum level of inclusion to reduce the risk in dietary inclusion and increase the accuracy of feed formulation (Woyengo et al., 2014).

4.5. Conclusions

It can be concluded that, the search of alternative ingredients or new by-products to be used in animal nutrition, requires a first step to facilitate the identification of potential by-

products with their strengths (i.e. by-product without cost, main nutrient, storage conditions) and weaknesses (i.e. cost of by-product, transport costs, special treatments, seasonability); a second step to perform an exhaustive nutritional analysis to evaluate their chemical composition, the variability within batches, and potential hazards. And finally, to be able of formulate diets to test the by-product, at low levels of inclusion, in front of a control diet in the target animals.

Aiming to accurately develop performance studies with potential new ingredients, is not enough to control chemical composition, nutritional value and formulate isonutritive and isoenergetic diets, but also try to use the similar ingredients composition in order to avoid conflicts in the results.

On the other hand, the inclusion of a low percentage of by-products in growing-finishing pig diets, achieved an economical benefit through the reduction in feed cost by 15% with the inclusion of mayonnaise and 10% with almond meal.

Additionally, more by-product studies' should be required in order to evaluate the digestibility and finally, to adequate the maximum levels of inclusions in diets.

CAPÍTULO 5:
***Digestibility of some conventional and non-
conventional feedstuff and by-products to be used
in liquid feed growing-finishing pigs***

5.1. Objective

The objective of this chapter was to characterize and to determine the coefficients of apparent total tract digestibility (CATTD) of organic matter (OM), gross energy (GE) and nutrients of eight different ingredients or by-products. Two different digestibility approaches were used: a “regression” procedure, using levels of inclusion, for the by-products with scarce knowledge, and a simple method “by difference” for more conventional ingredients.

5.2. Material and methods

The experiments were conducted at the animal research facilities, Servei de Granges i Camps Experimentals (SGCE), of the Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Spain. The experimental procedures were approved by the Ethical Committee on Animal Experimentation of the Universitat Autònoma de Barcelona (nº 2788).

5.5.1. Chemical composition of by-products

Four non-conventional by-products from the food industry and four conventional feeds or by-products from cereals and the food industry were evaluated. Non-conventional by-products consisted of mayonnaise, almond meal, cocoa meal and kiwi fruit; conventional by-products were liquid bakery by-product, brewery by-product, hominy feed and high-moisture corn. By-products definitions are as follow: *Mayonnaise* was an emulsion of pasteurized eggs and oil and was provided by a waste manager. *Almond meal* was based on residues of nuts, basically broken almonds and also was supplied by a waste manager. *Cocoa meal* is a mixture of the remains of cocoa seeds and chocolate bars. *Kiwi fruit* was provided by an importer of fruit, and this by-product is basically non-edible damaged kiwis. *Liquid bakery by-product* was provided by a local bakery company, consisting of the dough of bread, cookies, cakes, etc. *Brewery by-product* came from a local brewery and is a residue after beer-making using mainly barley malt. *Hominy feed* was a by-product from corn dry-processing. *High-moisture corn* is an ensiled whole-grain corn, although it is not a proper by-product, in this work it will be considered as a by-product.

During the digestibility trials, representative samples of each by-product were collected, dried, ground and analyzed for dry matter (DM), gross energy (GE), ether extract (EE), crude protein (CP) and fiber fractions, following the procedures outlined by the Association of Official Analytical Chemists (2007). The DM was determined using an aliquot sample to establish the residual water content after drying for 24h at 103°C, and the ash content was determined after ignition of a weighed sample in a muffle furnace (Carbolite CWF 1100) at 550°C for 6h. All analytical results were expressed on a DM basis. The gross energy content was determined using oxygen bomb calorimeter (IKA – Calorimeter System C 4000 Adiabatic). The ether extract was analyzed by the solvent extraction system (Soxtec™ 2055 FOSS). The crude fiber (CF), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF) and lignin (LIG) were analyzed using the Ankom220 Fiber Analyser Unit (ANKOM Technology Corporation; Macedon, NY, USA) and expressed including residual ash as described by Van Soest et al. (1991). The crude protein was determined by the Kjeldhal system (KJELTEC 8400 Analyzer unit FOSS). Crude protein was determined as total N x 6.25. Finally, the fraction of OM, non-EE, CP and NDF (MNDF) was also calculated.

5.5.2. Experiment 1: *in vivo* digestibility trials of conventional by-products

5.5.2.1. Animals, housing and experimental design

Thirty females (Landrace x Large White) with 86.1 ± 2.55 Kg of body weight (BW) were individually allotted, by body weight, to five dietary treatments (n = 6). Each pen was equipped with a one-sided, stainless steel feeder and a nipple drinker, which allowed free access to water throughout the experimental period. Pigs were housed in an environment-controlled room with an average temperature of 22°C.

The experiment lasted 20 days and the treatments were based on the by-products tested: basal diet (without by-product), liquid bakery by-product, brewery by-product, hominy feed and high-moisture corn.

The initial 15 days were considered for adaptation to the diet. During this time the feed was delivered in a *semi-ad libitum* manner, increasing or decreasing the amount of feed offered daily, by 5%, depending on the previous day's registered refusals. After

this adaptation period, the daily amount of feed on offer per pig was maintained until the end of the experiment.

5.5.2.2. Diets Experiment 1

Diets were offered twice a day (09:00 and 16:00 h) in a liquid form in a 2.7:1 water – to – feed ratio. Two hours after each meal administration, the feeders were cleaned and feed refusals removed to avoid possible fermentations. A sub-sample of leftovers was weighed and dried at 65°C until a constant weight in order to calculate its dry matter. Since the four by-products are extensively used in commercial pig production and no intake or digestive problems were expected, the by-products were included in the final diet by 50% (on a dry matter basis). The basal diet used to mix with the by-products was also evaluated.

Each diet was manually made twice a day by mixing water (~20 °C), basal diet and the corresponding amount of by-product, 10 minutes before feeding, to avoid possible fermentation of the diets. **Table 5.1** summarizes the ingredients and chemical composition of the basal diet. Titanium dioxide (3g/kg) was included as an indigestible marker. The basal diet was formulated to meet or exceed recommendations of FEDNA (2013) after having been mixed with the by-products.

Table 5.1. Diet composition and chemical analysis of basal diets in Experiment 1 and 2 (as fed basis; g/kg unless otherwise stated).

Ingredients	Experiment 1 (%)	Experiment 2 (%)
Barley	47.40	45.00
Soybean 47+2	26.74	10.07
Wheat	20.00	30.00
Maize	-	6.29
Extruded rapeseed meal	-	6.00
Fat +88% triglycerides	3.00	0.50
Calcium carbonate	1.43	0.96
Monocalcium Phosphate	0.54	0.18
Salt	0.42	0.40
Vitamin and mineral premix ^a	0.30	0.30
Natuphos 500 2kg ^b	-	0.20
Lisine-HCl	0.10	0.05
Threonine	-	0.04

DL- Methionine	0.07	-
<i>Analysis (DM basis)</i>		
Dry matter	867.6	891.3
Crude protein (N x 6.25)	187.0	146.7
Gross Energy (Kcal/kg)	4,341	4,413
Ether extract	48.25	22.45
Crude ash	63.85	48.34
Crude fiber	38.53	42.61
NDF	288.1	-
ADF	52.67	-
LIG	7.27	-
*Lysine	12.68	8.41
*Methionine and cysteine	8.25	6.64
*Threonine	8.38	6.90
*Tryptophan	2.89	2.21
*Calcium	9.11	7.97
*Phosphorous	6.04	4.95

*Calculated values

^aThe premix provided vitamins and minerals (per kg) as follows: vitamin A, 3,000,000 IU; vitamin D3, 600,000 IU; vitamin E, 3,644 mg; vitamin K3, 345 mg; vitamin B1, 294 mg; vitamin B2, 1,248; Pantothenic acid, 3,920 mg; Nicotinic acid, 8,036 mg; vitamin B6, 686 mg; vitamin B12, 7 mg; Choline, 25,020 mg; Biotin, 16 mg; Zn, 40,052 mg as ZnO; Fe, 30,000 mg as FeSO₄ · 7H₂O; Mn, 16,554 mg as MnO; Cu, 8,000 mg as CuSO₄ · 5H₂O; I, 300 mg as Ca(IO₃)₂; and Se, 66 mg as Na₂SeO₃.

^b 500 FTU of *Aspergillus niger* (Natuphos[®] BASF)

5.5.3. Experiment 2: *in vivo* digestibility trials of non-conventional by-products

5.5.3.1. Animals, housing and experimental design

Sixteen females (Landrace x Large White) with 40.1 ± 3.03 Kg of BW were individually allotted in the same facilities as in Experiment 1, by body weight, to four dietary treatments (n = 4).

The whole experiment was divided into four trials that lasted 14 days each. In each trial, one of the following by-products was tested: mayonnaise, almond meal, cocoa meal and kiwi. The initial seven days of each trial were considered for adaptation to the level of intake. During this time, the feed was delivered in a *semi-ad libitum* manner, following the same schedule as in Experiment 1.

5.5.3.2. Diets Experiment 2

Feed was offered in a liquid form as mentioned in Experiment 1 (2.7:1 ratio) and with the same management. Since the by-products were non-conventional and may cause intake and/or digestive difficulties, increasing inclusion percentages of by-products were tested (2%, 4%, 7% and 10% measured on a dry matter basis). The kiwi by-product was tested at 4%, 8%, 12% and 16% due to the high water content and the low possibility of digestive problems.

Diets were prepared in the same manner as that in Experiment 1, and each diet was fed to four pigs. **Table 5.1** includes the ingredients and the chemical composition of the basal diet. Titanium dioxide (3g/kg) was included as an indigestible marker.

5.5.4. Sampling, measurements and chemical analysis

In both experiments, individual pig BW was recorded at the beginning and at the end of each trial to determine average daily weight gain (ADG, data not shown).

Fresh fecal samples were collected from all pigs twice a day the last two days of each experiment and trial. Representative samples of basal diets were taken at the beginning of each experiment. However, by-products samples were taken along the experiments, carrying on consecutive analyses of by-products moisture in order to recalculate the exact percentage of inclusion in each treatment. All fecal samples were dried at 65°C for 96h in a forced-air oven, mixed and pooled until analysis. Dry fecal samples were finely ground to a size that could pass through a 1-mm screen before chemical analysis.

All feeds and fecal samples were analyzed for DM, OM, GE, CP, EE, CF, NDF, ADF and LIG following the procedures outlined by the Association of Official Analytical Chemists (2007), as described previously. Titanium dioxide was analyzed via UV absorption spectrophotometry following the method described by Short et al. (1996).

5.5.5. Calculations and statistical analysis

For each pig and diet, the CATTD of dry matter was calculated using the following equation.

Equation 1:

$$CATT D \text{ of } DM = \left[1 - \left(\frac{IM_d}{IM_f} \right) \right],$$

where IM_d = Indigestible marker concentration in diet; and IM_f = Indigestible marker concentration in feces.

In the same way, the CATT D of organic matter, gross energy and nutrients were calculated using Equation 2.

Equation 2:

$$CATT D = \left[1 - \left(\frac{N_f}{N_d} \right) \times \left(\frac{IM_d}{IM_f} \right) \right],$$

where N_f = nutrient concentration in feces (percentage of DM); N_d = Nutrient concentration in diet; IM_f = Indigestible marker concentration in feces, and IM_d = Indigestible marker concentration in diet.

In the first experiment, the digestibility of the DM, OM, GE and nutrients of the by-products were calculated “by difference” using Equation 3.

Equation 3:

$$CATT D \text{ of } by - products = \frac{CATT D_b - (\bar{x} CATT D_{cf} \times PCF)}{PBP},$$

where $CATT D_b$ = CATT D of the mixed diet; $\bar{x} CATT D_{cf}$ = medium value of CATT D of the basal diet; PCF = proportion (%/100) of basal diet in the diet; PBP= proportion (%/100) of by-product in the diet, measured on DM basis.

In the second experiment, the digestibility coefficients of the diets were calculated using Equations 1 and 2 for each level of inclusion, and the digestibility of the by-products was estimated by *regression method*, assuming a theoretical, diet 100% by-product.

The digestible energy (DE) contents of the diets were calculated using Equation 4.

Equation 4:

$$DE \text{ (Kcal/kg)} = [(energy \text{ digestibility, \%}) \times (gross \text{ energy content in diet})]/100$$

The regression analyses were performed using the REG procedure of SAS (SAS Institute INC.; Cary, NC) and are presented as means \pm standard deviation.

5.3. Results

Table 5.2 shows the chemical composition of the eight by-products; it includes the samples of digestibility trials and samples of other batches. Dry matter contents were highly variable, changing from 6.0% for kiwi to 94.5% for almond meal. Consequently, physical appearance was liquid or semi-liquid for mayonnaise, kiwi, liquid bakery by-product and brewery by-product. Almond meal, cocoa meal, hominy feed and high-moisture corn had a solid appearance.

The GE contents of by-products changed from 8.7 Mcal/kg DM for mayonnaise to 4.4 Mcal/kg DM for high-moisture corn, the value increases or decreases depending on the levels of EE and ashes, respectively. Mayonnaise showed the highest value of EE (83.1%) and kiwi the highest value of ashes (10.1%). CP levels ranged from 1.3% to 27%, being extremely low for mayonnaise and quite high for brewery by-product.

Regarding the fiber fraction, mayonnaise has no carbohydrates and other by-products (almond meal, liquid bakery by-product or high-moisture corn) had low levels of CF or NDF (<3% and <8%, respectively) and Lignin (<1%). The other four by-products had higher CF and NDF levels (>5% and \geq 20%, respectively), although brewery by-product and hominy feed were less lignified (lignin <3%) than cocoa meal and kiwi (lignin \geq 6%). The MNDF content, not analyzed but calculated by *difference method* (OM-CP-EE-FND), reached 80% for liquid bakery by-product and high-moisture corn, was about 50% for kiwi, hominy feed and cocoa meal and decreased to 14% or lower for mayonnaise, almond meal and brewery by-product.

Table 5.2. Chemical composition of by-products used in the digestibility trials and samples of other batches (in brackets).

%	Liquid bakery by-product	Brewery by-product	Hominy feed	High-moisture corn	Mayonnaise	Almond meal	Cocoa meal	Kiwi
n	(4)	(3)	(2)	(4)	(4)	(1)	(2)	(4)
DM	33.8 ± 0.02 (43.0 ± 8.03)	22.5 ± 0.01 (23.2 ± 0.14)	84.8 ± 0.04 (80.4 ± 6.19)	68.0 ± 0.00 (64.2 ± 4.32)	53.4 ± 0.06 (48.0 ± 13.20)	94.5 ± 0.06 (94.5 ± 0.0)	82.2 ± 0.04 (83.4 ± 1.67)	6.1 ± 0.01 (7.0 ± 3.67)
OM	98.5 ± 0.01 (98.7 ± 0.36)	95.7 ± 0.02 (95.7 ± 0.12)	97.6 ± 0.00 (97.4 ± 0.21)	97.8 ± 0.00 (98.5 ± 0.64)	97.8 ± 0.02 (96.9 ± 1.95)	98.0 ± 0.04 (98.0 ± 0.0)	95.5 ± 0.01 (95.3 ± 0.18)	89.9 ± 0.19 (90.8 ± 3.99)
GE (Kcal/kg)	4,544 ± 3.7 (4,491 ± 90.2)	5,153 ± 44.1 (4,492 ± 927.5)	4,604 ± 35.0 (4,527 ± 108.1)	4,380 ± 13.4 (4,476 ± 237.7)	8,737 ± 91.7 (8,480 ± 624.8)	7,462 ± 0.75 (7,462 ± 0.0)	4,851 ± 31.4 (4,460 ± 552.9)	4,939 ± 66.8 (4,381 ± 711.8)
CP	8.0 ± 0.00 (7.5 ± 0.55)	27.0 ± 0.03 (28.5 ± 1.67)	9.3 ± 0.02 (9.1 ± 0.17)	8.7 ± 0.05 (8.3 ± 1.03)	1.3 ± 0.89 (1.4 ± 0.38)	16.9 ± 0.30 (16.9 ± 0.0)	8.9 ± 0.00 (9.0 ± 0.19)	13.8 ± 0.00 (11.8 ± 4.47)
EE	6.6 ± 0.05 (6.2 ± 0.55)	8.5 ± 0.04 (7.8 ± 0.70)	3.3 ± 0.09 (5.7 ± 3.40)	4.2 ± 0.02 (3.9 ± 0.26)	83.1 ± 10.99 (75.6 ± 8.04)	57.4 ± 0.61 (57.4 ± 0.0)	13.6 ± 0.13 (14.0 ± 0.56)	4.4 ± 0.21 (4.0 ± 1.44)
CF	0.5 ± 0.02 (0.4 ± 0.09)	14.5 ± 0.26 (14.2 ± 0.60)	7.2 ± 0.10 (6.1 ± 1.54)	2.0 ± 0.06 (1.8 ± 0.36)	0.00	2.9 ± 0.25 (2.9 ± 0.0)	6.9 ± 0.41 (6.9 ± 0.04)	16.0 ± 0.15 (17.4 ± 1.93)
NDF	2.2 ± 1.3 (2.2 ± 3.18)	59.6 ± 5.61 (51.6 ± 6.93)	41.8 ± 0.85 (30.4 ± 16.18)	8.0 ± 0.08 (7.4 ± 0.50)	0.00	3.7 ± 0.13 (3.7 ± 0.0)	19.9 ± 0.25 (22.7 ± 3.69)	24.6 ± 0.89 (22.5 ± 7.34)
ADF	0.4 ± 0.09 (0.2 ± 0.20)	19.5 ± 0.68 (18.2 ± 1.36)	8.6 ± 0.26 (6.9 ± 2.44)	2.3 ± 0.02 (2.3 ± 0.25)	0.00	2.6 ± 0.22 (2.6 ± 0.0)	13.4 ± 0.21 (14.8 ± 1.95)	19.9 ± 0.24 (18.6 ± 5.86)
LIG	0.1 ± 0.04 (0.13 ± 0.08)	3.6 ± 0.83 (2.63 ± 0.80)	0.9 ± 0.07 (0.61 ± 0.36)	0.1 ± 0.04 (0.13 ± 0.01)	0.00	0.7 ± 0.08 (0.7 ± 0.0)	6.0 ± 0.10 (6.5 ± 0.64)	6.5 ± 0.20 (7.0 ± 0.71)
MNNDf	81.7 (82.9 ± 2.8)	0.7 (7.9 ± 6.42)	43.2 (52.3 ± 12.74)	76.7 (77.5 ± 11.8)	13.5 (19.9 ± 7.39)	20.0 (20.0 ± 0.0)	53.2 (49.6 ± 4.62)	49.2 (52.4 ± 17.17)

Mean ± standard error

5.5.6. Experiment 1

Table 5.3 shows the mean values of daily feed intake, DMd, OMd, GEd and nutrients CATTd of the basal diet and the experimental diets, including 50% of liquid bakery, brewery by-product, hominy feed or high-moisture corn, and **Table 5.4** includes the mean digestibility values of the four by-products, obtained by *difference method*.

All of the pigs remained healthy during the experiment and no incidences were reported. Due to the fact that the percentages of inclusion were high, at the start of the experiment, animals of brewery by-product and hominy feed diets had some problems to eat all the meal. This was probably due to the adaptation of bulky rations or to some taste adaptation difficulties. After the initial 4 days, no more problems of intake were recorded. Daily feed intake (g DM/ kg BW^{0.75}) remained constant for all by-products, with the highest numerical intake for the diet with liquid bakery by-product.

Compared to the basal diet (GEd = 83.1%), diets including liquid bakery by-product and high-moisture corn had higher GEd values (an improvement of 6.7% and 3.6%, respectively); meanwhile, brewery by-product and hominy feed had lower values (a decrease of 10.6% and 17.6%, respectively). Most of those differences could be related to the CATTd of the nutrients (EEd, CPd and fiber fractions).

As expected, all standard errors of the by-product digestibility coefficients obtained by *difference method* (**Table 5.4**) were higher than those found with the related diets (**Table 5.3**). The fiber fractions' CATTd of the liquid bakery by-product were not calculated because its low fiber content (<1%). The DMd, OMd and GEd values were around 90% or higher for high-moisture corn and liquid bakery by-product but did not reach 70% or 60% for hominy feed and brewery by-product, respectively. The CATTd of EE, CP and fiber fractions followed a similar tendency among by-products. The highest nutrient CATTd variation was for the CF and EE fractions.

The digestible energy contents (DE; Mcal/kg DM), calculated by multiplying GE content (Mcal/kg DM) and GEd (%/100), were: 4.28, 2.70, 3.01 and 3.90 Mcal/kg DM for liquid bakery and brewery by-products, hominy feed and high-moisture corn, respectively.

Table 5.3. Feed intake (g DM/kg BW^{0.75}), dry matter digestibility (DMd), organic matter digestibility (OMd), gross energy digestibility (GEd) and nutrients digestibility coefficients of the diets in Experiment 1. Diet 1, Basal diet; Diet 2, liquid bakery by-product; Diet 3, brewery by-product; Diet 4, hominy feed; and Diet 5, high-moisture corn.

	Diet 1	Diet 2	Diet 3	Diet 4	Diet 5
Feed intake	68.1 ± 4.82	74.2 ± 1.48	65.5 ± 3.88	66.5 ± 2.54	68.7 ± 3.67
DMd	0.84 ± 0.011	0.89 ± 0.007	0.67 ± 0.035	0.76 ± 0.0277	0.87 ± 0.009
OMd	0.86 ± 0.011	0.91 ± 0.007	0.69 ± 0.034	0.77 ± 0.0270	0.89 ± 0.010
GEd	0.83 ± 0.013	0.89 ± 0.009	0.68 ± 0.036	0.74 ± 0.0300	0.86 ± 0.012
EEd	0.69 ± 0.023	0.80 ± 0.022	0.57 ± 0.054	0.55 ± 0.0364	0.65 ± 0.031
CPd	0.84 ± 0.017	0.85 ± 0.030	0.80 ± 0.018	0.75 ± 0.0290	0.86 ± 0.016
CFd	0.34 ± 0.063	0.34 ± 0.065	0.30 ± 0.092	0.26 ± 0.0977	0.33 ± 0.072
NDFd	0.48 ± 0.064	0.26 ± 0.076	0.48 ± 0.065	0.39 ± 0.0713	0.40 ± 0.064
ADFd	0.26 ± 0.066	0.09 ± 0.078	0.31 ± 0.088	0.27 ± 0.113	0.33 ± 0.166

Mean ± standard deviation

Table 5.4. Coefficients of dry matter digestibility (DMd), organic matter digestibility (OMd), gross energy digestibility (GE_d) and nutrients digestibility of the by-product estimated “by difference”.

	Liquid bakery by-product	Brewery by-product	Hominy feed	High-moisture corn
DMd	0.95 ± 0.014	0.50 ± 0.069	0.69 ± 0.055	0.91 ± 0.018
OMd	0.95 ± 0.014	0.52 ± 0.067	0.69 ± 0.054	0.92 ± 0.019
GE_d	0.94 ± 0.018	0.53 ± 0.072	0.66 ± 0.060	0.89 ± 0.024
EE_d	0.90 ± 0.044	0.45 ± 0.108	0.41 ± 0.073	0.60 ± 0.063
CP_d	0.86 ± 0.060	0.77 ± 0.035	0.66 ± 0.058	0.89 ± 0.031
CF_d	0.34 ± 0.130	0.30 ± 0.157	0.25 ± 0.170	0.37 ± 0.071
NDF_d	0.04 ± 0.011	0.49 ± 0.129	0.31 ± 0.143	0.32 ± 0.127
ADF_d	n.d.	0.36 ± 0.175	0.34 ± 0.151	0.27 ± 0.160

Mean ± standard deviation; n.d., non-determined

5.5.7. Experiment 2

All animals remained healthy along the experiment and no incidences were reported. Due to the percentages of inclusion being low, no problems of intake were observed.

Figure 1 shows the evolution of OMD and GED when increasing the inclusion of by-products (**1a**, mayonnaise; **1b**, almond meal; **1c**, cocoa meal and **1d**, kiwi). Using the same structure, **Figure 2** includes the CATTD of the main nutrients of the diets including increasing proportions of each by-product.

OMD and GED increased with the proportion of mayonnaise in the diet (**Figure 1a**) although, when the diet included 10% of by-product, the standard error suddenly increased and, with the 10% inclusion level, the EEd values were lower than expected (**Figure 2a**). It appears that inclusion levels of mayonnaise higher than 8-9% should be avoided.

The recommended level of inclusion of almond meal would be even lower (**Figure 1b**), since OMD and GED did not increase with the level of by-product in the diet, even though the content of EE of almond meal exceeded 55%. The EEd values were lower than 50% (**Figure 2b**) and followed a quadratic shape upon increasing the proportion of almond meal in the diet.

Increasing the inclusion of cocoa meal, OMD and GED values slightly decreased (**Figure 1c**); especially with the highest level of inclusion (10%). A similar tendency followed the CPd and CFd values when the proportion of by-product in the diet increased (**Figure 2c**). The OMD and GED of diets including kiwi evolved in an erratic way (**Figure 1d**); decreasing up to 12% of inclusion of kiwi in the diet and increasing the standard error when the level of inclusion was 16%; CFd remained almost constant when increasing the kiwi proportion in the diet (**Figure 2d**).

Table 5.5 shows the DMd, OMD, GED and CATTD of some nutrients (EE, CP and CF) of the compound feed and the four by-products calculated using the *regression method*. The digestibility figures of the by-product may be a constant value (when no regression approach was statistically significant; $P > 0.05$), an extrapolation to 100% by-product inclusion in the diet, when a linear tendency was significant ($P < 0.05$) or calculated at

Table 5.5. Dry matter digestibility (DMd), organic matter digestibility (OMd), gross energy digestibility (GEd) and nutrients digestibility coefficients of the by-product evaluated in Experiment 2.

By-product	Constant	Regression	
		Lineal	Quadratic
Basal diet			
DMd	0.85 ± 0.010	-	
OMd	0.86 ± 0.011	-	
GEd	0.83 ± 0.010	-	
EEd	0.33 ± 0.042	-	
CPd	0.78 ± 0.029	-	
CFd	0.39 ± 0.119	-	
Mayonnaise			
DMd	-	0.96 ± 0.166	
OMd	-	0.94 ± 0.163	
GEd	-	0.97 ± 0.164	
EEd	-	-	0.82; Max = 8.51
CPd	NC	-	
CFd	NC	-	
Almond meal			
DMd	0.82 ± 0.172	-	
OMd	0.84 ± 0.160	-	
GEd	0.80 ± 0.191	-	
EEd	-	-	0.455; Max = 6.14
CPd	0.76 ± 0.349	-	
CFd	NC	-	
Cocoa Meal			
DMd	-	0.64 ± 0.415	
OMd	-	0.68 ± 0.387	
GEd	-	0.67 ± 0.426	
EEd	0.46 ± 0.060	-	
CPd	0.80 ± 0.026	-	
CFd	0.40 ± 0.043	-	
kiwi			
DMd	-	0.80 ± 0.168	
OMd	-	0.80 ± 0.157	
GEd	-	0.73 ± 0.185	
CPd	0.80 ± 0.020	-	
CFd	0.44 ± 0.096	-	

Mean ± standard deviation; NC, not calculated.

the maximum when a quadratic equation was fitting ($P < 0.05$). Data from the highest level of almond meal (10%) and kiwi (12%) were not included.

As expected, the standard errors of the mean obtained by linear regression were much higher than those calculated as constant values. Compared to the basal diet (GE_d = 83.3%), mayonnaise had a higher GE_d (increase of 16.6%) while the other three by-products had lower values. The GE_d decreased by 3.4, 12.1 and 19.9% for almond meal, kiwi and cocoa meal, respectively. Calculated CP_ds were similar for basal diet and by-products, while EE_d and CF_d greatly varied according to OMD changes.

The digestible energy contents (DE; Mcal/kg DM), calculated by multiplying the GE content (Mcal/kg DM) and GE_d (%/100) of each by-product, were: 7.28, 7.24, 3.90 and 3.29 Mcal/kg DM for mayonnaise, almond meal, cocoa meal and kiwi, respectively.

Figure 5.1. Evolution of OMd and GEd

Figure 5.1 a. Mayonnaise

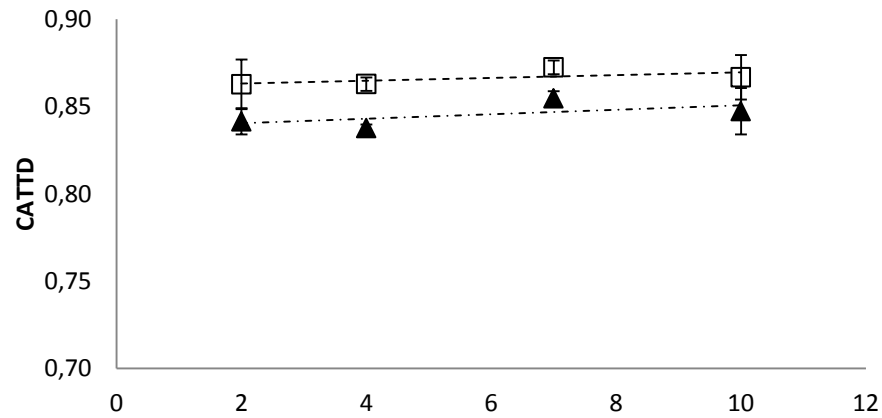


Figure 5.1 b. Almond Meal

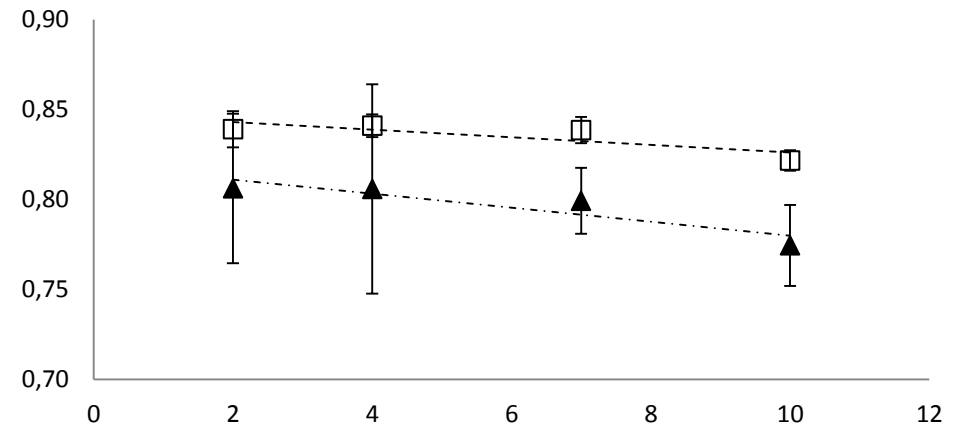


Figure 5.1 c. Cocoa Meal

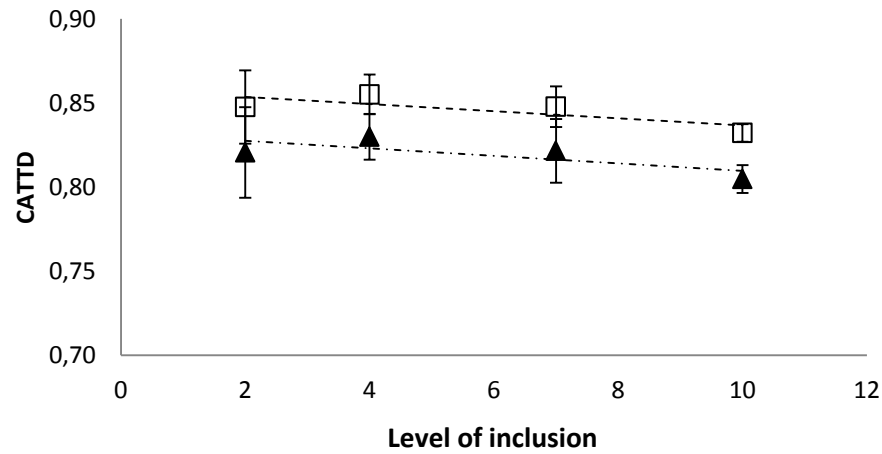
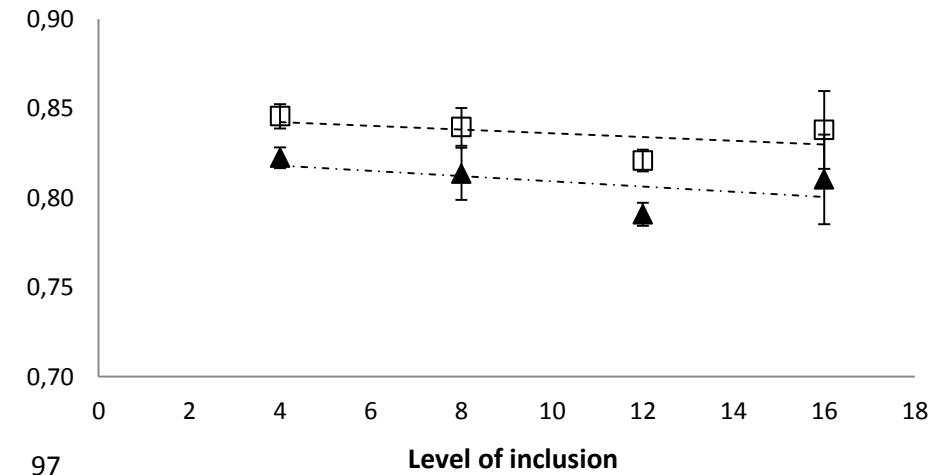


Figure 5.1 d. Kiwi



□ OMd ; ▲ GEd; - - - - Lineal (OMd); - · - · - Lineal (GEd)

Figure 5.2. Evolution of CATTD of the nutrients

Figure 5.2 a. CATTD of EE of Mayonnaise

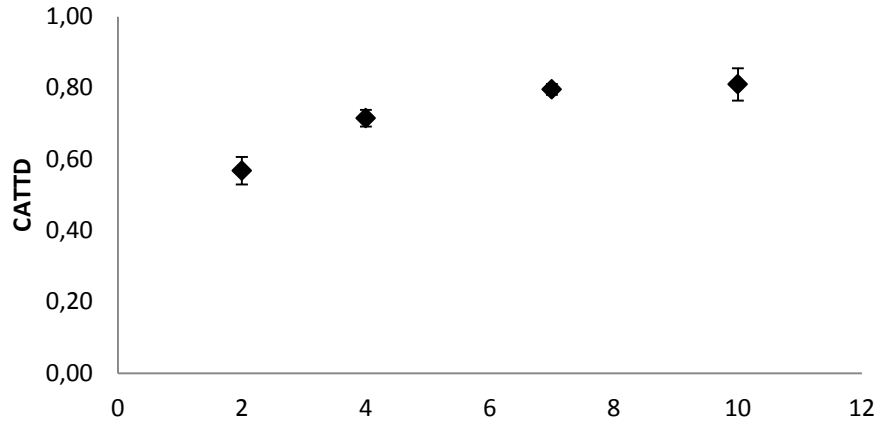


Figure 5.2 b. CATTD of EE and CP of Almond Meal

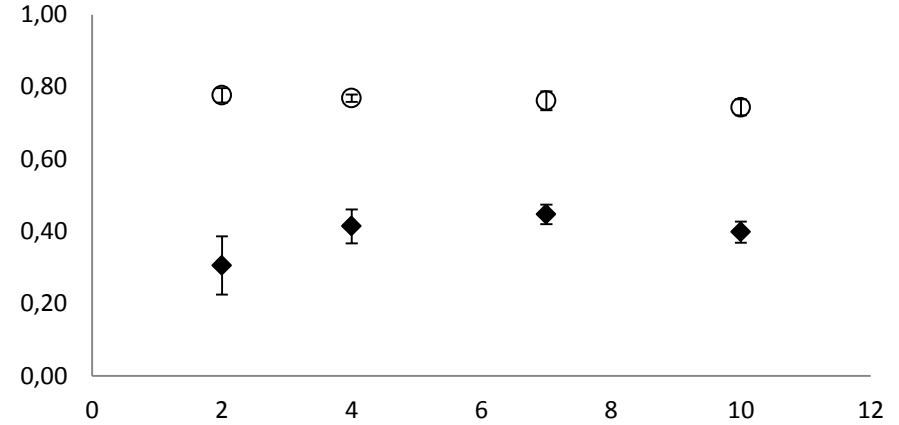


Figure 5.2 c. CATTD of EE, CP and CF of Cocoa Meal

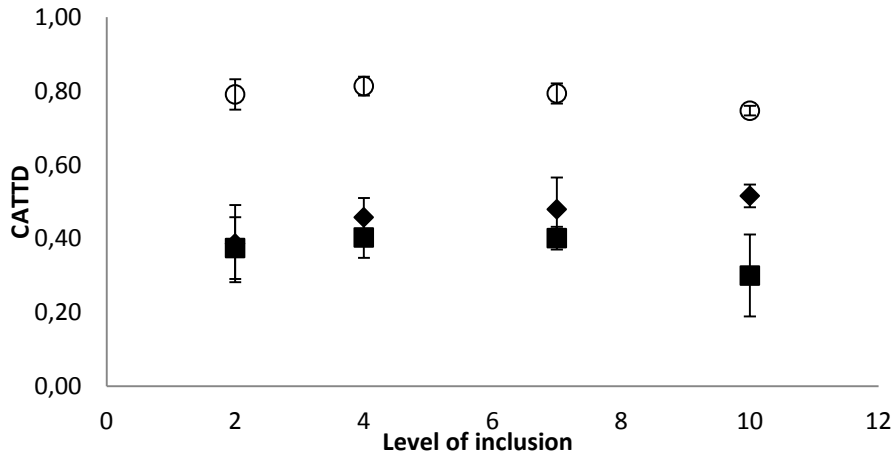
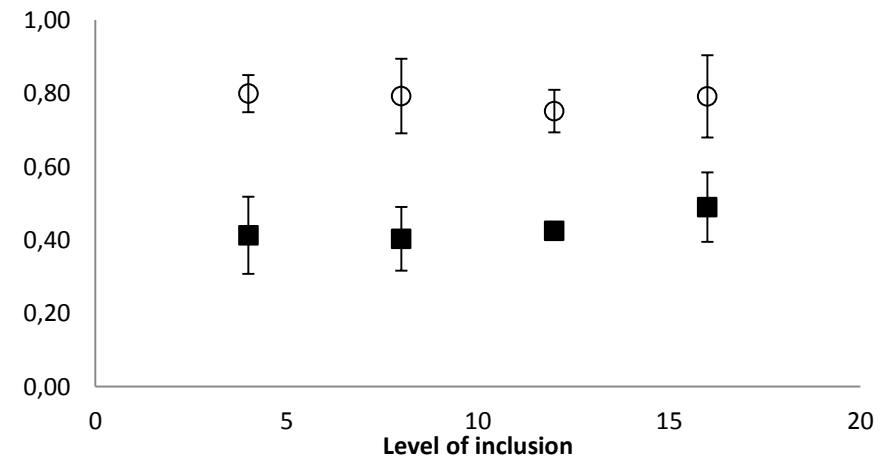


Figure 5.2 d. CATTD of CP and CF of Kiwi



◆EEd;○CPd ; ■CFd

5.4. Discussion

5.4.1. The complexity of including agro-industrial by-products in the diets of pigs.

By definition agro-industrial by-products, also named co-products, are secondary product/s of a particular agro-industrial process. Very often they are produced locally and seasonally, changing in composition; sometimes even contain undesirable contaminants of organic or inorganic origin (Orskov, 1977; Brooks et al., 2001; Braun and Lange, 2004). The quantities produced of some by-products may be small and may fluctuate in composition from one location or industry to another and sometimes even from day to day in the same industry. Since agro-industrial manufacturing technology evolves continuously, many by-products have never been used as feed ingredients for pig feeding; the main reasons are: a) the logistics of supplying is not easy in commercial pig farms because of their variability in composition, specially moisture and fiber, and the difficulties of transportation, storage and utilization *in situ* and b) the information about their nutritive value and farm-use conditions is really scarce and may change considerably, depending on each agro-industrial process. The practice of liquid feeding helps on the logistic side (f. ex., taking advantage of high-moisture by-products) (Scholten et al., 1999; Moon et al., 2004). However, knowing, or reaching an accurate prediction, of the nutritive value of those feed ingredients or by-products still remains a problem.

The first step is to determine the chemical composition; a simple analysis (Ex: Weende and Van Soest) gives an idea of the nature and potential value of each by-product. Crickenberger and Carawan (1996) indicated that, according to their chemical composition and main nutritional properties, the by-products may be classified as: energy sources, protein sources and fiber or roughage by-products. Focusing on chemical composition (**Table 5.2.**), most of the by-products assayed in this work may be potentially considered as energy sources. Only the brewery by-product, a residue after beer-making using mainly barley malt and coming from a local brewery, may have a chance as a protein source (27% CP). In fact, it has been included in diets for a range of animals, including poultry, pigs and fish (See in Mussatto et al., 2006). However, due to the high

fiber content (59.6% NDF), brewery by-product is mainly used in ruminant diets, especially for dairy cattle (Westendorf and Wohlt, 2002; Mussatto et al., 2006).

Mayonnaise and almond meal have a high EE (83.1% and 57.4%, respectively) and GE (8.74 kcal/g and 7.46 kcal/g, respectively) contents, and the latter also has 16.9% of CP; consequently, they may be promising energy sources for pigs. Bakery by-product also has a high potential, since it has a high proportion of non-EE plus CP and plus NDF materials (82.9% of MNDF, **Table 5.2**), probably highly digestible carbohydrates. However, its composition varies because it can contain a large amount of bread, cookies or crackers (Braun and de Lange, 2004; FEDNA, 2010). High-moisture corn is a partially fermented grain commonly used in ruminants (Jones et al., 1970; Hoffman et al., 2011) that has gained interest in liquid feeding systems for pigs (Niven et al., 2007). In fact, high-moisture corn is not a by-product itself since the chemical composition, measured on a DM basis, seems similar to corn grain (FEDNA, 2010).

According to the chemical composition (**Table 5.2**), the use of the three remaining by-products (hominy feed, cocoa meal and kiwi) have a potential as energy sources, even though their high fiber content (NDF higher than 20%, **Table 5.2**) may limit their extensive use in practice, especially for cocoa and kiwi, which also have a high ADF content (See **Table 5.2**).

In any case, knowledge of the chemical composition is not enough to give a proper nutritive value or to know the recommended level of inclusion of a particular by-product in diets, and some *in vivo* studies should be carried out. Since the energy or organic matter digestibility is the main criterion to obtain the digestible energy content of the by-product (Lammers et al., 2008), digestibility trials for the eight by-products were performed.

5.4.2. Methodological difficulties to evaluate the nutritive value of by-products.

The evaluation of the energy value of feeds throughout digestibility trials measures the fecal losses using the *balance method*, which has remained fairly uniform for many years (Schneider and Flatt, 1975). Furthermore, the use of an indigestible marker, such as titanium dioxide, has also been widely accepted to perform pig digestibility trials (Jagger

et al., 1992; Kavanagh et al., 2001; Wilfart et al., 2007) because it does not substantially interfere with the final digestibility results. Nevertheless, since most by-products must not be fed as single feed/diet, because of a lack of nutritional equilibrium or low palatability, they are fed in combination with a well-known feed. Depending on each by-product, the technique of the *balance method* should be performed in a different way. From broad knowledge of the chemical composition and some idea of the appetite acceptance (enough palatability), some by-products may become a substantial part of the daily diet, while others should be restricted in order to be safely eaten and not interfere with digestion or metabolism functions. The conventional and non-conventional by-products used are categorized as the first and second groups, respectively. Consequently, as recommended by several authors (Schneider and Flatt, 1975; Van Es, 1980; Guo et al., 2004; Shurson et al., 2004; Stein and Lange, 2007; Columbus et al., 2010; Landero et al., 2014), to evaluate the conventional by-products they were fed as a substantial fraction (50% of DM in our case) of a liquid mixed diet with compound feed to ensure a nutritional equilibrium. Non-conventional by-products were also mixed in a liquid form with a basal diet, but included in a lower proportions of the mixture (<20% in DM bases). In any case, the first week some diets had problems to reach the expected feed intake (f. ex., brewery by-product and hominy feed diets), probably due to the low palatability of some by-products or to the adaptation to the bulkiness of the diet. Broadly, the digestibility coefficients of the fiber fractions (CF, NDF and ADF) presented more variability than did other nutrients (**Tables 5.4 to 5.6**), probably because they were affected by a too short adaptation period. It appears that adaptation periods of 5-10 days, recommended by most authors, for pigs (Schneider and Flatt, 1975; Guo et al., 2004; Zanfi and Spanghero, 2012; Jakobsen et al., 2015) should be extended, at least with fibrous ingredients (Longland et al., 1993; Dung et al., 2002; Goff et al., 2002).

Although it is known that increasing the level of feed intake may reduce the digestibility coefficients of OM and energy (Garnsworthy and Cole, 1990; Le Goff et al., 2002), we decided to feed the diets close to *ad libitum*. The effect of feed intake upon digestibility is higher for high fiber diets, not very common in pigs, and the level of feeding is not as variable in pigs, as compared to ruminants (Blaxter, 1989). Furthermore, those by-

products will be mostly used for growing and fattening pigs which reach similar levels of intake; values obtained between diets ranged from 77.7 g to 90.4 g of DM/kg of BW^{0.75}.

Finally, the calculated digestibility coefficients of diets and by-products have different standard errors depending on the calculation method. As expected, focusing on any fraction of the diet, standard errors obtained with the whole diets (**Table 5.3** and **Figure 5.1** and **5.2**) were lower (f. ex., for OMD, from 0.71 for liquid bakery diet to 3.45 for brewer by-product) than were those found for the by-products calculated “by difference” (**Table 5.4**; standard errors ranging from 1.42 to 6.90 for the same by-products) or “by regression” (**Table 5.5**; standard errors higher than 15.0). Compared to the variability of the whole diets, the means calculation by *difference method* concentrate all of the variability in 50% of the diet, while the means calculated by *regression method* is the consequence of an extrapolation to 100% by-product inclusion in the diet, from values obtained with increasing levels of by-product inclusion in the diet lower than 20% (Kaps and Lamberson, 2004). Of course, this high standard error does not apply when the inclusion level of the by-product in the diet remains within the range in which it was primarily evaluated (less than 10-15% in our by-products), but the mean estimate of the digestibility values obtained by *regression method* are still useful.

5.4.3. Digestibility and energy contents of the evaluated by-products.

Focusing on OMD, GE_d values (Tables 4 and 6) and digestible energy contents, the evaluated by-products may be classified in three groups: high energetic (>5.5 Mcal DE/kg DM; mayonnaise and almonds meal), energetic (5.5 > x > 3.5 Mcal DE/kg DM; liquid bakery by-product, high-moisture corn and kiwi) and moderate energetic ingredients (<3.5 Mcal DE/Kg DM; cocoa meal, hominy feed and brewery by-product).

The DE level of mayonnaise and almond meal is of 8.5 and 6.0 Mcal/Kg of DM and mainly reflect a high EE content (**Table 5.2**). The EE of the mayonnaise is probably even higher than 75.6%; the MNNFD (**Table 5.2**) accounts for about 19.9%, which may include a high proportion of lipid substances which underestimate the EE content. When the level of inclusion of both by-products in the diet increases, the EE_d follows a quadratic function (**Figure 5.2a** and **5.2b**), showing that the maximum level of inclusion in the diet to

guarantee EEd (**Table 5.5**) should not surpass 8.5% for mayonnaise and 6.1% for almond meal.

As expected, the liquid bakery by-product has a high DE content because of the high OMD (**Table 5.4**) and the high proportion of MNDF (**Table 5.2**), mainly represented by starch or digestible carbohydrates. Braun and de Lange (2004), using dried bakery by-products, found lower CPd (85.5 vs 78.5) and EEd (90.2 vs 81.5) values. Those authors pointed out that this by-product is highly variable due to the fact that it consists of different kinds and percentages of bread, cookies, crackers and other confectionaries, leading to a great variability in both chemical composition and digestibility (Braun and de Lange, 2004). As may happen with other by-products, the process of drying could affect the digestibility coefficients.

The high-moisture corn digestibility results are in agreement with those found by Zanfi and Spanghero (2012) for ear-corn silage, with pigs in the same range of age. Again, based on the chemical composition (**Table 5.2**), it appears that, although the high-moisture corn has been stored as silage, a high proportion of starch has not been fermented. Kiwi is a particular by-product which may include the wastage commercialization fractions from several fruits for humans. Although the NDF content exceeds 20%, most of it ADF (**Table 5.2**), it appears that this fraction is highly digestible (CFd of 43.5% as opposed to 25.0% and 29.7% for hominy feed and brewery by-product, respectively). However, being a vegetal-origin by-product, the level and digestibility of the fiber fraction may change considerably from batch to batch and still should be introduced in a commercial diet with caution.

Finally, due to their DE content, it is advisable that the three remaining by-products be included in a low proportion in European commercial pig diets. Hominy feed and brewery by-products have a high NDF proportion (>40%, **Table 5.2**) which is moderately digestible (maximum 30%, **Table 5.4**). Compared to liquid bakery and high-moisture corn, both by-products have lower CPd (**Table 5.4**), which partially indicates higher carbohydrate fermentation in the hindgut (Bach Knudsen et al., 1993). Cocoa meal, had a lower NDF content (**Table 5.2**), and OMD and GEd did not reach 70% (**Table 5.5**), even though the DE content was slightly higher than 3.0 Mcal/kg DM.

5.5. Conclusions

This work supports the idea concerning the complexity of the by-products inclusion in commercial diets for pigs. The lack of knowledge about non-conventional and some conventional by-products is a concern for the nutritionist. The chemical composition provides an approximation of the potential nutritive value but it is not enough, and *in vivo* digestibility trials should be performed in order to obtain a proper idea of the nutritive values and to know the recommended levels of inclusion, especially for non-conventional by-products. A safe way to evaluate those non-conventional by-products is by using a *regression method*; in contrast, conventional by-products may be studied by *difference method* without technical problems. The conclusions that we can draw for the by-products studied are that mayonnaise, almond meal, liquid bakery by-product and high-moisture corn have a high potential for being incorporated into liquid diets for pigs, although the levels of inclusion should not surpass 8.5% and 6.1% for mayonnaise and almond meal, respectively. On the other hand, the high fiber content of brewery by-product, hominy feed, cocoa meal and kiwi would limit their use in fattening pig diets.

CAPÍTULO 6:
***By-products used in pig's liquid feed: prediction of
the digestibility coefficients and the energy
contents from chemical composition and in vitro
digestibility***

6.1. Objective

The objective of the present study was to find accurate and useful equations to predict the digestibility (organic matter, OMD, or energy, GE_d) and the energy content (digestible, DE, or metabolizable, EM) of agro-industrial by-products for pigs, using the chemical composition and an *in vitro* digestibility method.

6.2. Material and methods

6.2.1. Chemical composition of the by-products

Eight by-products from the food industry were analyzed. Mayonnaise, almond meal, cocoa meal, kiwi fruit, liquid bakery by-product, brewery by-product, hominy feed and high-moisture corn (See **Chapter 5**, to define and describe the by-products).

Representative fresh samples of each by-product were collected during the balance digestibility trials (**Chapter 5**) and were dried at 65°C in a forced-air oven until constant weight and then milled in order to pass through a sieve of 1mm in diameter. The corresponding samples were analyzed following the procedures established by the Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2007) for dry matter (DM), organic matter (OM), gross energy (GE), crude protein (CP), ether extract (EE), crude fiber (CF) and ash, and by Van Soest et al. (1991) for neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), and acid detergent lignin (LIG) determinations. Samples of some other batches of the same by-products were collected from September 2011 to May 2015 and also chemically analyzed.

6.2.2. *In vivo* digestibility trials

Two general approaches were used to determine the digestibility of organic matter (OMD), gross energy (GE_d) and nutrients (EE, CP and CF). In a first experiment, four conventional by-products (liquid bakery by-product, brewery by-product, hominy feed and high-moisture corn) were evaluated using 32 growing-finishing pigs (86.1 kg of body weight, BW). The digestibility calculations were made by difference, including 50% of each by-product per treatment, and one treatment without by-product. In a second experiment, four non-conventional by-products were tested (mayonnaise,

almond meal, cocoa meal and kiwi fruit). There were 16 growing-finishing pigs (40.1 kg and 81.6 kg of initial and final BW, respectively), and the experiment was divided into four trials, one for each by-product. The by-products were tested by levels of inclusion: 2%, 4%, 7% and 10% for mayonnaise, almond meal and cocoa meal, and 4%, 8%, 12% and 16% for kiwi fruit. The digestibility values were obtained by regression. In both experiments, diets were manually mixed and offered twice a day in liquid form (2.7:1 water-to-feed ratio). Titanium dioxide (0.3%) was added to the basal feed as an indigestible marker. After an adaptation period, the daily amount of feed per pig was maintained until the end of the experiment. On the last two days of each trial, two fresh fecal samples were collected via rectal stimulation.

Fecal samples were dried and milled and were analyzed for DM, OM, GE, CP, EE, CF and ash, NDF, ADF, and LIG. Titanium dioxide was analyzed following the method of Short et al. (1996).

For each by-product, the DE (Kcal/Kg DM) and ME (Kcal/Kg DM) were calculated using the following equations: $DE \text{ (Kcal/Kg DM)} = GE \times (ED/100)$ and $ME \text{ (Kcal/Kg DM)} = 100.3 - 0.021 \text{ CP (g/Kg DM)}$ (NRC, 2012), where GE and CP were gross energy and crude protein of the by-product.

6.2.3. *In vitro* digestibility

The three-step enzymatic incubation *in vitro* solubility method described by Boisen and Fernández (1997) was used to determine the *in vitro* digestibility of OM. For all by-products, the original method was slightly modified by Noblet and Jaguelin-Peyraud (2007) and Regmi et al. (2009).

Step 1: A series of 22 samples of finely ground and dried by-products (<1mm), were weighed ($0.5 \text{ g} \pm 0.1 \text{ g}$) in 100 ml plastic flasks. In each series, three samples of each by-product, two blanks and two positive controls (maize) were included. One magnetic rod and 25 ml of phosphate buffer (0.1 M, pH 6.0) were added to each flask and the mixture was mixed. To the mixture was added 10 ml 0.2 M HCl, and pH was adjusted to pH 2.0 with 1 M HCl or 1 M NaOH solution. Then, 1 ml of a freshly prepared pepsin solution containing 25 mg pepsin (pepsin from porcine gastric mucosa, $\geq 2,500$ units/mg protein, SIGMA No. P7012) was added to the mixture. In order to prevent

bacterial growth, 0.5 ml of a chloramphenicol solution was added (0.5 g chloramphenicol, SIGMA No. C-0378 per 100 ml ethanol). The flasks were then closed with a rubber stopper and incubated in a water bath at 39°C for 2h (modified by Noblet and Jaguelin-Peyraud (2007) and Regmi et al. (2009)).

Step 2: After the incubation, 10 ml of a phosphate buffer (0.2 M, pH 6.8) and 5 ml of a 0.6 M NaOH solution were added to the mixture. The pH was then adjusted to a pH of 6.8 with a 1 M HCl or a 1 M NaOH solution. Then the slurry was carefully mixed with 1 ml of a freshly prepared pancreatic solution containing 100 mg of pancreatin (porcine, grade IV, SIGMA No. P-1750; undissolved tissue material was removed after centrifugation). After closing with the rubber stop, the flasks were incubated in a water bath at 39°C for 4h (modified by Noblet and Jaguelin-Peyraud (2007) and Regmi et al. (2009)).

Step 3: After the incubation, 10 ml of 0.2 M EDTA solution were added to the mixture. The pH was then adjusted to pH 4.8 with 30% acetic acid. Then the slurry was mixed with 0.5 ml of a mixed, multi-enzymatic complex containing arabinase, cellulase, β -glucanase, hemicellulase, xylanase and pectinase (Viscozyme L, SIGMA No. V-2010). The flasks were closed and incubated at 39°C for 18h in a water bath (modified by Noblet and Jaguelin-Peyraud, 2007, and Regmi et al., 2009). After that, the enzymatic reaction was blocked with 1 ml solution of phenyl-methyl-sulphonyl-fluoride (SIGMA No. P-7626) containing 10 mg/ml of methanol, and it was shaken for 2 min at ambient temperature (modified by Noblet and Jaguelin-Peyraud, 2007).

Filtration: Before filtration, 0.4 ± 0.05 g of Celite was added in the Gooch Crucible (porosity 2) as a filter aid, which was placed in the furnace at 550°C for 4h and weighed after cooling in a desiccator. The residue of the flasks was then transferred to the crucibles by filtration after several rinses with ultra-pure water. The residue was further rinsed twice with about 10 ml of ethanol (96%) and once with 10 ml acetone (99.5%), and one more time with ultra-pure water. The crucibles were placed into the oven at 103°C overnight, cooled in the desiccator and weighed, and then ashed in a furnace at 550°C for 4h, cooled in the desiccator and weighed (modified by Noblet and Jaguelin-Peyraud, 2007).

Calculation: The *in vitro* digestibility of organic matter was obtained from the difference between organic matter in the sample and the undigested residue after correction for organic matter in the blank (Boisen and Fernández, 1997).

6.2.4. Statistical analyses

Correlations among chemical components and *in vitro* digestibility of by-products were tested using the PROC CORR procedure of SAS[®] (SAS Institute Inc.; Cary, NC) that included the effect of series (n = 8) and of chemical characteristics considered as covariates.

Linear regression equations to predict the digestibility of OM (OMd, %) and of gross energy (GE_d, %) and DE and ME content (kcal/kg) of the by-products were established using the PROC REG procedure of SAS[®] (SAS Institute Inc.; Cary, NC). The accuracy and prediction capacity of the equations were assessed using the determination coefficient (R^2) and the coefficient of variation (CV, %). R^2 is interpreted as the proportion of the variation of the independent variable (Y) explained by the variability of the dependent/s variable/s (X), and CV is the percentage of times that the prediction obtained will be wrong, when using the equation in a proper way. Finally, an adjusted R^2 was calculated using the NOINT option of SAS (SAS Inst. Inc.; Cary, NC) in the equation for GE.

6.3. Results

6.3.1. Chemical composition and digestibility coefficients

The chemical composition of by-products used for the *in vivo* digestibility trials is presented in **Table 6.1**. Dry-matter contents were highly variable, changing from a totally liquid appearance of kiwi fruit, with 6% of DM, semi-liquid by-products such as brewery by-product, liquid bakery by-product and mayonnaise, with 23, 34 and 53% of DM, respectively, and, finally, solid by-products between 68% of DM (high-moisture corn) and 95% of DM (almond meal). The GE contents of by-products changed from the higher values for mayonnaise and almond meal, 8.7 and 7.5 Mcal/kg DM, respectively, and the lower ones for liquid bakery by-product and high-moisture corn, 4.5 and 4.4 Mcal/kg DM, respectively. In fact, mayonnaise and almond meal showed the maximum levels of EE (83 and 57%); kiwi, high-moisture corn and hominy feed the minimums (4.4, 4.2 and 3.3%, respectively); the level of the rest of by-products ranged between 6 and 14% of EE. CP levels fluctuated from 1.3 to 27%, being extremely low for mayonnaise and quite high for brewery by-product. Regarding the fiber fraction, mayonnaise has no carbohydrates, and some by-products (almond meal, liquid bakery or high-moisture corn) have low levels of CF or NDF (<3 and <8%, respectively) and LIG (<1%). The other four by-products had higher CF and NDF levels (>7 and >20%, respectively), the level of LIG was lower in brewery by-product and hominy feed (LIG <4%) than it was in cocoa meal and, finally, kiwi was the most lignified (lignin >6%).

As expected, the results of *in vitro* digestibility of OM (**Table 6.1**) showed the same tendency as *in vivo* digestibility (**Table 6.2**), ranging from almost 100 to 40%, the highest values (> 90%) being for mayonnaise, almond meal, liquid bakery by-product and high-moisture corn; intermediate (80 - 70%) for kiwi and cocoa meal, and lower (< 60%) for brewery by-product and hominy feed. *In vitro* OM digestibility figures followed the same tendency as *in vivo* values, ranging from underestimates of 16.6 and 15.6% for brewery by-product and hominy feed, respectively, up to overestimates of 7.4% for almond meal.

Table 6.1. Chemical composition of by-products used for *in vivo* assays and *in vitro* digestibility of OM (IN VITRO).

%	Mayonnaise	Almond meal	Cocoa meal	Kiwi	Liquid bakery by-product	Brewery by-product	Hominy feed	High-moisture corn
DM	53.4 ± 0.06	94.5 ± 0.06	82.2 ± 0.04	6.1 ± 0.01	33.8 ± 0.02	23.1 ± 0.01	84.8 ± 0.04	68.0 ± 0.00
OM	97.8 ± 0.02	98.0 ± 0.04	95.5 ± 0.01	89.9 ± 0.19	98.5 ± 0.01	95.7 ± 0.02	97.6 ± 0.00	97.8 ± 0.00
GE (Kcal/kg)	8737 ± 91.7	7462 ± 0.8	4851 ± 31.4	4939 ± 66.8	4544 ± 3.7	5153 ± 44.1	4604 ± 35.0	4380 ± 13.4
CP	1.3 ± 0.89	16.9 ± 0.30	8.9 ± 0.00	13.8 ± 0.00	8.0 ± 0.00	27.0 ± 0.03	9.3 ± 0.02	8.7 ± 0.05
EE	83.1 ± 10.99	57.4 ± 0.61	13.6 ± 0.13	4.4 ± 0.21	6.6 ± 0.05	8.5 ± 0.04	3.3 ± 0.09	4.2 ± 0.02
CF	n.d.	2.9 ± 0.25	6.9 ± 0.41	16.0 ± 0.15	0.5 ± 0.02	14.5 ± 0.26	7.2 ± 0.10	2.0 ± 0.06
NDF	n.d.	3.7 ± 0.13	19.9 ± 0.25	24.6 ± 0.89	2.2 ± 1.30	59.6 ± 5.61	41.8 ± 0.85	8.0 ± 0.08
ADF	n.d.	2.6 ± 0.22	13.4 ± 0.21	19.9 ± 0.24	0.4 ± 0.09	19.5 ± 0.68	8.6 ± 0.26	2.3 ± 0.02
LIG	n.d.	0.7 ± 0.08	6.0 ± 0.10	6.5 ± 0.20	0.1 ± 0.04	3.6 ± 0.83	0.9 ± 0.07	0.1 ± 0.04
IN VITRO	99.3 ± 1.02	90.2 ± 2.62	70.9 ± 1.92	80.3 ± 2.06	99.3 ± 0.01	43.3 ± 0.20	58.5 ± 0.83	91.2 ± 0.07

Means ± Standard deviation

Table 6.2 includes the *in vivo* digestibility mean values of OM and GE, and the mean DE and ME contents of the eight feedstuffs. The standard errors of OM and GE digestibility mean values reflect the way in which the calculation was performed; “by regression” for mayonnaise, almond and cacao meals and kiwi, and “by difference” for bakery and brewery by-products, hominy feed and high-moisture corn (**Chapter 5**).

Table 6.3 shows the correlations among chemical variables studied and *in vitro* OM digestibility values (IN VITRO). As expected, the highest correlations were found between EE and GE when all by-products were analyzed ($r = 0.99$; $P < 0.0001$), however, when the fattiest by-products (mayonnaise and almond meal) were removed from the analyses, that correlation disappeared ($r = 0.44$; $P > 0.05$). Some correlations between fiber fractions (CF, NDF, NDF-ADF, ADF) were also significant ($r > 0.90$), as well as the correlations between CF and ADF with OM ($r > 0.80$). Finally, the chemical property best correlated with IN VITRO was the NDF fraction ($r = - 0.86$).

Table 6.2. Coefficients of *in vivo* digestibility of OM (OMd) and GE (GE_d) and calculated DE and ME contents.

	Mayonnaise	Almond meal	Cocoa meal	Kiwi	Liquid bakery by-product	Brewery by-product	Hominy feed	High-moisture corn
OMd (%)*	94.1 ± 16.32	84.0 ± 16.02	67.5 ± 38.68	78.9 ± 15.65	95.4 ± 1.40	51.9 ± 6.69	69.3 ± 5.41	91.7 ± 1.91
GE _d (%)*	97.1 ± 16.38	80.4 ± 19.06	66.7 ± 42.60	73.2 ± 18.49	94.2 ± 1.76	52.6 ± 7.15	65.5 ± 5.99	89.0 ± 2.38
DE (Mcal/ Kg DM)	8.49	6.00	3.24	3.62	4.28	2.71	3.02	3.90
ME (Mcal/ Kg DM)	8.49	5.81	3.19	3.52	4.22	2.67	2.85	3.84

Means ± Standard deviation

*Values from **Chapter 5**

Table 6.3. Correlation coefficients between chemical characteristics and other characteristics of the by-products.

	DM	OM	CP	EE	CF	NDF	ADF	NDF – ADF	GE	IN VITRO
DM	1									
OM	0.61 (0.59)	1								
CP	-0.28 (-0.56)	-0.28 (-0.29)	1							
EE	0.28 (0.18)	0.33 (-0.01)	-0.32 (0.14)	1						
CF	-0.61 (-0.55)	-0.83* (-0.82*)	0.59 (0.72)	-0.29 (0.04)	1					
NDF	-0.44 (-0.26)	-0.16 (-0.02)	0.55 (0.79)	-0.49 (0.04)	0.62 (0.57)	1				
ADF	-0.54 (-0.44)	-0.81* (-0.79)	0.54 (0.70)	-0.32 (0.27)	0.97* (0.97*)	0.62 (0.54)	1			
NDF-ADF	-0.26 (-0.07)	0.22 (0.40)	0.39 (0.56)	-0.44 (-0.10)	0.26 (0.14)	0.91* (0.89*)	0.24 (0.09)	1		
GE	0.20 (-0.52)	0.24 (-0.61)	-0.22 (0.81*)	0.99* (0.44)	-0.09 (0.87*)	-0.35 (0.67)	-0.15 (0.93*)	-0.35 (0.30)	1	
IN VITRO	0.09 (-0.05)	0.26 (0.13)	-0.68 (-0.73)	0.47 (-0.21)	-0.68 (-0.64)	-0.86* (-0.86*)	-0.72 (-0.68)	-0.69 (-0.65)	0.40 (-0.70)	1

(*) Correlation between variables differ significantly (P<0.05).

Values between brackets correspond to correlation between variable without mayonnaise and almond meal (high EE by-products).

6.3.2. Prediction equations

The GE content of the by-products is predicted from their chemical composition ($GE = 9.58 \text{ EE} + 6.50 \text{ CP} + 4.28 \text{ Carbohydrates}$; $R^2 = 1.00$; $CV = 5.52$; $P < 0.0001$). The carbohydrates fraction was obtained by subtracting the contents of EE and CP from the OM content. X_i were measured in g/kg of DM and GE was expressed in kcal/kg of DM.

Tables 6.4 and **6.5** show the 22 best lineal equations worked out to predict OMD and GEd (**Table 6.4**), DE and ME (kcal/kg, **Table 6.5**) (“Y”) from the chemical composition and *in vitro* digestibility (IN VITRO) of the by-products (“X”). **Figure 6.1** illustrates some of those equations.

The most useful chemical characteristics to predict OMD (Eqs. 1 and 2, or **Figures 6.1a** and **6.1b**) and GEd (Eqs. 6 and 7) were NDF and ADF. However, better OMD predictions were obtained with the combination of both NDF and ADF in Equations 3 and 8. The NDF and ADF contents used in the same equation explain 78% and 81% of the variability of OMD and GEd, which may be predicted with a CV of 10.9% (Eq. 3) and 10.3% (Eq. 8), respectively. Moreover, when predictions were performed using *in vitro* OM digestibility (IN VITRO), the equations explained up to 94% and 93% of the variability of OMD and GEd, with a CV between 5 – 6%, respectively (Eqs. 4 and 9 and **Figures 6.1c** and **6.1d**). In Eqs. 5 and 10, when ADF was included in the prediction together with IN VITRO, both parameters explained 95 – 96% of the variability of OMD and GEd, respectively, with a CV lower than 5%. The inclusion of a second variable (ADF) in these last equations slightly improved the results of the prediction Equations 4 and 9.

As expected, the EE content was the best chemical component of the by-products to predict their DE and ME contents (Eqs. 11 and 17). IN VITRO by itself produced a poor prediction of DE and ME, with R^2 lower than 0.5 and CV higher than 30% (Eqs. 13 and 19, and **Figure 6.1e** for DE). Nevertheless, in association with EE, the variation of IN VITRO explained a 97% of the variation of DE and ME content (Eqs. 14 and 20). When the two by-products with high EE were discarded (mayonnaise and almond meal), the variation of IN VITRO explained up to 97% and 98% of the variation of the DE and ME

content of the remaining by-products (Eqs. 16 and 22), and DE and EM content may be predicted with a CV of 3.1% and 2.7%, respectively (See **Figure 6.1f** for DE).

Table 6.4. Prediction equations of OMd (%) and GEd (%) of by-products from the chemical composition and *in vitro* OM digestibility (IN VITRO; %).

Nº	Equation	P- value	R ²	CV	RMSE
1	OMd = 92.91 - 0.615x NDF	0.0150	0.65	12.29	9.70
2	OMd = 91.38 - 1.488 x ADF	0.0151	0.65	12.30	9.71
3	OMd = 94.59 - 0.365x NDF - 0.881x ADF	0.0239	0.78	10.85	8.57
4	OMd = 20.88 + 0.734 x IN VITRO	<0.0001	0.94	5.07	4.00
5	OMd = 30.90 - 0.302 x ADF + 0.639 x IN VITRO	0.0005	0.95	4.99	3.94
6	GEd = 91.59 - 0.629 x NDF	0.0147	0.66	12.77	9.87
7	GEd = 90.57 - 1.587x ADF	0.0083	0.71	11.66	9.02
8	GEd = 93.54 - 0.338 x NDF - 1.024 x ADF	0.0150	0.81	10.30	7.97
9	GEd = 18.47 + 0.744x IN VITRO	0.0001	0.93	5.83	4.51
10	GEd = 34.81 - 0.493 x ADF + 0.589 x IN VITRO	0.0004	0.96	4.93	3.82

CV, coefficient of variation; RMSE, root means standard error.

Table 6.5. Prediction equations of DE and ME (kcal/kg of DM) of by-products from chemical composition and *in vitro* OM digestibility (IN VITRO; %)

Nº	Equation	P- value	R ²	CV	RMSE
11	DE = 3040.60 + 6.031 x EE	0.0004	0.89	15.45	680.469
12	DE = 3675.88 + 5.270 x EE -5.553 x ADF	0.0010	0.94	13.10	576.83
13	DE = -837.95 + 6.626 x IN VITRO	0.0576	0.48	34.31	1511.51
14	DE = 846.34+ 5.081 x EE + 3.045 x IN VITRO	0.0001	0.97	8.57	377.68
15	*DE = 4184.64 - 2.451 x NDF	0.0752	0.59	12.09	418.32
16	*DE = 1415.96 + 2.764 x IN VITRO	0.0003	0.97	3.10	107.19
17	ME = 2957.45 + 6.040 x EE	0.0005	0.88	16.64	719.27
18	ME = 3623.17+ 5.243 x EE - 5.819 x ADF	0.0013	0.93	14.18	613.21
19	ME = -988.94+ 6.714 x IN VITRO	0.0556	0.48	35.03	1514.77
20	ME = 687.45 + 5.057 x EE + 3.150 x IN VITRO	0.0002	0.97	9.78	422.85
21	*ME = 4150.67 - 2.593 x NDF	0.0640	0.62	12.31	416.51
22	*ME = 1262.92 + 2.868 x IN VITRO	0.0001	0.98	2.68	90.64

CV, coefficient of variation; RMSE, root means standard error.

(*) Prediction equations without mayonnaise and almond meal (high EE by-products).

6.4. Discussion

The use of by-products in liquid feed for growing-finishing pigs, and pig operations in general, require having low risk (no poisoning, not contaminated, no bad taste...) when included in the pig's diets (Chiou, 1999; Smits and Sijtsma, 2007; Zijlstra and Beltranena, 2013). To properly formulate and re-formulate the diets, a precise estimation of the nutritional value, from batch to batch, is needed. Accurate information of the homogeneity, mainly the dry-matter content, and prediction of the DE or ME content, is essential (Braun and de Lange, 2004; Serena and Knudsen, 2007; Smits and Sijtsma, 2007).

Equations to predict DE and ME in feed ingredients based on chemical composition can be a useful tool in feed ingredient and by-products evaluation, but such equations are normally available only for complete diets (Just et al., 1984; Noblet and Perez, 1993), barley (Fairbairn et al., 1999) and some by-products such as corn DDGS (Anderson et al., 2012; Kerr and Shurson, 2013; Smith et al., 2015) or wheat DDGS (Cozannet et al., 2010). To have accurate prediction equations for unconventional feedstuff and by-products, which usually are not included in tables of ingredients composition, may be an important tool to increase the precision of feed formulations.

Focusing on non-conventional feedstuffs, Park et al. (2015) developed prediction equations to estimate GE and DE in copra meal, palm kernel meal and cassava root. When Park et al. (2015) estimated GE_d from *in vitro* DM digestibility found similar R² (R² = 0.91) to ours from *in vitro* OM digestibility (R² = 0.93). Anderson et al. (2012) also published prediction equations to predict the DE and ME of corn co-products. As in the present study, the best predictor was the *in vitro* OM digestibility, which produced a coefficient of determination slightly lower (R² = 0.90) than ours (R² = 0.97 and 0.98, for DE and ME) when the fattiest by-products were removed from the equations. In contrast, Cozannet et al. (2010) also developed equations to predict the GE, DE and ME of wheat DDGS (n = 10) for growing pigs and sows using their nutrient content and physical properties. The best single predictor was the ADF content (R² = 0.80 and 0.68 for GE digestibility and DE content, respectively); meanwhile, *in vitro* OM digestibility produced a poorer prediction (R² = 0.66 and 0.60, for GE_d and DE content,

respectively). In the study of Kerr and Shurson (2013), again dietary fiber, namely ADF or TDF (total dietary fiber), was the most accurate predictor of DE or ME contents of corn DDGS with a variable EE content for growing pigs ($n = 15$). Our results seem to disagree, since it appears that *in vitro* OM digestibility improves the accuracy of any equation obtained from a chemical characteristic (**Tables 6.4** and **6.5**). *In vitro* OM digestibility appears as the best predictor of both *in vivo* digestibility and also of DE or ME content, when the two fatty by-products were discarded (**Table 6.5**, **Figure 6.1e** and **6.1f**). The disagreement may be due to the fact that the physical, chemical and nutritional composition of our by-products are far more variable than the batches of DDGS used by Cozannet et al. (2010) or Kerr and Shurson (2013).

Table 6.6 shows the means and standard deviations of the predicted values for OMD, GEd, DE and ME obtained from several batches of by-products using the best prediction equations of **Tables 6.4** and **6.5**. Almond meal was not included because no further batches were available. The equations used to determine OMD were Eq. 4 and Eq. 5, and Eq. 9 and Eq. 10 for GEd. In the predictions of the DE, Equation 14 was used for all by-products and Eq. 16 only for those with low levels of EE, as well as the ME being predicted with Eq. 20, while Eq. 22 was not used for mayonnaise.

For most by-products, the predicted values for OMD (g/kg DM) and GEd (kcal/kg DM) showed some underestimation (close to 10% for high-moisture corn) as compared to the values obtained by *in vivo* studies (**Table 6.2**). The highest values of predicted OMD and GEd were for mayonnaise (93 and 92%, for OMD and GEd, respectively), and for liquid bakery by-product (93 and 91%, for OMD and GEd, respectively). In contrast, the lowest values were found for brewery by-product (51 and 49%, for OMD and GEd, respectively), as observed in *in vivo* digestibilities due to the high content in fiber fractions. The standard deviation (SD) was moderate, around 5.0 or lower, excluding kiwi (> 8.0). By-products of mainly vegetal origin showed the highest values of SD, probably because the effect of the fiber fractions on digestibility.

As far as the prediction of DE and ME, the less variable predictions were obtained for liquid bakery by-product and cocoa meal (SD represents less than 3% of the mean value predicted), followed by mayonnaise, brewery by-product and high-moisture corn

(around 6%). The SD of kiwi and hominy feed exceeded 8.0 and 12.0% of the mean predicted value, respectively.

6.5. Conclusion

To properly evaluate the nutritive content of new ingredients for swine diets requires conducting animal experiments with the objective of predicting energy (DE, ME, or various relationships) from the composition of an ingredient. Given the time and expense of animal experimentation, the development and use of prediction equations to estimate energy content of feed ingredients based on nutrient composition is an alternative way for accurate, inexpensive, and rapid determination of highly variable feed ingredients in the feed industry.

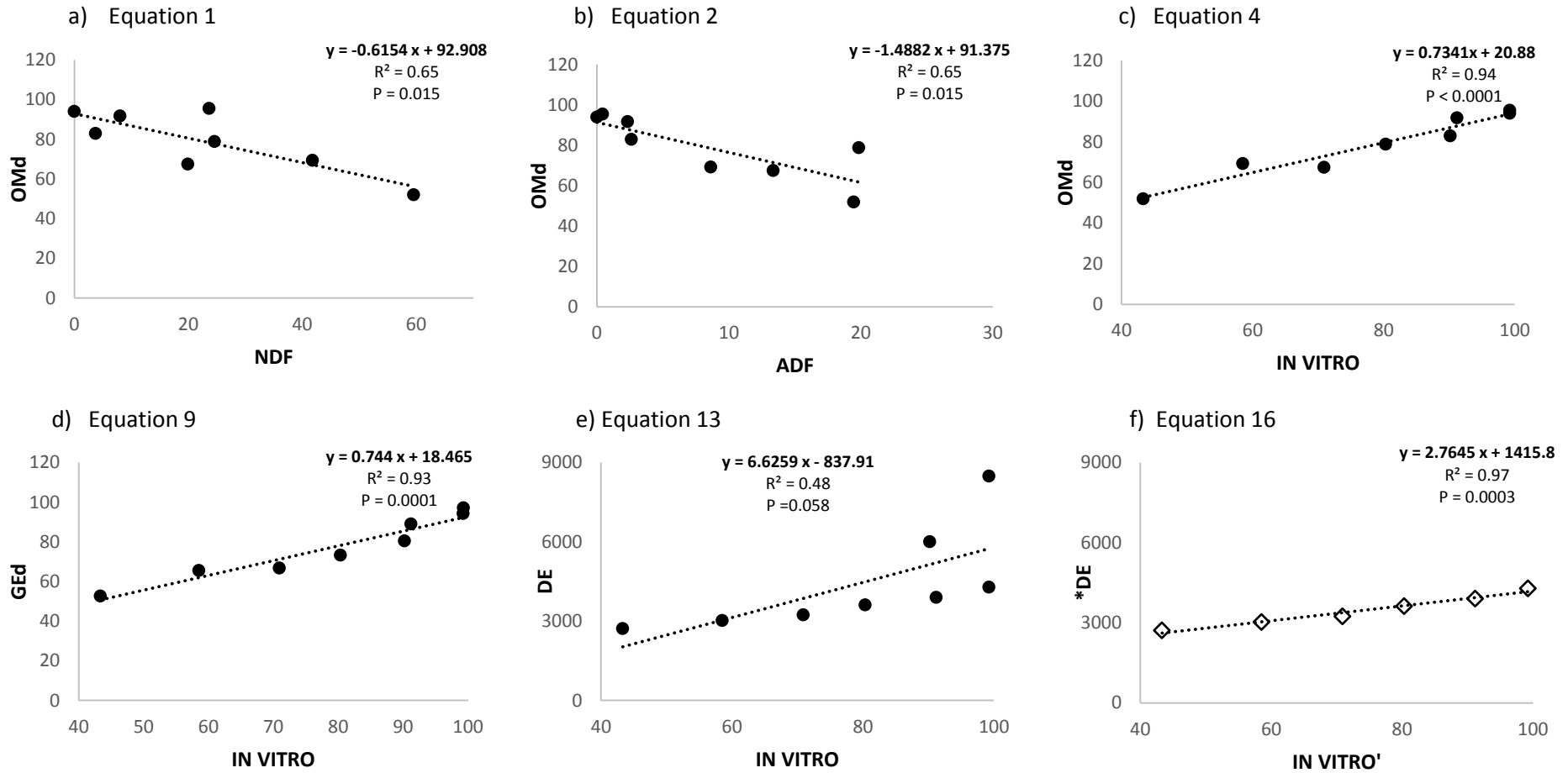
Taking into account the small number of samples used in this study, it can be concluded that *in vitro* OM digestibility is the best single predictor for OMd and GEd, however, it requires more expensive and laborious procedures in the laboratory, in spite of ADF and NDF, which are fast determinations and also give good equations of prediction. To achieve accurate equations of predictions for DE and ME, the determination of EE and also the combination with the results of *in vitro* OM digestibility are necessary.

Nevertheless, further studies and additional measurements are needed to confirm our findings and a greater number of samples per category should be required.

Table 6.6. Predicted means and standard deviation (SD) of the OMd (%), GEd (%), DE and ME (kcal/kg DM) obtained from samples of different batches, and using the more accurate equations of **Tables 6.4** and **6.5**.

By-product	n	OMd			GEd			DE			ME		
		Eq.	Value	SD	Eq.	Value	SD	Eq.	Value	SD	Eq.	Value	SD
Mayonnaise	4	4	92.2	2.14	9	90.8	2.17	14	7649	459.8	20	7574	457.3
		5	93.0	1.86	10	92.1	1.72	16	-	-	22		
Cacao meal	2	4	70.7	3.11	9	69.0	3.16	14	3627	100.8	20	3536	105.4
		5	69.8	3.30	10	67.5	3.46	16	3293	117.3	22	3210	121.7
Kiwi	4	4	76.5	8.26	9	74.8	8.37	14	3366	278.9	20	3286	291.0
		5	73.7	8.77	10	70.2	9.25	16	3509	310.9	22	3435	322.6
Liquid bakery by-product	4	4	92.2	1.50	9	90.7	1.52	14	4118	89.2	20	4059	91.2
		5	92.9	1.30	10	91.9	1.19	16	4100	56.5	22	4048	58.7
Brewery by-product	3	4	50.6	3.35	9	48.6	3.39	14	2472	150.3	20	2354	154.9
		5	51.3	2.76	10	49.7	2.46	16	2535	126.0	22	2424	130.7
Hominy feed	2	4	67.8	5.54	9	66.0	5.62	14	3101	372.7	20	3008	379.9
		5	70.6	4.22	10	70.6	3.45	16	3181	208.7	22	3094	216.6
High-moisture corn	4	4	83.1	5.38	9	81.6	5.45	14	3616	213.2	20	3545	220.9
		5	83.9	4.13	10	82.8	3.51	16	3760	202.5	22	3695	210.1

Figure 6.1. Illustration of some simple prediction equations of OMD (%) and DE (kcal/kg) using chemical composition and/or *in vitro* digestibility values.



CAPÍTULO 7:

***The effects of mixing compound feed with water
on diet digestibility of growing-finishing pigs***

7.1. Objective

The aim of the present study was to evaluate the effect of feeding a large range of water-to-feed ratios, of a barley-wheat-soybean feed, to growing-finishing pigs, on the digestibility coefficients of the feed.

7.2. Material and methods

The experiment was conducted at the animal research facilities, Servei de Granges i Camps Experimentals (SGCE), of the Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Spain. The experimental procedures were approved by the Ethical Committee on Animal Experimentation of the Universitat Autònoma de Barcelona.

7.2.1. Experimental design, animals, housing and diets

Sixteen females (Landrace x Large White), weighing 46.7 ± 1.98 kg of BW, were randomly allotted, on the basis of weight, to four dietary treatments. There were four pens per treatment and one pig per pen. The total experiment lasted 52 days and it was divided into two trials of 26 d each. When finishing the first trial pigs were randomly distributed between the second trial treatments. The initial 20 days of each trial were considered for adaptation to the diet. During this time, the feed was delivered in a *semi-ad libitum* manner, increasing or decreasing the amount of feed offered daily, by 3% - 5%, depending on the previous day's registered refusals. Diet was always offered in two equal daily meals (09.00 h and 16.00 h). Following those twenty days, the daily amount of feed on offer per pig was maintained until the end of the trial, Day 26. Feed refusals were daily collected, dried and weighed to calculate feed intake.

In Trial 1, the diet was fed as a dry diet for the control diet (CON), and as three wet or liquid mixtures produced by mixing water and feed in ratios; 0.6:1 (0.6 parts of water per one part of feed), 2.1:1 and 2.7:1. The wet or liquid diets were made by manually mixing water and dry feed fifteen minutes before feeding to avoid fermentation of the diets. In Trial 2, the diet was fed again as a dry diet (CON), and mixed with water in ratios of

1.35:1, 2.7:1 and 3.5:1. The liquid diets were made in the same way as in Trial 1. The control diet (CON) and 2.7:1 ratio were maintained throughout the whole experiment.

The ingredients and the chemical composition of the dry diet are summarized in **Table 7.1**. The feed was manufactured in dry form (as feed) and was formulated to meet or slightly exceed the energy and nutrient recommendations of FEDNA (2013).

Table 7.1. Diet composition and chemical analysis of the experimental diet (as-fed basis; g/kg).

Ingredient	g/kg
Barley	450.0
Wheat	300.0
Soya bean 47+2	100.7
Maize	62.9
Extruded rapeseed meal	60.0
Calcium carbonate	9.6
Fat +88% triglycerides	5.0
Salt	4.0
Vitamin and mineral premix ^A	3.0
Natuphos [®] 500-P ^B	2.0
Monocalcic phosphate	1.8
Lisine-HCl	0.5
Threonine	0.4
Axtra [®] XB 201 TPT ^C	0.1
<i>Analysis (DM basis)</i>	
Dry matter	891.3
Crude protein (N x 6.25)	146.7
Gross energy (Kcal/kg)	4,413
Ether Extract	22.45
Crude ash	48.34
Crude fiber	42.61
*Lysine	8.41
*Methionine and cysteine	6.64
*Threonine	6.90
*Tryptophan	2.21
*Calcium	7.97

*Phosphorous 4.95

*Calculated values

^a The premix provided vitamins and minerals (per kg) as follows: vitamin A, 3,000,000 IU; vitamin D₃, 600,000 IU; vitamin E, 3,644 mg; vitamin K₃, 345 mg; vitamin B₁, 294 mg; vitamin B₂, 1,248; pantothenic acid, 3,920 mg; nicotinic acid, 8,036 mg; vitamin B₆, 686 mg; vitamin B₁₂, 7 mg; choline, 25,020 mg; biotin, 16 mg; Zn, 40,052 mg as ZnO; Fe, 30,000 mg as FeSO₄ · 7H₂O; Mn, 16,554 mg as MnO; Cu, 8,000 mg as CuSO₄ · 5H₂O; I, 300 mg as Ca(IO₃)₂; and Se, 66 mg as Na₂SeO₃.

^b 500 FTU of *Aspergillus niger* (Natuphos[®] BASF)

^c Xylanase and beta-glucanase

Each pen was equipped with a one-sided, stainless steel feeder and a nipple drinker, which allowed free access to water throughout the experimental trial. After each meal, the feeders were cleaned and feed refusals removed to avoid possible fermentations. Pigs were housed in an environmentally-controlled room.

7.2.2. Sampling and measurements

Individual pig BW was recorded at the beginning and at the end (day 26 in Trial 1 and day 52 in Trial 2) of the experiment to determine ADG. Feed consumption was recorded every day by weighing and drying the leftover in order to determine ADFI. As a result, FCR could be also calculated.

Apparent total tract digestibility of organic matter (OMd), ether extract (EE_d), crude protein (CP_d), crude fiber (CF_d) and gross energy (GE_d) was determined using titanium dioxide (3g/kg) as an indigestible marker. Titanium dioxide was included in the dry feed throughout the experiment. Fresh fecal grab samples were collected from all pigs twice a day on Days 25 and 26 in Trial 1 and twice a day on Days 51 and 52 in Trial 2 via rectal massage.

At the end of the Trial 2, pigs were slaughtered in a commercial slaughterhouse, and final body weight, carcass weight and total percentage of lean meat using AutoFOM were recorded.

7.2.3. Chemical analysis and calculations

All fecal samples were dried at 65°C for 96h in a forced-air oven mixed and pooled until analysis. Before chemical analysis, the fecal samples were thawed, after which they were finely ground to a size that could pass through a 1-mm screen. All feed samples were

collected at the beginning of each trial, and the average value of analyzed composition was used to represent feed composition and calculate the digestibility coefficients.

All feed and fecal samples were analyzed for DM, GE, EE, CP, CF following the procedures outlined by the Association of Official Analytical Chemists (2007). The DM was determined on an aliquot sample to establish the residual water content after drying for 24h at 100°C and the ash content was determined after ignition of a weighed sample in a muffle furnace (Carbolite CWF 1100) at 550°C for 6h. The corresponding analytical result was expressed on a DM basis. The gross energy (GE) content of diets and fecal samples was determined using an oxygen bomb calorimeter (IKA – Calorimeter system C 4000 Adiabatic). The ether extract of diets and feces was analyzed by a solvent extraction system (Soxtec™ 2055 FOSS). The crude fiber (CF) of diets and feces was analyzed using the Ankom 220 Fibre Analyser Unit (ANKOM Technology Corporation; Macedon, NY, USA), expressed as residual ash as described by Van Soest *et al.* (1991). The crude protein (CP) of diets and feces were determined by the Kjeldhal system (Kjeltec 8400 Analyzer Unit FOSS). Crude protein was determined as total N x 6.25.

Titanium dioxide was analyzed via UV absorption spectrophotometry following the method described by Short *et al.* (1996).

The *in vivo* digestibility of DM, GE and nutrients was calculated from the difference between nutrients in the feces and nutrients in the feed, after correction by the indigestible marker.

7.2.4. Statistical analysis

Data were analyzed by a one-way ANOVA using the GLM procedure of SAS (SAS Institute Inc.; Cary, NC) and are presented as the mean. Statistical differences among mean values were assessed by the Tukey t-test. The level of significance was established at 5%. The pig was the experimental unit for all of the variables studied.

Regression analysis, using the REG procedure of SAS, was used to show the effect of dilution ratio on digestibility coefficients and performance parameters.

7.3. Results

Throughout the experiment, all pigs remained healthy, showed a normal behavior and readily consumed most of the feed on offer. Some pigs had small amounts of feed refusals that were recovered, dried and weighed.

7.3.1. Performance and carcass traits

Table 7.2 includes the effect of dilution ratio on the mean values of total weight gain (kg) and average daily feed intake (g/d) of the pigs measured along the first and the second trials, together with the carcass traits registered after slaughtering. **Figure 7.1** and **7.2** show the same effect on the average daily gain (kg/d) and feed conversion ratio (kg/kg) in both experimental trials.

During the first trial, pigs on the 0.6:1 dilution rate had a 25.9% higher weight gain ($P < 0.01$) than did control. Along the second trial, pigs on 1.35:1 and 2.7:1 dilution rates had a non-significant ($P = 0.064$), 14.1% higher weight gain than control. ADFI was unaffected by the water-to-feed ratio, even though differences between dilution rates accounted for 9.8% and 5.7% in the first and second trials, respectively.

The effect of the water-to-feed ratio on the ADG and FCR followed a quadratic evolution with both trials showing a maximum ADG when the diet dilution rates were of 1.38:1 and 1.74:1 for the first and the second trials, respectively (**Figure 7.1**). Similarly, FCR showed minimum values at very similar dilution rates (1.30:1 and 1.58:1 for the first and the second trials, respectively) (**Figure 7.2**). Even though, because the low number of animals, the P -values of those equations were only around 0.20. The potential improvement of mixing feed with water, compared to the control diet, may be up to 0.145 kg/d and 0.125 kg/d for the ADG and of 0.40 kg/kg and 0.31 kg/kg for FCR, during the first and the second trials, respectively.

Table 7.2. Effect of dilution ratio on performance and carcass traits of the animals

	Control	0.6	1.35	2.1	2.7	3.5	RSD	P-value
Trial 1								
Weight gain (kg)	15.53 ^a	19.55 ^b		17.53 ^{a,b}	16.97 ^{a,b}		0.721	0.005
ADFI (g/d)	1689.4	1796.0		1782.1	1854.8		70.78	0.433
Trial 2								
Weight gain (kg)	20.06		22.89		22.90	19.65	1.071	0.064
ADFI (g/d)	2240.4		2367.0		2352.4	2281.2	49.57	0.248
Carcass traits								
Final weight	82.2		87.0		86.6	85.9	2.01	0.347
Yield (%)	75.8		75.7		75.9	76.5	0.60	0.793
Lean meat (%)	59.3		58.7		57.3	58.0	1.46	0.762

^{a-b} Within a row, means without a common superscript differ ($P < 0.05$).

Regarding the results of carcass traits at the end of the second trial, there were no differences among treatments in final weight, percentage of yield and lean meat percentage (Table 7.2).

Figure 7.1. Quadratic regression for ADG in Trials 1 and 2 depending on dilution ratio.

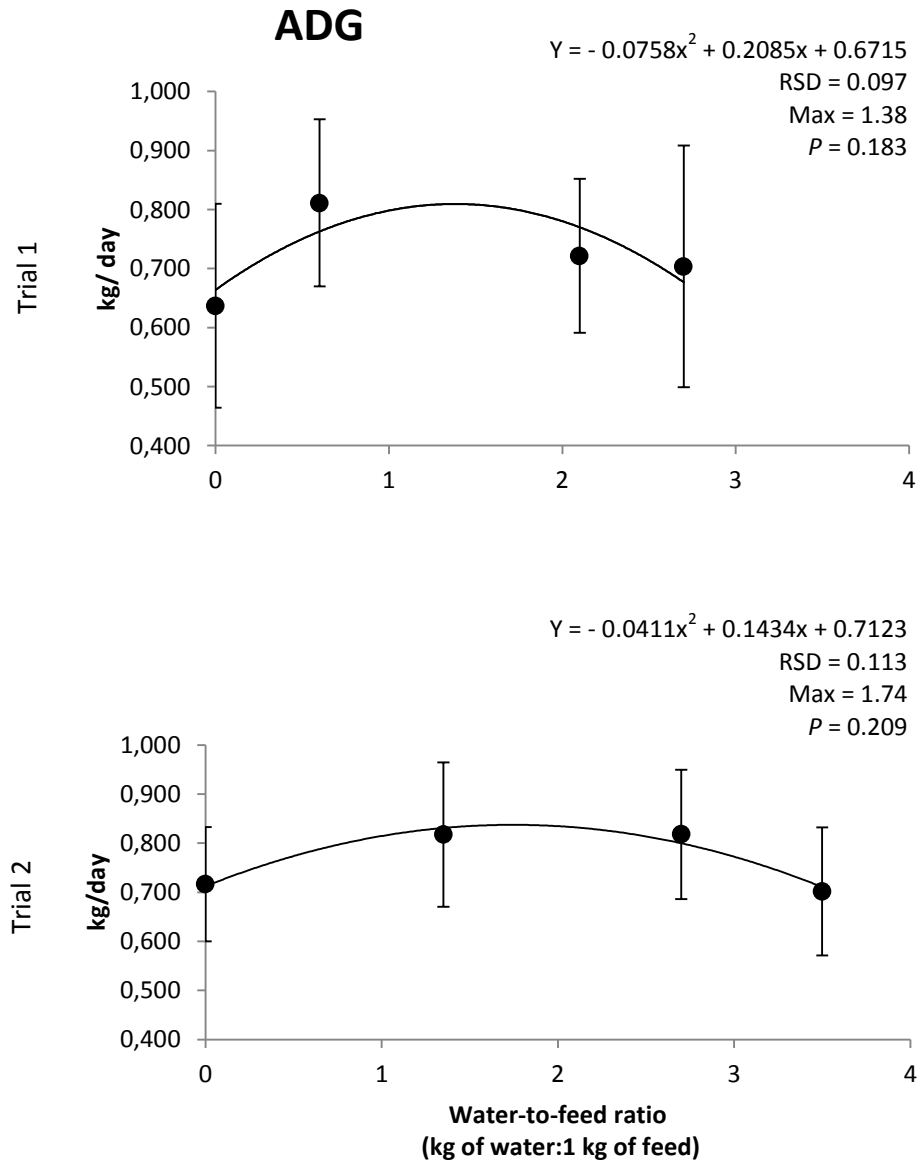
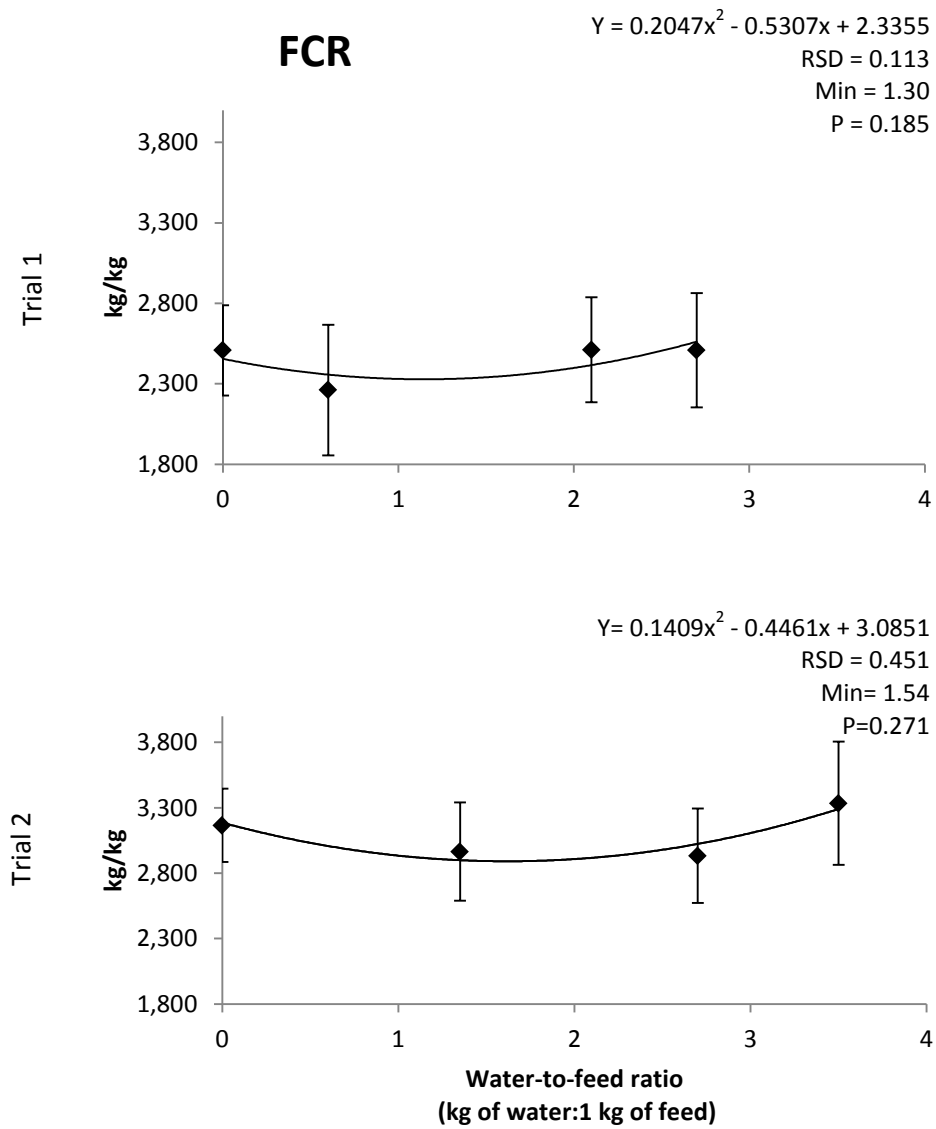


Figure 7.2. Quadratic regression for FCR in Trials 1 and 2 depending on dilution ratio.



7.3.2. Digestibility parameters

The effect of the dilution rate on the apparent total tract digestibility coefficients, together with the digestible organic matter ($\text{g/kg BW}^{0.75}\cdot\text{d}$) and digestible energy ($\text{Kcal/kg BW}^{0.75}\cdot\text{d}$) intakes, are presented in **Table 7.3**.

During the first trial, pigs fed diets with a water-to-feed ratio of 2.1:1 and 2.7:1 had a significantly better OMD and GED than did CON ($P < 0.05$); mean values improved by 3.8% and 3.6% for OMD and by 4.5% and 4.4% for GED, respectively. The 0.6:1 dilution ratio registered non-significant, different intermediate values ($P > 0.05$). Compared to CON, the 2.1:1 and 2.7:1 water-to-feed ratios also showed higher mean values for nutrients digestibility (improvements of 8.1%, 68.0% and 44.9% for CPd, EEd and CFd, respectively), although those differences were not significant ($P > 0.05$). Pigs fed diets with a 2.7:1 dilution ratio had higher ($P < 0.05$) DOMi and DEi than did pigs eating the dry control feed.

Table 7.4 includes the regression parameters of the equations established among dilution rate and OMD, GED or DMOi and DEi. In the first trial, OMD and GED followed a quadratic evolution ($R^2 = 0.50$, $P < 0.02$) showing that the highest digestibility values (the maximum of both equations) were obtained when the dilution rate reached 1.83:1.

In the second trial, digestibilities and DMOi and DEi mean values were similar to those of the first trial (**Table 7.3**). Along this second trial, pigs fed diets with a water-to-feed ratio of 1.35:1, 2.7:1 and 3.5:1 had a significantly better OMD and GED than did CON ($P < 0.05$); mean values improved by 3.3% and 3.7% for OMD and by 4.0% and 4.7% for GED, respectively. Compared to CON, the water-to-feed ratio of 3.5:1 also showed a higher ($P < 0.05$) digestibility for CP (an improvement of 8.9%), EE (75.7%) and CF (50.0%), and the 1.35:1 and 2.7:1 dilutions for CF also (improvements of 39.3%). In contrast to the first trial, DMOi and DEi were not modified by the water dilution rate of the diet ($P > 0.05$).

Table 7.3. Effect of the dilution ratio on the coefficients (g/g) of apparent total tract digestibility and intakes of digestible organic matter (g/kg BW^{0.75}·d) and digestible energy (Kcal/kg BW^{0.75}·d).

	Control	0.6	1.35	2.1	2.7	3.5	RSD	P-Value
Trial 1								
OMd	0.833 ^b	0.857 ^{a,b}		0.865 ^a	0.863 ^a		0.671	0.019
GE _d	0.802 ^b	0.830 ^{a,b}		0.838 ^a	0.837 ^a		0.791	0.024
CP _d	0.751	0.801		0.812	0.785		1.704	0.117
EE _d	0.176	0.239		0.277	0.295		5.119	0.403
CF _d	0.295	0.396		0.421	0.427		4.121	0.138
DOM _i	60.74 ^b	63.48 ^{a,b}		64.20 ^{a,b}	67.05 ^a		1.410	0.032
DE _i	320.71 ^b	338.18 ^{a,b}		345.37 ^{a,b}	359.02 ^a		7.603	0.012
Trial 2								
OMd	0.831 ^b		0.858 ^a		0.859 ^a	0.862 ^a	0.618	0.013
GE _d	0.801 ^b		0.833 ^a		0.837 ^a	0.838 ^a	0.768	0.015
CP _d	0.761 ^b		0.814 ^{a,b}		0.801 ^{a,b}	0.829 ^a	1.432	0.032
EE _d	0.191 ^b		0.296 ^{a,b}		0.313 ^{a,b}	0.335 ^a	3.489	0.054
CF _d	0.324 ^b		0.448 ^a		0.452 ^a	0.486 ^a	2.779	0.007
DOM _i	64.33		66.58		66.55	64.48	1.460	0.540
DE _i	338.31		352.01		350.12	339.94	7.499	0.472

^{a,b} Within a row, means without a common superscript differ ($P < 0.05$).

The regression parameters of the quadratic equations ($R^2 = 0.55$, $P < 0.01$) established among the dilution rate and the OMD or the GEd (**Table 7.4**) showed that the highest digestibility values (the maximum of both equations) were obtained when the dilution rates were 2.70 and 2.72 for OMD and GEd, respectively.

Table 7.4. Regressions equations showing the relation between dilution rate and digestibility coefficients.

	Equations	Max	R²	RSD	P-value
<i>Trial 1</i>					
OMd	$-1.0221x^2 + 3.7509x + 83.437$	1.83	0.53	1.327	0.008
GEd	$-1.1523x^2 + 4.2256x + 80.44$	1.83	0.45	1.570	0.011
<i>Trial 2</i>					
OMd	$-0.4323x^2 + 2.3303x + 83.139$	2.70	0.56	1.221	0.005
GEd	$-0.5151x^2 + 2.8011x + 80.145$	2.72	0.55	1.507	0.006

7.4. Discussion

Data of pig performance using different mixtures of feed and water are quite variable and often even contradictory (Plumed-Ferrer and von Wright, 2009). The main reasons seem to be related to the use of different raw materials, additives or by-products, the age range of the animals, the technological system used or the management conditions of the animals (Plumed-Ferrer and von Wright, 2009). In fact, De Lange et al. (2006) conclude that, based on growth performance of high health status pigs, there is no apparent benefit of liquid feeding growing-finishing pigs and starter pigs that are fed corn-based diets; although this is in contrast to European findings, where swine liquid feeding research is more focused on wheat and barley-based diets. They also indicate that liquid feeding allows for an effective use of co-products. Furthermore, a large variety of water-to-feed ratios are used in practice up to 3:1 - 4:1. Many of those studies were conducted more than 20 years ago, but nowadays are rather limited (Hurst et al. 2008). As our results, most authors (Barber et al. 1963; Forbes and Walker, 1968; Chae et al. 1997; Hurst et al. 2008) showed no differences in carcass traits, yield percentage or lean meat percentage, comparing dry and liquid feeding using different dilution rates. Only Hurst et

al. (2008) found a significant improvement of lean tissue growth using a 3.0:1 ratio, as compared to dry feeding.

In general, our results confirm those of several authors (Forbes and Walker, 1968; Partridge et al., 1992; Russell et al., 1996; Jensen and Mikkelsen, 1998; Hurst et al., 2008; Mößeler et al., 2014) who reported a clear improvement of growing-finishing pig performance by giving liquid diets, as compared to dry diets. Jensen and Mikkelsen (1998) reviewed nine trials comparing dry and liquid feed in piglets and growing–finishing pigs. The results in growing-finishing pigs showed a quite clear but variable improvement of both, feed conversion ratio (mean of $6.9 \pm 3.5\%$, ranged from 1.9 to 12.7) and daily weight gain (mean of $4.4 \pm 5.4\%$, ranged from -2.6 to 15.0). In the present experiment, the optimal water-to-feed ratio that optimizes performance seems to increase ($P < 0.30$, **Figures 7.1** and **7.2**) with the age of pig. The review published by Chae (2000) already mentioned that the optimal water-to-feed ratios vary with the age of the pig and also with the way of preparing and distributing the water-feed mixture. Commercial liquid feeding devices are fully recommended for pigs of more than 40 kg of body weight, using 2.5:1 (English et al. 1988) or 2.0:1 (Pond and Maner, 1984) as the recommended water-to-feed ratios. For lighter pigs, those dilution ratios are too high, too bulky and result in lower dry matter intake and poorer live weight gain (English et al. 1988). Furthermore, when the dilution ratios are around 1.5:1, water-to-feed, or lower, some authors (Pond and Maner, 1984; Chae, 2000) named this mixture “paste feeding” instead of “liquid feeding”.

Since no differences were found in feed intake (**Table 7.2**), performance results should be mainly explained by two reasons: 1) liquid feed improves FCR by reducing feed wastage (Forbes and Walker, 1968; Brooks et al. 2001; Brooks, 2003) and/or 2) liquid feed improves digestibility coefficients of the (Barber et al., 1991b; Choct et al., 2004b; MLC, 2006) (Barber et al. 1991; Choct et al., 2004; MLC, 2006). This is the case in the present experiment (see **Table 7.3**) and water-to-feed ratio that optimize OMD and GED increases with the age of the pig ($P < 0.01$; **Table 7.4**). Our results are in agreement with those of Barber et al. (1991) and Choct et al. (2004a), who found a similar increase in dry matter and energy digestibility by increasing the water-to-feed ratio up to 3.25:1 and 2.50:1, respectively. However Barber et al. (1991) restricted water intake to the amount included

in liquid feed, and Choct et al. (2004b) left the water-to-feed mixture overnight for 15 h before feeding. Conversely, other authors (Moon et al. 2004) found no improvement, or even a decrease, in digestibility by increasing the water-to-feed ratio. These authors also found a reduction of CP and energy ileal digestibility using a T-cannula. Moreover, Pedersen and Stein (2010) showed no differences in ATTD between dry feed and ratios 1:1 and 1:3 of DM, GE and P.

According to Brooks (2003), mixing water with dry feed and feeding the mixture after a few minutes ensures that pigs receive a more homogeneous diet and increases the rate of hydration of the feed, especially if it is finely ground, favoring the action of both digestive and in-feed enzymes. It has been postulated that the increase in diet digestibility due to an increased water-to-feed ratio could be explained by the fact that the water content of the digesta favors the digestion and absorption of nutrients. Mößeler et al. (2014) indicate that liquid feeding “per se” and the DM content of the offered mixture have no effect on the main intragastric parameters nor on the macroscopic evaluation of the non-glandular mucosa. However, the gastric empty rate of liquids is faster than the emptying of solids (Camilleri, 2006; Solà-Oriol et al., 2010). Our results show that the optimal dilution rate to reach the highest performance increases with pig age and agree with authors indicating that total water consumption per unit of dry feed intake decreases with the age or live weight of pigs (Mroz et al. 1995). Although high dilutions for younger pigs are not realistic in the actual liquid-feed commercial conditions because these dilutions are inappropriate for pipe size and pump capacity.

It follows that increasing the water-to-feed ratio may limit the capacity of the pig's stomach (Cumby, 1996), and excessive dilution reduce nutrient density, leading to the intake of energy and nutrients below the optimum level to fulfill the animal's requirements (English et al. 1988). However, (Cumby, 1996) indicates that the maximum of water incorporated in liquid feeds for pigs between 20 kg and 90 kg live weight seems to vary from 3.7 kg to 4.0 kg for each kilogram of meal. Yang et al. (1981) suggested that abdominal fill was an important key to regulate the voluntary feed intake; using 30 kg pigs, they concluded that the maximum daily intake of dry matter and water (total volumetric intake) was 19% of the live weight. In both cases, maximum dilution rates are

higher than the used in the present experiment; however, pigs did not have extra water compared to our experiment were every box was equipped with a functional nipple.

7.5. Conclusions

In summary, the recommended dilution rate to reach optimal performance appears to increase with the age of the pigs. The water-to-feed ratios that optimize digestibility coefficients were 1.83:1 and 2.70:1, for the first and second trial respectively. Optimum dilution rates only will be fully implemented in commercial conditions depending on the technical characteristics of the liquid feed facilities (pipes and pumps).

CAPÍTULO 8: Discusión general

Dada la coyuntura de los últimos años donde los precios de las materias primas son elevados y muy cambiantes (Observatori del Porcí, 2014), la práctica de la alimentación líquida (AL) permite la incorporación de subproductos en piensos para porcino, en especial en el engorde, con el fin de obtener el máximo beneficio productivo y sobretodo económico.

La principal ventaja de los subproductos suele ser que, en relación a su aporte de energía y nutrientes, tienen un coste inferior y muy competitivo respecto a los ingredientes convencionales. Sin embargo, la variabilidad en su composición química, la falta de disponibilidad en determinadas épocas, la escasa información sobre su efecto sobre los animales o de sus características químicas, en el caso de subproductos no convencionales (aquellos que previamente no se han estudiado en la especie de destino) declina muchas veces su uso por parte de los ganaderos. Además, el alto coste de su transporte, cuando se trata de subproductos con un bajo porcentaje de materia seca, también condiciona su uso, a no ser que la granja de destino esté cercana al lugar de producción de este tipo de subproducto.

La práctica de la AL permite, entre otros, el uso de subproductos líquidos procedentes de la industria agroalimentaria que de otra forma deberían ser secados para ser introducidos en la alimentación animal, incrementado su coste.

En este contexto, el objetivo de la presente tesis fue estudiar la metodología en la evaluación de subproductos convencionales y no convencionales para ser introducidos en la AL de cerdos de engorde, utilizando como modelo una granja de engorde comercial situada en la provincia de Tarragona. Por otra parte, también se evaluaron diferentes ratios de dilución en cerdos de engorde, con el fin de valorar cual era la dilución que permitía el mejor aprovechamiento de los nutrientes y energía.

Los resultados individuales obtenidos se han ido discutiendo en cada uno de los capítulos de la presente tesis doctoral, con lo cual, en esta discusión general se reunirán conjuntamente para resaltar los hallazgos más interesantes y profundizar en ellos. Se discutirán también las limitaciones que han ido surgiendo a lo largo del desarrollo de cada uno de los trabajos, así como las estrategias para solucionarlos y los aspectos a mejorar.

8.1. Identificación de potenciales subproductos

La introducción rutinaria en la fórmula del pienso de un ingrediente o subproducto no convencional precisa conocer de antemano algunas características concretas de dicho ingrediente (Crickenberger and Carawan, 1996). En la primera fase de esta tesis se realizaron encuestas a diferentes industrias, localizadas en un radio de no más de 100 km, aproximadamente, de la granja para valorar el potencial de los subproductos que podían ofrecer. Como quedó reflejado en el **Capítulo 4**, en las encuestas se recogía información referente a (1) la descripción del subproducto por parte de la industria, como por ejemplo si el subproducto estaría disponible continuamente o si por el contrario la disponibilidad era estacional, si era homogéneo en cuanto a la composición de sus ingredientes o había variaciones, tipos de procesado tecnológico para su obtención, capacidad de producción, si ese subproducto ya tenía algún coste; (2) características de logística, método de transporte, distancia entre la industria y la granja para tener en cuenta los costes del transporte; y (3) los requerimientos a nivel de granja, si el subproducto requería condiciones especiales de almacenamiento para asegurar su calidad nutritiva y microbiológica y cantidades que serían necesarias por parte de la granja.

Con los resultados de las encuestas, ya se pudieron descartar algunos subproductos como por ejemplo los aceites de fritura, debido a que podían presentar dioxinas y constituían un riesgo para la salud de los animales. Otros que también se descartaron fueron los residuos de vegetales, debido a que eran muy estacionales, no aseguraban un suministro continuo, la cantidad suministrada era baja y la propia naturaleza del subproducto, compuesto básicamente de restos de cebollas y puerros, podría provocar atascos en el sistema de AL.

La información obtenida permitió elegir un abanico de subproductos que fueron sometidos a análisis químico y de estos, en los trabajos posteriores, los más prometedores fueron ensayados en condiciones *in vivo*.

8.2. Valorización de subproductos

8.2.1. Análisis químicos

De los subproductos que no se descartaron, se tomaron muestras de varios lotes en las industrias y se realizó un análisis proximal de los principales nutrientes y energía bruta. Con ello se valoró, por una parte las características químicas del subproducto y por otra, la variabilidad nutricional que existía dentro de un mismo subproducto.

Con los resultados obtenidos se vio que los subproductos más interesantes eran los más energéticos como la mayonesa y la harina de almendra. Otro subproducto interesante era el chocolate con frutos secos pero dejó de estar disponible al poco tiempo de empezar el estudio, al igual que los residuos de cefalópodos. Otros subproductos con mayor contenido en componentes fibrosos y con un contenido aceptable en energía y proteína fueron los derivados de panadería, derivados de maíz, subproducto de cacao, pulpa de remolacha y restos de kiwis.

8.2.2. Estudios *in vivo*

8.2.2.1. Pruebas en condiciones comerciales

La prueba definitiva, para la valoración de nuevos ingredientes, la ofrecen los ensayos *in vivo* donde se comparan los rendimientos productivos de cerdos alimentados con un pienso control en comparación con otro que incluye una determinada proporción, en general no muy elevada y sin riesgo, del ingrediente o subproducto a testar. La hipótesis de partida, derivada de la introducción del ingrediente no convencional en la fórmula, suele ser no tanto mejorar los rendimientos productivos sino más bien no empeorarlos y beneficiarse del menor coste del pienso. Tras seleccionar los mejores subproductos, se decidió realizar una prueba a nivel de campo en una granja comercial provista de AL.

En la primera prueba, se optó por introducir un bajo porcentaje de mayonesa, un 4% en pre-engorde, un 3,5% en engorde y un 3% en acabado. Los resultados mostraron como los rendimientos productivos empeoraron respecto a la dieta control. Los cálculos

económicos revelaron además que el uso de la mayonesa no había sido económicamente rentable. Dichos resultados estaban en contra de los estudios publicados en la bibliografía con otras combinaciones de subproductos como subproductos de patatas, almidón de trigo y sueros, donde se observaban mejoras económicas en la mayoría de los casos (Moreau et al., 1992; Scholten et al., 1999) e incluso de los índices productivos (Scholten et al., 1997). En un análisis más exhaustivo de los resultados se observaron dos circunstancias importantes: 1) los valores de composición química y nutritiva de los piensos control y experimental no eran valores “analizados” sino “calculados” a partir de los valores individuales de cada ingrediente que figura en la matriz de formulación y, por tanto, los valores reales (“analizados”) podrían ser diferentes. En cualquier caso las posibles diferencias entre los valores “analizados” y calculados” para dietas con una proporción de ingredientes convencionales tan elevada difícilmente podía explicar la variación observada en los resultados. 2) El hecho de tener una composición química y nutritiva equivalente (dietas isoenergéticas e isoproteicas) no significa que los piensos control y experimental estuvieran compuestos por las mismas materias primas. De hecho, para obtener una composición química y nutritiva equivalente, la introducción de un pequeño porcentaje de mayonesa en el pienso experimental determinó que, para mantener un precio mínimo, la dieta control cambió parte del cereal de la experimental (cebada y trigo) por maíz y aumentó el nivel de soja 44 (entre 3 y 5 puntos porcentuales) reduciendo el de torta de colza (entre 4 y 5 puntos porcentuales). Es conocido que el maíz y la soja 44 ofrecen ventajas nutritivas sobre los demás cereales y la torta de colza, respectivamente.

A la vista de estos resultados se propuso la repetición de la prueba con mayonesa en las mismas condiciones pero con un nivel de inclusión más elevado (7,75%), solo en la fase de pre-engorde. Posteriormente, y tras una fase de blanqueo de 1 mes sin subproductos donde todos los animales se alimentaron con la misma dieta, se realizó otra prueba con la inclusión de un 10% de harina de almendra. Los resultados, en este caso, demostraron que sin empeorar estadísticamente los resultados productivos, la introducción de la mayonesa redujo el coste total del pienso en un 15% y en el caso de la harina de almendra fue del 10%.

8.2.2.2. Pruebas de digestibilidad en condiciones experimentales

Para las pruebas a nivel comercial con cerdos de engorde, fueron necesarios 3,5 meses para el primer y 3,5 meses más para el segundo más el tercer estudio del **Capítulo 4**. A la vista del esfuerzo realizado, las dificultades logísticas y del tiempo invertido para la valoración de únicamente dos de los subproductos seleccionados (mayonesa y harina de almendra) y que, además, el resultado tan solo era aplicable a las condiciones de realización del ensayo, se decidió realizar un enfoque más generalizable utilizando pruebas de digestibilidad que se llevaron a cabo en el Servei de Granges i Camps Experimentals de la Universitat Autònoma de Barcelona (**Capítulo 5**).

En el **Capítulo 5** se describen los dos sistemas de evaluación de la digestibilidad que se utilizaron, dependiendo de la fiabilidad y confianza depositada en el uso de cada subproducto. En el primer estudio, se evaluó la digestibilidad de 4 subproductos convencionales de confianza (galleta líquida, bagazo de cerveza, pastone y harina zotécnica) *por diferencia*, introduciendo el subproducto a un nivel de inclusión del 50%. Dado que se trataban de subproductos convencionales, en los que estudios previos habían demostrado su inocuidad a altos niveles de inclusión (Amaefule et al., 2006; Niven et al., 2007; Aguilera-Soto et al., 2009; Columbus et al., 2010; Almeida et al., 2011; Rojas et al., 2014). En el segundo estudio, se valoró la digestibilidad de 4 subproductos no convencionales, menos conocidos o bien claramente desequilibrados en su relación potencial energía-proteína, *por regresión* a partir de diferentes niveles de inclusión. Debido a la escasa o nula información de estos subproductos en la bibliografía consultada se utilizaron niveles de inclusión relativamente bajos (2 – 4 – 7 y 10% para la mayonesa, la harina de almendra y la harina de cacao; y 4 – 8 – 12 – 16% para el kiwi), y por extrapolación al 100% (*por regresión*) se calculó su digestibilidad.

Los resultados mostraron que los subproductos con mayores digestibilidades (superior al 80%) de la materia seca, materia orgánica y energía fueron el pastone, la galleta líquida, la mayonesa y la harina de almendra. Mediante ajustes cuadráticos se observó como en el caso de la mayonesa y la harina de almendra, ingredientes de alto contenido en grasas, los niveles máximos de inclusión no deberían sobrepasar el 8,5% para la mayonesa ni el

6,9% en el caso de la harina de almendra. Dichos valores estarían bastante cercanos a los utilizados en las pruebas comerciales (**Capítulo 4**), en los que se trabajó con niveles de inclusión bajos, entre 3,5 y 7,75% para la mayonesa y 10% para la harina de almendra. Con respecto a los subproductos restantes (bagazo de cerveza, harina zootécnica, harina de cacao y kiwi) la digestibilidad no llegó al 80% debido al alto porcentaje de componentes fibrosos en su composición, lo cual indicó que su incorporación en las raciones de cerdos de engorde se debería realizar con cautela para no penalizar el valor nutritivo de la ración total.

8.2.3. Estudios *in vitro* y predicción del valor nutritivo

La digestibilidad de estos subproductos no es constante, ya que está relacionada con su composición química, de forma que un subproducto que presenta una composición química poco constante tendrá una digestibilidad más variable (McDonald et al., 2011). Por lo tanto, es evidente que no resulta viable económicamente realizar continuamente pruebas de digestibilidad *in vivo*, para cada uno de los subproductos y sus lotes.

Por otra parte, la variabilidad de los subproductos dificulta la formulación de las dietas, siendo necesaria la reformulación de las dietas para compensar los cambios en la composición entre lotes de subproductos (Brooks, 2003). Por consiguiente, se hace patente la necesidad de disponer de métodos rápidos y sencillos para predecir el contenido de ED y EM de los subproductos. En el caso de los piensos y materias primas convencionales existen ecuaciones de predicción de su contenido energético a partir de la composición química (Just et al., 1984; Noblet y Perez, 1993), pero para los subproductos esta información es muy limitada (Park et al., 2015).

Una forma sencilla de predecir el valor nutritivo es utilizando ecuaciones de predicción que han de ser previamente definidas. En teoría, el contenido en energía puede ser predicho mediante su digestibilidad *in vitro* (Spanghero y Volpelli, 1999), siguiendo la metodología de Boisen y Fernández (1997), o a partir de los resultados del análisis proximal (Noblet y Perez, 1993; Spanghero y Volpelli, 1999). Disponiendo de ecuaciones

de predicción, aparte de evitar el uso de animales vivos, se reduce el coste del experimento considerablemente, es menos laborioso y los resultados obtenidos son más generalizables que los experimentos *in vivo* (Zijlstra et al., 2010).

A partir de estas premisas, se realizaron una batería de digestibilidades *in vitro* en el laboratorio con el objetivo de, mediante los resultados obtenidos previamente en el análisis químico de los diferentes subproductos y su digestibilidad *in vitro*, diseñar ecuaciones de predicción útiles para predecir los valores de digestibilidad de la materia orgánica y energía de los subproductos (**Capítulo 6**).

Entre las metodologías utilizadas, la determinación *in vitro* (Boisen y Fernández, 1997) proporciona la estimación más precisa de la digestibilidad de piensos compuestos para cerdos (Van der Meer y Perez, 1992). En este trabajo hemos podido comprobar que también es una estimación precisa para los subproductos. Además, estas predicciones mejoran considerablemente con la introducción de otras variables procedentes de la composición química, mediante regresiones múltiples, al igual que Van der Meer y Perez (1990).

Cuando únicamente se utilizó la composición química, las variables independientes que mejor predecían la digestibilidad de la materia orgánica (dMO) y de la energía (dEB) fueron la fibra neutro detergente (NDF) y la fibra ácido detergente (ADF) ($R^2 = 0.65 - 0.71$, respectivamente; y el extracto etéreo y la NDF para la ED y EM ($R^2 = 0.88 - 0.94$).

Las mejores ecuaciones fueron utilizadas para predecir las dMO, dEB, ED y EM, de aquellos subproductos que previamente se habían estudiado *in vivo* y los resultados de la comparación entre los valores reales y predichos quedan representados en la **Tabla 8.1**. Observándose como se había conseguido una predicción precisa a partir de los resultados de la composición química y de la digestibilidad de la MO *in vitro*.

Tabla 8.1. Valores reales de dMO y dEB de los subproductos ensayados y predicciones obtenidas utilizando las ecuaciones más precisas obtenidas en el **Capítulo 6 (Tabla 6.6)**.

	Mayonesa	Harina de almendra	Harina de cacao	Kiwi	Galleta líquida	Bagazo de cerveza	Harina zootécnica	Pastore
dMO	94,1 ± 16,32	84,0 ± 16,02	67,5 ± 38,68	78,9 ± 15,65	95,4 ± 1,40	51,9 ± 6,69	69,3 ± 5,41	91,7 ± 1,91
IN VITRO	99,3 ± 1,02	90,2 ± 2,62	70,9 ± 1,92	80,3 ± 2,06	99,3 ± 0,01	43,3 ± 0,20	58,5 ± 0,83	91,2 ± 0,07
Ec. 4	92,2 ± 2,14	-	70,7 ± 3,11	76,5 ± 8,26	92,2 ± 1,50	50,6 ± 3,35	67,8 ± 5,54	83,1 ± 5,38
Ec. 5	93,0 ± 1,86	-	69,8 ± 3,30	73,7 ± 8,77	92,9 ± 1,30	51,3 ± 2,76	70,6 ± 4,22	83,9 ± 4,13
dEB	97,1 ± 16,38	80,4 ± 19,06	66,7 ± 42,60	73,2 ± 18,49	94,2 ± 1,76	52,6 ± 7,15	65,5 ± 5,99	89,0 ± 2,38
Ec. 9	90,8 ± 2,17	-	69,0 ± 3,16	74,8 ± 8,37	90,7 ± 1,52	48,6 ± 3,39	66,0 ± 5,62	81,6 ± 5,45
Ec. 10	92,1 ± 1,72	-	67,5 ± 3,46	70,2 ± 9,25	91,9 ± 1,19	49,7 ± 2,46	70,6 ± 3,45	82,8 ± 3,51

Ec. 4, dMO = 20,88 + 0,734 x IN VITRO; Ec. 5, dMO = 30,90 - 0,302 x ADF + 0,639 x IN VITRO; Ec. 9, dEB = 18,47 + 0,744x IN VITRO; Ec. 10, dEB = 34,81 - 0,493 x ADF + 0,589 x IN VITRO

Por otra parte las ecuaciones validadas, se pueden aplicar al resto de los subproductos (Tabla 8.2) que no habían sido estudiados *in vivo*, pero sí *in vitro*, y además se disponía de su composición química.

Tabla 8.2. Valores medios predichos y desviación estándar (SD) de la dMO (%), dEB (%), ED y EM (kcal/kg MS) obtenido de muestras de subproductos no ensayados “in vivo”.

Subproducto	n	dMO			dEB			ED			EM		
		Ec.	Media	SD	Ec.	Media	SD	Ec.	Media	SD	Ec.	Media	SD
Pulpa de remolacha	2	4	75,3	1,71	9	73,6	1,73	14	3124	72,7	20	3043	75,1
		5	78,3	1,49	10	67,1	2,25	16	3464	64,3	22	3388	66,7
Chocolate con frutos secos	3	4	89,8	2,10	9	88,3	2,13	14	5330	127,1	20	5262	124,9
		5	90,9	1,83	10	89,4	2,41	16	4010	79,1	22	3955	82,1
Cefalópodos	3	4	92,9	0,49	9	91,5	0,50	14	4102	19,9	20	4045	20,6
		5	93,6	0,43	10	92,3	0,28	16	4130	18,4	22	4079	19,1
Galleta sólida	2	4	92,4	0,13	9	91,0	0,14	14	4009	15,3	20	3951	15,4
		5	93,2	0,12	10	91,9	0,09	16	4109	5,1	22	4057	5,3

Ec. 4, dMO = 20,88 + 0,734 x IN VITRO; Ec. 5, dMO = 30,90 -0,302 x ADF + 0,639 x IN VITRO; Ec. 9, dEB = 18,47 + 0,744x IN VITRO; Ec. 10, dEB = 34,81 – 0,493 x ADF + 0,589 x IN VITRO; Ec. 14, DE = 846,34+ 5,081 x EE + 3,045 x IN VITRO; Ec. 16, DE = 1415,96 + 2,764 x IN VITRO; Ec. 20, ME = 687,45 + 5,057 x EE + 3,150 x IN VITRO; Ec. 22, ME = 1262,92 + 2,868 x IN VITRO.

Es de destacar que las predicciones de todos los parámetros (dMO, dEB, ED y EM) se encuentran dentro del rango de variabilidad para el que han sido definidas las ecuaciones (p.ej. para la dMO todos los valores superan el 52%); consecuentemente los valores obtenidos pueden ser aceptados como una estimación del valor nutritivo de estos subproductos (Mc Donald et al., 2011).

8.3. La dilución en alimentación líquida

En este trabajo no solamente se ha estudiado la valoración y utilización de subproductos utilizando la AL. Los datos consultados en la bibliografía acerca del uso de la AL con pienso comercial para cerdos de engorde son muy variables e incluso contradictorios en algunos casos (Plumed-Ferrer and von Wright, 2009). Las fuentes de variación de los resultados pueden depender de la edad de los animales, la composición del pienso, las condiciones ambientales, la calidad del agua y el ratio de dilución (Choct et al., 2004a; de

Lange and Zhu, 2012). Por ello, una parte importante del trabajo ha estado focalizada en el estudio del sistema, y particularmente en los ratios de dilución utilizados. En el último estudio se evaluó el efecto de diferentes diluciones (agua:pienso) sobre la digestibilidad de la dieta y los rendimientos productivos de cerdos de engorde (**Capítulo 7**).

Este tipo de estudio no se podía realizar en condiciones comerciales debido al elevado número de ratios de diluciones que se pretendían probar además de un control seco (5 diluciones más 1 control seco). Por lo tanto, se llevó a cabo a nivel experimental, realizando las mezclas o diluciones manualmente en cada uno de los comederos de los animales. Asimismo, ciertos ratios de dilución habrían sido imposibles de conseguir en un sistema de AL comercial, como por ejemplo los ratios 0,6:1 y 1,5:1. En las instalaciones donde se realizó este estudio, únicamente se podían testar 4 tratamientos, con lo cual el estudio se dividió en dos pruebas. En la primera prueba, con animales de 47 kg, se valoraron los tratamientos seco (0:1), y 0,6:1, 2,1:1 y 2,7:1. En la segunda prueba, con los mismos animales redistribuidos aleatoriamente y con un peso de 65 kg, se valoraron las diluciones 0:1, 1,5:1, 2,7:1 y 3,5:1. Se utilizaron periodos de adaptación de 20 días, para evitar efectos confusos debido a los tratamientos de la prueba anterior. Como puede observarse el tratamiento seco se mantuvo durante todo el estudio, como control, así como la dilución 2,7:1, ya que es la dilución más utilizada en condiciones comerciales.

Por lo general el uso de la AL mejora los índices productivos respecto a la alimentación en seco (Forbes y Walker, 1968; Partridge et al., 1992; Russell et al., 1996; Jensen y Mikkelsen, 1998; Hurst et al., 2008; Mößler et al., 2014). Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, los resultados son variables y algunos autores no observaron dichas mejoras (Lawlor et al., 2002; Lange et al., 2006). En nuestros estudios se observaron solamente mejoras numéricas de los rendimientos productivos, respecto al control seco, probablemente como consecuencia del bajo número de animales. Se observó también que los rendimientos seguían ajustes cuadráticos con lo cual se pudo determinar que los mejores rendimientos se obtuvieron con el ratio de dilución 1,30-1,38 en la primera prueba y con los ratios 1,74 -1,54 en la segunda prueba, o dicho de otra manera, el contenido de agua que optimiza los rendimientos productivos es más baja para los animales más jóvenes que para los más pesados.

Pocos trabajos han evaluado la digestibilidad de la dieta comparando diversos ratios. Únicamente, en un trabajo no se observaron diferencias comparando seco, 1:1 y 3:1 (Pedersen y Stein, 2010). En nuestro caso se observaron mejoras significativas en la digestibilidad de los nutrientes en ambas edades. Además, la dMO y la dEB siguieron ajustes cuadráticos justificando en buena parte los rendimientos productivos.

Los resultados confirmaban que la mejor dilución a utilizar en condiciones comerciales variará con la edad de los animales (Chae, 2000; Choct et al., 2004a). Siendo las diluciones más bajas mejores para animales jóvenes y las raciones más diluidas mejor para animales de mayor edad. La diferencia en la capacidad de ingestión podría ser la principal explicación (Cumby, 1986; Geary et al., 1996; Russell et al., 1996). Sin embargo, no hay que olvidar que las diluciones a utilizar en la práctica dependerán del sistema de AL y principalmente vendrá determinado por la potencia de la bomba y el diámetro de las tuberías, siendo las diluciones inferiores a 2:1 difíciles de alcanzar en la mayoría de situaciones comerciales actuales.

8.4. Algunos aspectos a mejorar

A continuación se presentan algunos de los aspectos que no se han considerado hasta el momento y que han limitado el valor potencial los resultados, debido en primer lugar a la falta de experiencia, a la realización de pruebas a nivel comercial en la que los tiempos vienen marcados por el propio manejo de la granja y a la superposición, en algunos de los casos, de varias pruebas simultáneamente.

Entre estas limitaciones destacamos las siguientes:

- a) En el transcurso de la presente tesis doctoral, se han ido obteniendo continuamente muestras de diferentes subproductos, los análisis realizados se han basado en el análisis Weende y Van Soest. En especial para algunos subproductos sería conveniente conocer información complementaria como el contenido en azúcares, almidones y aminoácidos.
- b) Las dietas fueron formuladas por el equipo investigador y fabricadas en la propia granja comercial que dispone de su propia fábrica de piensos. En la mayoría de

- casos el análisis químico de las dietas se hizo *a posteriori*, una vez la prueba había empezado, con lo cual posibles desviaciones entre el valor calculado y analizado se detectan una vez iniciada la prueba experimental.
- c) Debido a las características de las instalaciones y a la necesidad de evaluar un elevado número de tratamientos en cada prueba (Capítulos 5 y 7). Se utilizaron únicamente 4 réplicas por tratamiento, lo que hace difícil evaluar con precisión los parámetros productivos. Con todo, es de justicia señalar que en el **Capítulo 7 a priori** tan solo se contempló la digestibilidad y no los parámetros productivos. Además, en los dos estudios (Capítulos 5 y 7), los animales fueron alojados individualmente, con lo cual la extrapolación de los resultados productivos a nivel comercial es difícil.
 - d) En el **Capítulo 5**, los valores de digestibilidad de los subproductos no convencionales se obtienen de la extrapolaciones a 100% de subproducto en la ración, a partir de los niveles 2, 4, 7 y 10% (4, 8, 12 y 16% en el caso del kiwi). Con estos bajos niveles de inclusión, y como era previsible, los resultados de las extrapolaciones de la digestibilidad vinieron acompañados de errores muy elevados que, en ningún caso se observaron con los subproductos convencionales por diferencia. La cautela mostrada con los niveles de inclusión penalizó los resultados; a la vista de que ninguno de los subproductos causó problemas en los animales, quizás se podría haber sido más agresivo con los niveles de inclusión.
 - e) Se han evaluado hasta un total de 18 subproductos, ocho de ellos *in vivo*. Sin embargo, creemos que disponer de más lotes para cada subproducto habría mejorado la precisión de los resultados para su aplicación en condiciones comerciales.
 - f) En el estudio de los ratios de dilución (**Capítulo 7**), por las características de las instalaciones experimentales, todos los animales tuvieron a libre disposición agua, pero no se dispuso de ningún medidor para evaluar el consumo. Podríamos especular con que los animales con diluciones más elevadas consumieron menos agua que los de las raciones menos diluidas o en seco, aunque esta afirmación no se pueden respaldar con datos.

8.5. Propuestas para futuros estudios y aplicaciones

Con los resultados generados y la experiencia adquirida en la realización de la presente tesis doctoral, el futuro se podría encaminar a:

- a) Dado que la industria agroalimentaria está en continua evolución, continuar la búsqueda de subproductos no convencionales con potencial para ser utilizados en AL (a modo de *screening* permanente), evaluando *in vivo* algunos de los más prometedores por su cantidad y valor nutritivo potencial. Con ello se mejoraría la base de datos actual y se perfeccionarían las ecuaciones de predicción, llegando incluso a poder diferenciar ecuaciones para aquellos subproductos más energéticos, proteicos o equilibrados. Ejemplos de nuevos subproductos sería el subproducto okara, el subproducto de olivas y los subproductos de camelina que aparecieron al final de la realización de ésta tesis doctoral.
- b) Con los subproductos disponibles, se podría trabajar para predecir el análisis químico mediante tecnologías NIRS. Con esto, se podría tener una aproximación rápida de la composición química de los subproductos y su variabilidad se podría predecir más fácilmente (Zijlstra et al., 2010). Probablemente el punto limitante estaría en realizar una correcta calibración del NIRS. Además, a más largo plazo, la implementación de NIRS podría incluso utilizarse para predecir la digestibilidad (Harrison et al., 1991; Van Leeuwen et al., 1991). Este método es mucho más rápido que los métodos *in vitro*, pero también depende de la calibración con un número relativamente grande de muestras con valores conocidos *in vivo*, que es el principal obstáculo para su implementación (Harrison et al., 1991).
- c) Otro asunto de gran interés a nivel de granja es valorar los tratamientos, tanto químicos, microbiológicos o de otra índole, de aquellos subproductos más perecederos y así preservar su valor nutritivo y alargar su vida útil.
- d) Realizarse estudios a nivel comercial de los ratios de dilución, para confirmar los resultados productivos obtenidos a nivel experimental sería otro excelente reto.
- e) Finalmente, muchos de los subproductos que se han evaluado en esta tesis, no presentaban ningún coste, a excepción de los costes asociados al transporte. Sin embargo, un aumento de la demanda, puede llevar a la implementación de

precios por parte de las industrias productoras. Con ello, se deberá valorar si el nuevo precio es suficiente competitivo como para continuar con la utilización de ese subproducto, o si por el contrario se desestima su utilización a favor de otro subproducto de similar composición o que, aun con peor composición química, justifique su uso en los animales. Para obtener el máximo beneficio del uso de la AL y de la inclusión de subproductos en las dietas resulta crucial, no solo tener una “cartera” de subproductos suficientemente amplia y correctamente valorada, sino también mejorar su logística de aprovisionamiento y de manejo en granja.

CAPÍTULO 9: Conclusiones

Los resultados obtenidos en los diferentes estudios y su posterior interpretación permiten extraer conclusiones a dos niveles:

A) En relación a la **valoración y utilización de subproductos** para cerdos de cebo utilizando la alimentación líquida:

1. Existe un amplio abanico de subproductos procedentes de la industria agraria y alimentaria que pueden ser valorizados e incluidos en dietas para cerdos de engorde utilizando un sistema de alimentación líquida (AL). Esta gran disponibilidad se estrecha cuando se tienen en cuenta aspectos logísticos como el manejo, la conservación, la variabilidad y la estacionalidad de los subproductos, o se analiza su composición química proximal. A partir de esta información, se pueden clasificar los subproductos en potencialmente energéticos o más energéticos que proteicos (mayonesa, subproducto de oliva y almidón de patata), potencialmente proteicos (subproductos de cefalópodos, okara, torta de camelina y bagazo de cerveza) y subproductos con una relación energía-proteína potencialmente equilibrada (cascarilla de camelina, pulpa de remolacha, kiwi, harina de cacao, harina zotécnica, pastone de maíz, subproductos de panadería, harina de almendra y subproducto de chocolate con frutos secos).
2. En la práctica, el valor definitivo de un nuevo ingrediente o subproducto para alimentación animal la ofrecen las pruebas comerciales de producción utilizando los animales de destino. Para realizar correctamente este tipo de pruebas, en su concepción más simple, es necesario formular dos dietas (control vs tratamiento) isoenergéticas e isoproteicas, pero además es fundamental variar lo mínimo posible el tipo y nivel de los ingredientes de la dieta tratamiento con respecto a la dieta control, con el fin de evitar efectos confundidos. La utilización de mayonesa (al 7,75% de la MS) y de harina de almendra (al 10,0%) en la dieta, administrada en un sistema de AL, no empeoró significativamente los rendimientos productivos de los cerdos de engorde y consiguió una reducción del coste total de alimentación cifrado en un 15% y 10% para la mayonesa y la harina de almendra, respectivamente. Este tipo de pruebas, además de ser largas (3,5 meses) y

- costosas, en el mejor de los casos, ofrecen un valor nutricional del subproducto que es aproximado y no generalizable.
3. La digestibilidad de la materia orgánica (dMO) y de la energía (dEB) de la galleta líquida, el bagazo de cerveza, la harina zootécnica y el “pastone” determinada “por diferencia” utilizando un 50% de inclusión de subproducto en la dieta y una ratio de dilución 2,7:1 agua:materia seca, no se vio alterada por el nivel de inclusión del subproducto en la ración. Los valores de dMO fueron de $95,4 \pm 1,40$, $51,9 \pm 6,69$, $69,3 \pm 5,41$ y $91,7 \pm 1,91$ y de dEB de $94,2 \pm 1,76$, $52,6 \pm 7,15$, $65,5 \pm 5,99$ y $89,0 \pm 2,38$ para la galleta líquida, el bagazo de cerveza, la harina zootécnica y el “pastone”, respectivamente.
 4. La dMO y la dEB de la mayonesa, la harina de almendra, la harina de cacao y el kiwi se estudió “por regresión” mediante cuatro niveles de inclusión, al ser considerados subproductos menos convencionales y de mayor riesgo. Los valores de dMO y dEB fueron $94,1 \pm 16,32$, $84,0 \pm 16,02$, $67,5 \pm 38,68$ y $78,9 \pm 15,65$, y de $97,1 \pm 16,38$, $80,4 \pm 19,06$, $66,7 \pm 42,60$ y $73,2 \pm 18,49$ para la mayonesa, harina de almendra, harina de cacao y kiwi, respectivamente. Los altos errores estándar observados son fruto de la extrapolación matemática y así deben ser interpretados. Además, la evolución de la digestibilidad del extracto etéreo sugiere que el nivel máximo de inclusión de la mayonesa en la dieta no debería sobrepasar el 8,5%; o el 6,1% para la harina de almendra. La evolución de la digestibilidad de otros nutrientes (p. ej. Fibra Bruta) recomiendan que la harina de cacao y el kiwi se deberían incluir con cautela.
 5. Los mejores predictores químicos de la dMO y dEB son la fibra neutro detergente y ácido detergente ($R^2 = 0,65 - 0,71$), mientras que para la energía digestible (ED) y la energía metabolizable (EM) son el extracto etéreo y la fibra neutro detergente ($R^2 = 0,88 - 0,94$). Cuando la ecuación incluye la “digestibilidad de la materia orgánica *in vitro*”, los coeficientes de determinación mejoran sustancialmente hasta valores de $R^2 = 0,95$, para la dMO; $R^2 = 0,96$, para dEB; $R^2 = 0,97$, para la ED; y $R^2 = 0,97$, para la EM. Por tanto, la variabilidad de las variables independientes

(Xi) explican, en todos los casos, más del 95% de la variabilidad de la variable dependiente (Y). Además, las mejores ecuaciones (5, 10, 16 y 22 para la dMO, dEB, ED y EM, respectivamente) permiten estimar la digestibilidad (%) o el valor energético (Mcal/kg) de un subproducto concreto con coeficientes de variación inferiores al 5%.

B) En relación al **sistema de AL** utilizando pienso y agua:

6. Las diluciones donde la digestibilidad de las raciones era máxima, varió significativamente con la edad de los animales. Las diluciones más bajas (ratio 1,83:1; agua:pienso) son más apropiadas para los animales jóvenes y más altas (ratio 2,7:1) para los animales de final de engorde.

7. Aunque no alcanzó significación estadística ($P > 0,10$), posiblemente por disponer de un número insuficiente de animales, las diluciones que obtuvieron mayor ganancia diaria y menor índice de conversión fueron 1,38:1 y 1,30:1 para los animales jóvenes y 1,74:1 y 1,54:1 para los animales más adultos.

CAPÍTULO 10: Referencias bibliográficas

- Aguliera-Soto, J. I., R. G. Ramirez, C. F. Arechiga, H. Gutiérrez-Bañuelos, F. Mendez-Llorente, M. A. López-Carlos, J. A. Piña-Flores, H. Rodríguez-Frausto, and D. Rodríguez-Tenorio. 2009. Effect of fermentable liquid diets based on wet brewers grains on performance of growing pigs. *J. Appl. Anim. Res.* 36:271–274.
- Almeida, F. N., G. I. Petersen, and H. H. Stein. 2011. Digestibility of amino acids in corn, corn coproducts, and bakery meal fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 89:4109–4115.
- Amaefule, K. U., S. O. Okechukwu, S. N. Ukachukwu, F. C. Okoye, and O. C. Onwudike. 2006. Digestibility and nutrient utilization of pigs fed graded levels of brewers' dried grain based diets. *Livest. Res. Rural Dev.* 18.
- Anderson, P. V., B. J. Kerr, T. E. Weber, C. J. Ziemer, and G. C. Shurson. 2012. Determination and prediction of digestible and metabolizable energy from chemical analysis of corn coproducts fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242–1254.
- AOAC. 2007. *Official Methods of Analysis*. 18th ed. Assoc. Off. Anal. Chem. Gaithersburg, MD.
- Bach Knudsen, K. E., B. B. Jensen, and I. Hansen. 1993. Digestion of polysaccharides and other major components in the small and large intestine of pigs fed on diets consisting of oat fractions rich in beta-D-glucan. *Br. J. Nutr.* 70:537–556.
- Barber, J., P. H. Brooks, and J. L. Carpenter. 1991a. The effect of four levels of food on the water intake and water to food ratio of growing pigs. In: *Proceedings of the 101st meeting of the British Society of Animal Production*. Vol. 52. p. 602.
- Barber, J., P. H. Brooks, and J. L. Carpenter. 1991b. The effects of water to food ratio on the digestibility, digestible energy and nitrogen retention of a grower ration. In: *Proceedings of the 101st meeting of the British Society of Animal Production*. Vol. 52. p. 601.
- Barber, R. S., R. Braude, and K. G. Mitchell. 1963. Further studies on the water requirements of the growing pig. *Anim. Prod.* 5:277–282.
- Blaxter, K., 1989. *Energy metabolism in animals and man*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Boesen, H. T., T. K. Jensen, A. S. Schmidt, B. B. Jensen, S. M. Jensen, and K. Moller. 2004. The influence of diet on *Lawsonia intracellularis* colonization in pigs upon experimental challenge. *Vet. Microbiol.* 103:35–45.
- Boisen, S. 2007. In vitro analyses for predicting standardised ileal digestibility of protein and amino acids in actual batches of feedstuffs and diets for pigs. *Livest. Sci.* 109:182–185.
- Boisen, S., and B. O. Eggum. 1991. Critical evaluation of in vitro methods for estimating digestibility in simple-stomach animals. *Nutr. Res. Rev.* 4:141–62.

- Boisen, S., and J. A. Fernández. 1995. Prediction of the apparent ileal digestibility of protein and amino acids in feedstuffs and feed mixtures for pigs by in vitro analyses. *Anim. Feed Sci. Technol.* 51:29–43.
- Boisen, S., and J. A. Fernández. 1997. Prediction of the total tract digestibility of energy in feedstuffs and pig diets by in vitro analyses. *Anim. Feed Sci. Technol.* 68:277–286.
- Boucqué, C. H. V., and L. O. Fiems. 1988. II. 4. Vegetable by-products of agro-industrial origin. *Livest. Prod. Sci.* 19:97–135.
- Braun, K., and K. De Lange. 2004. Liquid swine feed ingredients: Nutritinal quality and main co-products used in swine liquid feeding in Ontario. In: Presented at the ANAC Eastern Nutrition Conference, May 11-12, 2004, Ottawa, Ontario.
- Brooks, P. H. 2003. Liquid feeding as a means to promote pig health. *London Swine Conf.*:83–103.
- Brooks, P. H. 2008. Fermented liquid feed for pigs. *CAB Rev. Perspect. Agric. Vet. Sci. Nutr. Nat. Resour.* Novemb. 2008:073.
- Brooks, P. H., and J. D. Beal. 2005. Liquid feeding of pigs: Implications for pig and human health. In: *Proceedings of the 2005 Manitoba Swine Seminar.*
- Brooks, P. H., and J. L. Carpenter. 1990. The water requirement of growing- finishing pigs: theoretical and practical considerations. In: *Recent Advances in Animal Nutrition* (eds. Haresign, W., Cole, D.J.A.). p. 115–136.
- Brooks, P. H., J. D. Beal, and S. Niven. 2001. Liquid feeding of pigs : potential for reducing environmental impact and for improving productivity and food safety. *Recent Adv. Anim. Nutr. Aust.* 13:49–64.
- Brooks, P. H., J. D. Beal, S. Niven, and V. Demecková. 2003. Liquid feeding of pigs. II. Potential for improving pig health and food safety. *Anim. Sci. Pap. Reports* 21:23–39.
- Camilleri, M. 2006. Integrated upper gastrointestinal response to food intake. *Gastroenterology* 131:640–58.
- Canibe, N. 2007. Alimentación de lechones: 1- Sistemas de alimentación y aditivos en piensos de iniciación. In: *XXIII Curso de Especialización FEDNA. Madrid.* p. 179–212.
- Canibe, N., and B. B. Jensen. 2003. Fermented and nonfermented liquid feed to growing pigs : Effect on aspects of gastrointestinal ecology and growth performance. *J Anim Sci* 81:2019–2031.
- Canibe, N., and B. B. Jensen. 2007. Fermented liquid feed and fermented grain to piglets- effect on gastrointestinal ecology and growth performance. *Livest. Sci.* 108:198–201.

- Canibe, N., and B. B. Jensen. 2012. Fermented liquid feed—Microbial and nutritional aspects and impact on enteric diseases in pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 173:17–40.
- Canibe, N., E. Virtanen, and B. B. Jensen. 2007a. Effect of acid addition to pig liquid feed on its microbial and nutritional characteristics. *Livest. Sci.* 108:202–205.
- Canibe, N., E. Virtanen, and B. B. Jensen. 2007b. Microbial and nutritional characteristics of pig liquid feed during fermentation. *Anim. Feed Sci. Technol.* 134:108–123.
- Canibe, N., H. Miettinen, and B. B. Jensen. 2008. Effect of adding *Lactobacillus plantarum* or a formic acid containing-product to fermented liquid feed on gastrointestinal ecology and growth performance of piglets. *Livest. Sci.* 114:251–262.
- Canibe, N., L. L. Mikkelsen, O. Højberg, and B. B. Jensen. 2003. Alimentos líquidos fermentados en postdestete: una alternativa a los antibióticos promotores del crecimiento. In: *Jornadas de alimentación líquida del ganado porcino*. IRTA - Centro Mas Bové, Constantí (Tarragona) p. 1–11.
- Carlson, D., and H. D. Poulsen. 2003. Phytate degradation in soaked and fermented liquid feed—effect of diet, time of soaking, heat treatment, phytase activity, pH and temperature. *Anim. Feed Sci. Technol.* 103:141–154.
- Chae, B. J. 2000. Impacts of Wet Feeding of Diets on Growth and Carcass Traits in Pigs. *J. Appl. Anim. Res.* 17:81–96.
- Chae, B. J., I. K. Han, J. H. Kim, C. J. Yang, S. J. Ohh, Y. C. Rhee, and Y. K. Chung. 1997. Effects of feed processing and feeding methods on growth and carcass traits for growing-finishing pigs. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 10:164–169.
- Chiou, P. W. S. 1999. Non-conventional concentrates in temperate Asian-Australasian countries: Review. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 12:460–466.
- Choct, M. A., E. A. D. B. Selby, D. J. Cadogan, and R. G. Campbell. 2004a. Effect of liquid to feed ratio , steeping time , and enzyme supplementation on the performance of weaner pigs. *Aust. J. Agric. Res.* 55:247–252.
- Choct, M. A., E. A. D. B. Selby, D. J. Cadogan, and R. G. Campdell. 2004b. Effects of particle size, processing, and dry or liquid feeding on performance of piglets. *Aust. J. Agric. Res.* 55:237–245.
- Chu, G. M., B. S. Yang, H. Y. Kim, J. H. Kim, J. H. Ha, C. H. Kim, S. D. Lee, and Y. M. Song. 2011. Effects of supplemental fermented agro by-products diet on the growth performances, blood characteristics and carcass traits in fattening Pigs. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 24:1464–1472.

- Columbus, D., C. L. Zhu, J. R. Pluske, and C. F. M. de Lange. 2010. Body weight gain and nutrient utilization in starter pigs that are liquid-fed high-moisture corn-based diets supplemented with phytase. *Can. J. Anim. Sci.* 90:45–55.
- Columbus, D., J. Zhu, D. Woods, E. J. Squire, E. Jeurond, and K. de Lange. 2006. On-farm experience with swine liquid feeding: research unit at Arkell swine - University of Guelph. In: London Swine Conference - Thinking globally, acting locally. p. 185 – 194.
- Cozannet, P., Y. Primot, C. Gady, J. P. Métayer, M. Lessire, F. Skiba, and J. Noblet. 2010. Energy value of wheat distillers grains with solubles for growing pigs and adult sows. *J. Anim. Sci.* 88:2382–2392.
- Crawshaw, R. 2001. *Co-Product Feeds: animal feeds from the food and drinks industries*, Nottingham University Press, Nottingham, UK.
- Crickenberger, R.G., and R. E. Carawan. 1996. Using food processing by-products for animal Feed. water quality and waste management. North Carolina Cooperative Extension Service. Publication Number: CD-37
- Cumby, T. R. 1986. Design requirements of liquid feeding systems for pigs: a review. *J. Agric. Eng. Res.* 34:153–172.
- Cumby, T. R. 1987. A review of slurry aeration 2. Mixing and foam control. *J. Agric. Eng. Res.* 36:157–174.
- Da Silva, C. A., R. N. Kronka, M. C. Thomaz, K. S. N, W. C. Soto, and L. E. de Carvalho. 2002. Rações úmidas e água de consumo e ração com edulcorante para leitões desmamados aos 21 dias e efeitos sobre o desempenho até os 90 Kg de peso vivo. *Ciência Rural* 32:681–686.
- Danielsen, V., and E.-M. Vestergaard. 2001. Dietary fibre for pregnant sows: effect on performance and behaviour. *Anim. Feed Sci. Technol.* 90:71–80.
- De Boer, F. 1985. Availability and utilization of by-products and wastes in EC-countries. In: *Agriculture: Feeding value of by-products and their use by beef cattle* (ed. Ch. V. Bouqué). Commission of the European Communities, Luxembourg.
- De Lange, C. F. M., and C. H. Zhu. 2012. Liquid feeding corn-based diets to growing pigs: practical considerations and use of co-products. In: *Feed Efficiency in Swine*. pp. In: J. F. Patience, editor. *Feed Efficiency in Swine*. First Edit. Wageningen Academic Pub. p. 63 – 80.
- De Lange, C. F. M., C. H. Zhu, S. Niven, D. Columbus, and D. Woods. 2006. Swine Liquid Feeding: Nutritional Considerations. *Proc. 27th West. Nutr. Conf. Dep. Anim. Sci. Univ. Manitoba, Winnipeg, MB, Canada.*:37–50.

- Demecková, V., D. Kelly, A. G. P. Coutts, P. H. Brooks, and A. Campbell. 2002. The effect of fermented liquid feeding on the faecal microbiology and colostrum quality of farrowing sows. *Int. J. Food Microbiol.* 79:85–97.
- Den Hartog, L. A., and S. R. Sijtsma. 2009. Influence of feed processing technology on pig performance. In: P. C. Gransworthy and J. Winseman, editors. *Recent Advances in Animal Nutrition*. Nottingham University Press. p. 227–244.
- Dung, N. N. X., L. H. Manh, and B. Ogle. 2005. Effects of fermented liquid feeds on the performance, digestibility, nitrogen retention and plasma urea nitrogen (PUN) of growing-finishing pigs. *Livest. Res. Rural Dev.* 17:<http://mekarn.org/proctu/xdun.htm>
- Dung, N. N. X., L. H. Manh, and P. Udén. 2002. Tropical fibre sources for pigs—digestibility, digesta retention and estimation of fibre digestibility in vitro. *Anim. Feed Sci. Technol.* 102:109–124.
- Edwards, S. A., C. B. Fairbairn, and A. L. Capper. 1986. Liquid potato feed for finishing pigs: Feeding value, inclusion rate and storage properties. *Anim. Feed Sci. Technol.* 15:129–139.
- EFSA. 2006. Opinion of the Scientific Panel on Biological Hazards on the request from the Commission related to the public health risks of feeding farmed animals with ready-to-use dairy products without further treatment. *EFSA J.* 340:1–58.
- English PR, Flower VR, Baxter S, Smith B (1988) *The growing and finishing pig: Improving efficiency*. Farming Press Books, UK.
- Etienne, M. 1987. Utilization of high fibre feeds and cereals by sows, a review. *Livest. Prod. Sci.* 16:229–242.
- Eurostat. 2015. <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=tag00018&plugin=1> (Accessed on August 2016)
- Fairbairn, S. L., J. F. Patience, H. L. Classen, and R. T. Zijlstra. 1999. The energy content of barley fed to growing pigs: Characterizing the nature of its variability and developing prediction equations for its estimation. *J. Anim. Sci.* 77:1502–1512.
- FEDNA. 2010. *Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. Tablas de composición y valor nutritivo de alimentos para la fabricación de piensos compuestos, 3ª edición*. Eds. C. De Blas, G.G. Mateos, P. García-Rebollar, Madrid, Spain.
- FEDNA. 2013. *Fundación Española Desarrollo Nutrición Animal. Normas FEDNA para la formulación de piensos. Necesidades nutricionales para Ganado porcino, 2nd edición*. Eds. C. De Blas, G.G. Mateos, P. García-Rebollar, Madrid, Spain.

- Forbes, T. J., and N. Walker. 1968. The utilization of wet feed by bacon pigs with special reference to pipe-line feeding. *J. Agric. Sci.* 71:145–151.
- Gadd, J. 2003. *Pig Production Problems: John Gadd's Guide to Their Solutions*. Nottingham University Press.
- Garnsworthy, P.C., Cole, D.J.A., 1990. The importance of intake in feed evaluation. In: J. Wiseman and D.J.A. Cole, *Feedstuff evaluation*, Butterworths, pp. 147-160.
- Gasa, J., and C. Castrillo. 1991. Criterios de utilización de subproductos agroindustriales en la alimentación de rumiantes. *Hojas Divulgativas*, Núm. 13/91 (In Spanish).
- Gasa, J., C. Castrillo, M. D. Baucells, and J. A. Guada. 1989. By-products from the canning industry as feedstuff for ruminants: Digestibility and its prediction from chemical composition and laboratory bioassays. *Anim. Feed Sci. Technol.* 25:67–77.
- Geary, T. M., P. H. Brooks, D. T. Morgan, A. Campbell, and P. J. Russell. 1996. Performance of weaner pigs fed ad libitum with liquid feed at different dry matter concentrations. *J Sci Food Agric* 72:17–24.
- Geary, T. M., P. H. Brooks, J. D. Beal, and A. Campbell. 1999. Effect on weaner pig performance and diet microbiology of feeding a liquid diet acidified to pH 4 with either lactic acid or through fermentation with *Pediococcus acidilactici*. *J. Sci. Food Agric.* 79:633–640.
- Goff, G. Le, J. Van Milgen, and J. Noblet. 2002. Influence of dietary fibre on digestive utilization and rate of passage in growing pigs, finishing pigs and adult sows. *Anim. Sci* 74:503–515.
- Guo, L., X. Piao, D. Li, and S. Li. 2004. The Apparent Digestibility of Corn By-products for Growing-finishing Pigs In vivo and In vitro. *ASIAN-AUSTRALASIAN J. Anim. Sci.* 17:379–385.
- Hadjiconstantouras, C. 2003. The effect of liquid feed on the performance and intestinal microflora of pigs grown commercially in cyprus.
- Hall, M. B., and P. J. Kononoff. 2011. Feed Ingredients: Feed Concentrates: Co-product Feeds. In: *Encyclopedia of Dairy Sciences*. Elsevier. p. 342–348.
- Han, Y. K., P. A. Thacker, and J. S. Yang. 2006. Effects of the duration of liquid feeding on performance and nutrient digestibility in weaned pigs. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 19:396–401.
- Harrison, M. D., M. R. M. Ballard, R. A. Barclay, M. E. Jackson, and H. L. Stilborn. 1991. A comparison of true digestibility for poultry and apparent ileal digestibility for swine. A classical in vitro method and NIR spectrophotometry for determining amino acid digestibility. In: *Digestive physiology in pigs. Proceedings of the 5th Symposium on*

- Digestive Physiology in Pigs, Wageningen (Doorweth), Netherlands. [eds. Verstegen, M. W. A., Huisman, J. den Hartzog, L. A.]. p. 254 – 259.
- Henry, Y., H. Vogt, and P. E. Zoiopoulos. 1988. III. 4. Pigs and poultry. *Livest. Prod. Sci.* 19:299–354.
- Hoffman, P. C., N. M. Esser, R. D. Shaver, W. K. Coblenz, M. P. Scott, A. L. Bodnar, R. J. Schmidt, and R. C. Charley. 2011. Influence of ensiling time and inoculation on alteration of the starch-protein matrix in high-moisture corn. *J. Dairy Sci.* 94:2465–74.
- Hong, T. T. T., T. T. Thuy, V. Passoth, and J. E. Lindberg. 2009. Gut ecology, feed digestion and performance in weaned piglets fed liquid diets. *Livest. Sci.* 125:232–237.
- Hurst, D., L. Clarke, and I. J. Lean. 2008. Effect of liquid feeding at different water-to-feed ratios on the growth performance of growing-finishing pigs. *Animal* 2:1297–302.
- Jagger, S., J. Wiseman, D. J. Cole, and J. Craigon. 1992. Evaluation of inert markers for the determination of ileal and faecal apparent digestibility values in the pig. *Br. J. Nutr.* 68:729–739.
- Jakobsen, G. V., B. B. Jensen, K. E. Bach Knudsen, and N. Canibe. 2015. Impact of fermentation and addition of non-starch polysaccharide-degrading enzymes on microbial population and on digestibility of dried distillers grains with solubles in pigs. *Livest. Sci.* 178:216–227.
- Jensen, B. B., and L. L. Mikkelsen. 1998. Feeding liquid diets to pigs. In: P. C. Gransworthy and J. Winseman, editors. *Recent Advances in Animal Nutrition*. Nottingham University Press. p. 107–126.
- Jha, R., J. K. Htoo, M. G. Young, E. Beltranena, and R. T. Zijlstra. 2010. Effects of co-products inclusion on growth performance and carcass characteristics of grower-finisher pigs. *J. Anim. Sci.* 88 (E-Suppl. 2):553–554.
- Jha, R., J. K. Htoo, M. G. Young, E. Beltranena, and R. T. Zijlstra. 2012. The effects of increasing feed inclusions of co-products and reducing dietary crude protein on pork omega-3 fatty acid content and feed cost. *West. Hog J.* 33:46–49.
- Jones, G. M., E. Donefer, and J. I. Elliot. 1970. Feeding value for dairy cattle and pigs of high moisture corn preserved with propionic acid. *Can. J. Anim. Sci.* 50:483–489.
- Just, A., H. Jorgensen, and J. A. Fernández. 1984. Prediction of metabolizable energy for pigs on the basis of crude nutrients in the feeds. *Livest. Prod. Sci.* 11:105–128.
- Kaps, M., and W. R. Lamberson. 2004. *Biostatistics for animal science*. CABI Publishing.

- Kavanagh, S., P. B. Lynch, F. O'Mara, and P. J. Caffrey. 2001. A comparison of total collection and marker technique for the measurement of apparent digestibility of diets for growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 89:49–58.
- Kerr, B. J., W. A. Dozier, III, and G. C. Shurson. 2013. Effects of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231 – 3243.
- Kim, J. H., K. N. Heo, J. Odle, K. Han, R. J. Harrell, and I. K. Han. 2001. Liquid diets accelerate the growth of early-weaned pigs and the effects are maintained to market weight. *J. Anim. Sci.* 79:427–434.
- Kong, C., and O. Adeola. 2014. Evaluation of amino acid and energy utilization in feedstuff for swine and poultry diets. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 27:917–925.
- Kornegay, E. T., and G. Graber. 1968. Effect of food intake and moisture content on weight gain, digestibility of diet constituents and N-retention of swine. *J. Anim. Sci.* 27:1591–1595.
- Kornegay, E. T., H. R. Thomas, D. L. Handlin, P. R. Noland, and K. Burbank. 1981. Wet versus Dry Diets for Weaned Pigs. *J. Anim. Sci.* 52:14–17.
- Lallès, J. P., P. Bosi, H. Smidt, and C. R. Stokes. 2007. Weaning — A challenge to gut physiologists. *Livest. Sci.* 108:82–93.
- Lammers, P. J., B. J. Kerr, T. E. Weber, W. a Dozier, M. T. Kidd, K. Bregendahl, and M. S. Honeyman. 2008. Digestible and metabolizable energy of crude glycerol for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 86:602–8.
- Landero, J. L., E. Beltranena, and R. T. Zijlstra. 2012. Feeding expeller-pressed canola meal to weaned pigs. *West. Hog J.*:44–47.
- Landero, J. L., L. F. Wang, E. Beltranena, and R. T. Zijlstra. 2014. Diet nutrient digestibility and growth performance of weaned pigs fed field pea. *Anim. Feed Sci. Technol.* 198:295–303.
- Lawlor, P. G., P. B. Lynch, G. E. Gardiner, P. J. Caffrey, and J. V O'Doherty. 2002. Effect of liquid feeding weaned pigs on growth performance to harvest. *J. Anim. Sci.* 80:1725–35.
- Le Goff, G., J. van Milgen, and J. Noblet. 2002. Influence of dietary fiber on digestive utilization and rate of passage in growing pigs, finishing pigs and adult sows. *Anim. Sci.* 74, 503–515
- Lindecrona, R. H., T. K. Jensen, B. B. Jensen, T. D. Leser, W. Jiufeng, and K. Møller. 2003. The influence of diet on the development of swine dysentery upon. *Anim. Sci.* 76:81–87.
- Llanes, N., and M. Gozzini. 2013. Alimentación líquida en ganado porcino. In: XXIX Curso de especialización FEDNA. Madrid. p. 149–170.

- Longland, A. C., A. G. Low, D. B. Quelch, and S. P. Bray. 1993. Adaptation to the digestion of non-starch polysaccharide in growing pigs fed on cereal or semi-purified basal diets. *Br. J. Nutr.* 70:557–566.
- Lyberg, K., T. Lundh, C. Pedersen, and J. E. Lindberg. 2006. Influence of soaking, fermentation and phytase supplementation on nutrient digestibility in pigs offered a grower diet based on wheat and barley. *Anim. Sci.* 82:853.
- Madrid, J., C. Villodre, L. Valera, J. Orengo, S. Martínez, M. J. López, M. D. Megías, and F. Hernández. 2013. Effect of crude glycerin on feed manufacturing, growth performance, plasma metabolites, and nutrient digestibility of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3788–3795.
- Madrid, J., M. D. Megías, and F. Hernández. 2002. In vitro determination of ruminal dry matter and cell wall degradation, and production of fermentation end-products of various by-products. *Anim. Rech.* 51, 189–199.
- Martínez-Teruel, A., J. Madrid, M. D. Megías, J.A. Gallego, A. Rouco, and F. Hernández. 1998. Uso de forrajes y subproductos en las explotaciones de vacuno de leche de la región de murcia (Using of forages and by-products in dairy cows farms of Murcia region). *Archivos de Zootecnia.* 44, 33-42.
- McDonald, P., R. A. Edwards, J. F.D. Greenhalgh, C. A. Morgan, L. A. Sinclair, and R. G. Wilkinson. 2011. *Animal Nutrition*. Ed. Prentice Hall. Edinburgh Gate, UK.
- Meat and Livestock Commission (MLC). 2004. *Finishing Pigs : Systems Research Production Trial 1*. Stotfold Pig Development Unit. Meat and Livestock Commission, Milton Keynes, UK.
- Meat and Livestock Commission (MLC). 2006. *Maximising returns from finishing pigs*. Stotfold Pig Development Unit. Meat and Livestock Commission, Milton Keynes, UK.
- Miquel, N., K. E. B. Knudsen, and H. Jorgensen. 2001. Impact of diets varying in dietary fibre characteristics on gastric emptying in pregnant sows. *Arch. Anim. Nutr.* 55:121–145.
- Missotten, J. A. M., J. Michiels, A. Oryn, S. De Smet, and N. A. Dierick. 2015. Fermented liquid feed for weaned piglets: impact of sedimentation in the feed slurry on performance and gut parameters. *Czech J. Anim. Sci.* 60:195–207.
- Missotten, J. A. M., J. Michiels, A. Oryn, S. De Smet, and N. Dierick. 2010. Fermented liquid feed for pigs. *Arch. Anim. Nutr.* 64:437–66.
- Moon, J. S., I. K. Kwon, and B. J. Chae. 2004. Effects of wet feeding of diets with or without food waste on growth performance and carcass characteristics in finishing pigs. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 17:504–510.

- Moreau, R., P. Quéméré, and J. C. Carlier. 1992. Utilisation de sous-produits agro-industriels dans l'alimentation du porc: 1-Pratiques et résultats technico-économiques dans le Nord de la France. *Journées le Reserche Porc*. 24:143–150.
- Mößeler, A. K., M. F. Wintermann, M. Beyerbach, and J. Kamphues. 2014. Effects of grinding intensity and pelleting of the diet – fed either dry or liquid – on intragastric milieu, gastric lesions and performance of swine. *Anim. Feed Sci. Technol.* 194:113–120.
- Mroz, Z., A. W. Jongbloed, N. P. Lenis, and K. Vreman. 1995. Water in pig nutrition: physiology, allowances and environmental implications. *Nutr. Res. Rev.* 8:137–64.
- Mussatto, S. I., G. Dragone, and I. C. Roberto. 2006. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. *J. Cereal Sci.* 43:1–14.
- National Research Council (NRC). 2012. Nutrient requirements of swine. 11th ed. National Academy Press, Washington, DC.
- Niba, A. T., J. D. Beal, A. C. Kudi, and P. H. Brooks. 2009. Potential of bacterial fermentation as a biosafe method of improving feeds for pigs and poultry. *African J. Biotechnol.* 8:1758–1767.
- Nitrayová, S., P. Patráš, M. Brestenský, J. Zelenka, J. Brož, and J. Heger. 2009. Effect of microbial phytase and diet fermentation on leal and total tract digestibility of nutrients and energy in growing pigs. *Czech J. Anim. Sci.* 54:163–174.
- Niven, S. J., C. Zhu, D. Columbus, J. R. Pluske, and C. F. M. de Lange. 2007. Impact of controlled fermentation and steeping of high moisture corn on its nutritional value for pigs. *Livest. Sci.* 109:166–169.
- Niven, S. J., J. D. Beal, and P. H. Brooks. 2006. The effect of controlled fermentation on the fate of synthetic lysine in liquid diets for pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 129:304–315.
- Noblet, J., and J. M. Perez. 1993. Prediction of Digestibility of Nutrients and Energy Values of Pig Diets from Chemical Analysis. *J. Anim. Sci.* 71:3389–3398.
- Noblet, J., and Y. Jaguelin-Peyraud. 2007. Prediction of digestibility of organic matter and energy in the growing pig from an in vitro method. *Anim. Feed Sci. Technol.* 134:211–222.
- Noblet, J., H. Fortune, X. S. Shi, and S. Dubois. 1994. Prediction of net energy value of feeds for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 72:344–354.
- Observatori del Porcí, 2014. Informe anual del sector porcí. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació. Generalitat de Catalunya. Disponible en http://agricultura.gencat.cat/web/.content/de_departament/de02_estadistiques_observ

atoris/08_observatoris_sectorials/04_observatori_porci/informes_anuals/fitxers_estatics/CAT_Informe-sector-porci-2014_GGP_UdL_2.11.15.pdf (Accedido en Agosto 2016).

- Olstorpe, M., K. Lyberg, J. E. Lindberg, J. Schnürer, and V. Passoth. 2008. Population diversity of yeasts and lactic acid bacteria in pig feed fermented with whey, wet wheat distillers' grains, or water at different temperatures. *Appl. Environ. Microbiol.* 74:1696–703.
- Orskov, E. R. 1977. Nutritional principles and evaluation of by-products, waste products and new feeds for ruminants. *Livest. Prod. Sci.* 4:165–175.
- Park, C. S., A. R. Son, and B. G. Kim. 2015. Prediction of gross energy and digestible energy in copra meal , palm kernel meal , and cassava root fed to pigs 1. *J. Anim. Sci.* 90:221–223.
- Partridge, G. G., J. Fisher, H. Gregory, and S. G. Prior. 1992. Automated wet feeding of weaner pigs versus conventional dry diet feeding effects on growth rate and food consumption. In: *Proceedings of the 104th meeting of the Animal Production.* p. 484.
- Patience, J. F., G. L. Allee, F. Ji, R. B. Hinson, D. Y. Kil, H. H. Stein, L. L. Stewart, J. E. Pettigrew, and A. D. Beaulieu. 2009. The importance of advancing our understanding and application of energy systems. *J. Anim. Sci.* 87 (E-Supp:Abstract 192).
- Patterson, D. C. 1989. A comparison of various feeding systems for finishing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 26:251–260.
- Pedersen, A. Ø. 2001. Fermented liquid feed for weaners. The National Committee for Pig Production. Report n. 510; 1-24.
- Pedersen, A. Ø., H. Maribo, B. B. Jensen, I. D. Hansen, and M. Dall. 2002. Fermented grain in liquid feed for heavy pigs. The National Committee for Pig Production. Report n. 547; 1-25.
- Pedersen, C., and H. H. Stein. 2010. Effects of liquid and fermented liquid feeding on energy, dry matter, protein and phosphorus digestibility by growing pigs. *Livest. Sci.* 134:59–61.
- Pedersen, C., S. Roos, H. Jonsson, and J. E. Lindberg. 2005. Performance, feeding behaviour and microbial diversity in weaned piglets fed liquid diets based on water or wet wheat-distillers grain Performance , feeding. *Arch. Anim. Nutr. Nutr.* 59:165–179.
- Perondi, D., I. Moreira, P. C. Pozza, P. L. D. O. Carvalho, T. J. Pasquetti, and L. M. D. Huepa. 2014. Passion fruit seed meal at growing and finishing pig (30-90 kg) feeding. *Ciência e Agrotecnologia* 38:390–400.
- Plumed-Ferrer, C., and A. von Wright. 2009. Fermented pig liquid feed: nutritional, safety and regulatory aspects. *J. Appl. Microbiol.* 106:351–68.

- Plumed-Ferrer, C., and A. von Wright. 2011. Antimicrobial activity of weak acids in liquid feed fermentations, and its effects on yeasts and lactic acid bacteria. *J. Sci. Food Agric.* 91:1032–40.
- Plumed-Ferrer, C., I. Kivelä, P. Hyvönen, and A. Wright. 2005. Survival, growth and persistence under farm conditions of a *Lactobacillus plantarum* strain inoculated into liquid pig feed. *J. Appl. Microbiol.* 99:851–858.
- Pond W. G., and J. H. Maner. 1984. *Swine Production and Nutrition*. AVI Publishing Co., Westport, CT.
- Prescott, L. M., J. P. Harley, and D. A. Klein. 1996. *Microbiology*. Third Ed. W. C. Brown Pub. Dubuque.
- Regmi, P. R., N. S. Ferguson, and R. T. Zijlstra. 2009. In vitro digestibility techniques to predict apparent total tract energy digestibility of wheat in grower pigs. *J. Anim. Sci.* 87:3620–3629.
- Rojas, O. J., Y. Liu, and H. H. Stein. 2014. Phosphorus digestibility and concentration of digestible and metabolizable energy in corn , corn coproducts , and bakery meal fed to growing pigs 1. *Jounal Anim. Sci.*:5326–5335.
- Royer, E., V. Ernandorena, and F. Escribano. 2007. Effects of the water-feed ratio and of a rheological sepiolite on some physical parameters of liquid feed and performances of pigs. 58th Annu. Meet. Eur. Assoc. Anim. Prod.:1–9.
- Russell, P. J., T. M. Geary, P. H. Brooks, and A. Campbell. 1996. Performance , Water Use and Effluent Output of Weaner Pigs Fed ad libitum with Either Dry Pellets or Liquid Feed and the Role of Microbial Activity in the Liquid Feed. *J. Sci. Food Agric.*:8–16.
- Schneider, B. H., and W. P. Flatt. 1975. *The Evaluation of Feed through Digestibility Experiments*. University of Georgia Press, Athens.
- Scholten, J., and A. Rijnen. 1998. The use of liquid by-products review. Proefverslag P1.210. Prakt. Varkenshouderij, Rosmalen, Netherlands (in Dutch with English Summ.
- Scholten, R. H. J. 2001. Fermentation of liquid diets for pigs. PhD Thesis, Wageningen Institute of Animal Science, Department of Animal Nutrition, Wageningen University, The Netherlands
- Scholten, R. H. J., A. I. J. Hoofs, and M. P. Beurskens–Voermans. 1997. Bijproductenrantsoen voor vleesvarkens: invloed van voerniveau en aminozuregehalte (in Dutch). In: Proefverslag P1.188. Praktijkonderzoek Varkenshouderij, Rosmalen, pp. 1–12.

- Scholten, R. H. J., and A. Rijnen. 1998. The use of liquid by-products review. Proefverslag P1.210. Prakt. Varkenshouderij, Rosmalen, Netherlands (In Dutch with English Summ).
- Scholten, R. H. J., C. M. C. van der Peet-Schwering, M. W. A. Verstegen, L. a. den Hartog, J. W. Schrama, and P. C. Vesseur. 1999. Fermented co-products and fermented compound diets for pigs: a review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 82:1–19.
- Scholten, R. H., M. M. Rijnen, J. W. Schrama, H. Boer, P. C. Vesseur, L. a Den Hartog, C. M. van der Peet-Schwering, and M. W. Verstegen. 2001. Fermentation of liquid coproducts and liquid compound diets: Part 1. Effects on chemical composition during a 6-day storage period. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. (Berl)*. 85:111–23.
- Scholten, R., C. M. van der Peet-Schwering, L. den Hartog, J. Schrama, and M. Verstegen. 2000. Uso de dietas líquidas y co-productos líquidos para porcino. In: XVI Curso de Especialización FEDNA “Avances en Nutrición y Alimentación Animal”, Barcelona. p. 143–154.
- Serena, A., and K. E. Bach Knudsen. 2007. Chemical and physicochemical characterisation of co-products from the vegetable food and agro industries. *Anim. Feed Sci. Technol.* 139:109–124.
- Short, F. J. J., P. Gorton, J. Wiseman, and K. N. N. Boorman. 1996. Determination of titanium dioxide added as an inert marker in chicken digestibility studies. *Anim. Feed Sci. Technol.* 59:215–221.
- Shurson, J. 2008. What we know about feeding liquid by-products to pig. In: Big Dutchman 5th Internatl. Agent’s Mtg. Bremen, Germany.
- Shurson, J., M. Spiels, M. Whitney, and J. Knott. 2004. Nutritional and value added benefits of feeding maize DDGS and other dry- mill co-products to swine. In: Pre-conference Symposium. 40th Eastern Nutrition Conference. Animal Nutrition Association of Canada, Ottawa, ON K1N 7G2 Canada.
- Smith, B., A. Hassen, M. Hinds, D. Rice, D. Jones, T. Sauber, C. liams, D. Sevenich, R. Allen, F. Owens, J. McNaughton, and C. Parsons. 2015. Predicting the digestible energy of corn determined with growing swine from nutrient composition and cross-species measurements. *J. Anim. Sci.* 93:1025–1038.
- Smits, C., and R. Sijtsma. 2007. A decision tree for co-product utilization. *Adv. Pork Prod.* 18:213–221.
- Solà-Oriol, D., D. Torrallardona, and J. Gasa. 2010. Role of dietary fibre source and meal size on the ileal transit of digesta in growing pigs. *Livest. Sci.* 133:67–69.

- Spanghero, M., and L. A. Volpelli. 1999. A comparison of the predictions of digestible energy content of compound feeds for pigs by chemical or in vitro analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 81:151–159.
- Stein, H., and K. De Lange. 2007. Alternative feed ingredients for pigs. 7th Annu. London Swine Conf. 3-4:103–119.
- Stickney, K. 2009. Lowering feed costs. London Swine Conf. April:57–74.
- Torrallardona, D. 2003. Reducción del impacto medioambiental asociado a la porcicultura mediante la alimentación líquida. En: Jornadas de alimentación líquida del ganado Porc. IRTA - Centro Mas Bové, Constantí (Tarragona)
- Uchewa, E. N., and P. E. Nwakpu. 2013. Effect of Fermented Liquid Feed on Boar Taint and Carcass Quality of Pigs. *J. Biol. Agric. Healthc.* 3:75–80.
- Valizadeh, R., and S. Sobhanirad. 2009. The potential of agro-industrial by-products as feed sources for livestock in Khorasan Razavi Province of Iran. *J. Anim. Vet. Adv.* 8:2375–2379.
- Van der Meer, J. M., and J. M. Perez. 1992. In-vitro evaluation of european diets for pigs - prediction of the organic-matter digestibility by an enzymatic method or by chemical-analysis. *J. Sci. Food Agric.* 59:359–363.
- Van der Wolf, P. J., W. B. Wolbers, A. R. W. Elbers, H. M. J. F. van der Heijden, J. M. C. C. Koppen, W. A. Hunneman, F. W. van Schie, and M. J. M. Tielen. 2001. Herd level husbandry factors associated with the serological Salmonella prevalence in finishing pig herds in The Netherlands. *Vet. Microbiol.* 78:205–19.
- Van Es, A. J. H. 1980. Evaluation of the energy value of feeds: overall appreciation. In: *Standardization of analytic methods for feeds*. Eds. W. J. Pigden, C. C. Blach, and M. Graham. IDRC Publication, Ottawa CA, pp. 49-60.
- Van Leeuwen, P., M. W. A. Verstegen, H. J. van Lonkhuijsen, and G. J. M. van Kempen. 1991. Near infrared reflectance (NIR) spectroscopy to estimate the apparent ileal digestibility of protein in feedstuffs. In: *Digestive Physiology in Pigs*. Eds. M. W. A. Verstegen, J. Huisman, and L. A. den Hartog. Wageningen, Netherlands. pp. 260-265
- Van Lunen, T. A., D. M. Anderson, A. M. St. Laurent, J. W. G. Nicholson, and P. R. Dean. 1989. The feeding value of potato steam peel for growing-finishing pigs. *Can. J. Anim. Sci.* 69:225–234.
- Van Soest, P. J., J. B. Robertson, and B. A. Lewis. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* 74, 3583–3597.

- Van Winsen, R. L., B. P. Urlings, L. J. A. Lipman, J. M. A. Snijders, D. Keuzenkamp, J. H. M. Verheijden, and F. Van Knapen. 2001. Effect of fermented feed on the microbial population of the gastrointestinal tracts of Pigs. *Appl. Environ. Microbiol.* 67:3071 – 3076.
- Van Winsen, R. L., L. J. A. Lipman, S. Biesterveld, B. A. P. Urlings, J. M. A. Snijders, and F. Van Knapen. 2000. Mechanism of Salmonella reduction in fermented pig feed. *J. Sci. Food Agric.* 81:342–346.
- Wang, J. F., Y. H. Zhu, D. F. Li, Z. Wang, and B. B. Jensen. 2004. In vitro fermentation of various fiber and starch sources by pig fecal inocula. *J. Anim. Sci.* 82:2615–2622.
- Weda. <http://www.weda.de/es/liquid-feeding-es> (Accessed on August 2016)
- Westendorf, M. L., and J. E. Wohlt. 2002. Brewing by-products: their use as animal feeds. *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract.* 18:233–52.
- Wilfart, A., L. Montagne, P. H. Simmins, J. Van Milgen, and J. Noblet. 2007. Sites of nutrient digestion in growing pigs: Effect of dietary fiber. *J. Anim. Sci.* 85:976–983.
- Woyengo, T. A., E. Beltranena, and R. T. Zijlstra. 2014. Controlling feed cost by including alternative ingredients into pig diets: A review. *J. Anim. Sci.*:1293–1305.
- Yang, T. S., B. Howard, and W. V. Macfarlane. 1981. Effects of food on drinking behaviour of growing pigs. *Appl. Anim. Ethol.* 7:259–270.
- Zanfi, C., and M. Spanghero. 2012. Digestibility of diets containing whole ear corn silage for heavy pigs. *Livest. Sci.* 145:287–291. Available from:
- Zijlstra, R. T., and E. Beltranena. 2013. Swine convert co-products from food and biofuel industries into animal protein for food. *Anim. Front.* 3:48–53.
- Zijlstra, R. T., K. Menjivar, E. Lawrence, and E. Beltranena. 2009. The effect of feeding crude glycerol on growth performance and nutrient digestibility in weaned pigs. *Can. J. Anim. Sci.* 89:85–89.
- Zijlstra, R. T., M. Swift, L. Wang, P. Regmi, J. H. Helm, and R. Jha. 2010. Rapid methods for prediction of energy values of feedstuffs for pigs. In: *Proceedings of the 31st Western Nutrition Conference – Challenging Conventional Nutrition Dogma* Saskatoon, SK. p. 8.