



**FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE**

TRABAJO FIN DE GRADO
HARINAS EXTRUIDAS EN LA INDUSTRIA
ALIMENTARIA

Autor: Isabel Barallat García

Tutor: Prof. Dra. Patricia Morales Gómez.

Convocatoria: Junio 2017

INDICE

Resumen

1. Introducción.....	3
2. Objetivos.....	5
3. Metodología.....	5
4. Resultados y discusión.....	6
4.1. Propiedades organolépticas y morfológicas de los alimentos extruidos.....	7
4.2. Efectos de la extrusión en la composición nutricional de las harinas.....	9
4.3. Efectos de la extrusión sobre los compuestos bioactivos de las harinas.....	13
4.4. Efecto de la extrusión sobre los compuestos indeseados.....	14
4. Conclusiones.....	17
5. Bibliografía.....	18

RESUMEN

Los alimentos extruidos han experimentado un auge estos últimos años consumiéndose como *snacks*. El estilo de vida actual ha favorecido la comercialización y consumo de este tipo de alimentos, especialmente en la población infantil, etapa crucial en el crecimiento y desarrollo del individuo. La extrusión es un proceso tecnológico que modifica la composición nutricional del alimento y sus características organolépticas. Tradicionalmente se ha aplicado este proceso a las harinas de cereales para la elaboración de cereales de desayuno, barritas de cereales, *snacks*, etc. Sin embargo, en los últimos años se ha comenzado a enriquecer dichas formulaciones con otros ingredientes como son las legumbres y verduras, contrarrestando las posibles pérdidas de nutrientes debidas al proceso de extrusión, incrementando se este modo el valor nutricional del producto final. Mediante la extrusión se obtienen nuevos sabores y texturas, en definitiva nuevas características organolépticas que se adaptan en gran medida a los gustos del consumidor. Además, esta tecnología permite disminuir el riesgo de exposición de algunos compuestos tóxicos e indeseables como son las micotoxinas y antinutrientes.

PALABRAS CLAVE: Extrusión; cereales; legumbres; nutrientes; compuestos bioactivos; micotoxinas.

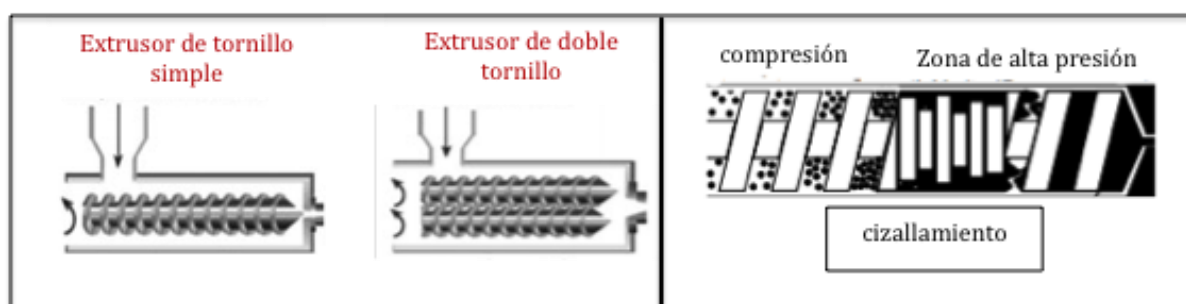
1. INTRODUCCIÓN

Desde hace años se ha ido estudiando cómo afecta el procesado de los alimentos a los distintos nutrientes y su implicación en la salud; en términos generales, el procesado de los alimentos tiende a modificar la composición y la disponibilidad de los nutrientes en los alimentos (van der Poel., 1990; Della Valle, Quillien y Gueguen, 1994). Dentro de los métodos de procesado cabe destacar el proceso de extrusión, en el cual se emplean altas presiones y temperaturas, durante cortos periodos de tiempo, de forma que se obtienen alimentos, como *snacks*, cereales del desayuno, etc., con texturas y/o sabores distintos al que tenían inicialmente (Morales et al., 2015a).

El primer alimento tipo *snack* fue fabricado a partir de granos de maíz mediante una extrusora de tornillo sencillo, elaborados por la empresa “The Adams Company” en la década de 1940. Se continuaron fabricando este tipo de alimentos durante muchos años, a pesar de que todavía no se conocía a fondo la ciencia del proceso de extrusión (Guy, 2001).

Desde el punto de vista tecnológico, podemos definir extrusión como “el proceso que consiste en dar forma a un producto, forzándolo a través de una abertura con diseño específico”. Se trata de un proceso continuo que involucra el trabajo y la compresión para formar una masa semisólida, que abarca una serie de operaciones unitarias que se combinan entre sí: mezclado, amasado, cizallamiento, calentamiento, enfriamiento, conformación, texturización y deshidratación de alimentos (Guy, 2003). En la figura 1 se muestra el formato de un extrusor y diagrama de desarrollo del proceso de extrusión.

Figura 1: Extrusores de tornillo simple y de doble tornillo (Patil, Tiwari y Repka, 2016) y diagrama del desarrollo de las materias primas en el interior del mismo (Guy, 2003).



Inicialmente, la extrusión de los alimentos llevada a cabo por extrusores estaba limitada a la obtención de macarrones o pellets de cereales. Sin embargo hoy en día es considerada un biorreactor que, empleando altas temperaturas y presiones en cortos periodos de tiempo, transforma las materias primas en productos alimenticios intermedios o en nuevos productos alimenticios (Alam et al., 2015).

Por lo general, estos extrusores son utilizados en la industria alimentaria para el procesamiento de alimentos. También pueden utilizarse en otras industrias, como la farmacéutica, química, metalúrgica, etc.

Las condiciones del proceso de extrusión se establecen en función del tipo de extrusor, de la matriz alimentaria a extruir y del producto final que se quiera obtener. Existen diferentes tipos de extrusores de los que destacan el extrusor de tornillo simple y de doble tornillo. Éste último se emplea cuando necesitamos transformar varias materias primas en un producto final, ya que actúa de forma más rápida y tiene un diseño flexible para distintos tipos de materiales, empleándose en aquellos productos que tienen un contenido lipídico de entre 18 – 22%. Mientras que en los extrusores de tornillo simple, la fracción grasa no puede superar el 12 – 17%, debido a que las grasas disminuyen el cizallamiento del extrusor impidiendo que la energía se transforme en calor para el procesamiento del alimento (Castells et al., 2005).

2. OBJETIVOS

Debido al avance de la tecnología y a la aparición de nuevas tendencias en la alimentación, el consumo de alimentos extruidos han adquirido mayor relevancia como una forma alternativa al consumo de alimentos tradicionales, como cereales y legumbres. En el presente trabajo se plantea el siguiente **objetivo general**:

“Conocer el efecto de la extrusión sobre las propiedades organolépticas y composición química de los alimentos, concretamente en las harinas de cereales y legumbres, y su aplicación en la industria alimentaria”.

Para dar cumplimiento a este objetivo se establecieron los siguientes **objetivos específicos**:

- Conocer las aplicaciones de las harinas extruidas en la industria alimentaria
- Conocer la influencia del proceso de extrusión en las propiedades organolépticas del alimento
- Conocer las modificaciones químicas (nutricionales, compuestos bioactivos) producidas una vez llevada a cabo la extrusión
- Conocer la influencia del proceso de extrusión en algunos compuestos indeseables (micotoxinas y antinutrientes)

3. METODOLOGÍA

Para la realización del presente trabajo se han realizado búsquedas bibliográficas, consultándose libros y tesis doctorales de la Biblioteca de la Facultad de Farmacia y Veterinaria de la Universidad Complutense de Madrid, así como las bases de datos de fuentes científicas. Las bases de datos utilizadas han sido principalmente PubMed – NCBI (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>), Bucea (Biblioteca Complutense; <http://biblioteca.ucm.es>), Research Gate (<https://www.researchgate.net>), Taylor & Francis Online (<http://www.tandfonline.com>) y Science Direct (<http://www.sciencedirect.com>). Para centrar la búsqueda en el tema del trabajo en cuestión, se emplearon "palabras clave" relacionadas con el tema de estudio, como son: “extrusion process”, “food extrusion”, “flour extrusion”, “mycotoxins”, entre otros. Una vez consultada toda la bibliografía relacionada con el tema, se procedió a la organización del mismo en función de su contenido, con la finalidad de satisfacer los objetivos establecidos y planteados en este estudio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tecnología de extrusión de alimentos tiene un importante papel en la producción de *snacks*, aperitivos, cereales de desayuno, alimentos destinados para la nutrición infantil (como la papilla de arroz), piensos de animales e incluso en dulces elaborados a partir de harinas extruídas de cereales.

Los alimentos tipo *snacks* han adquirido una gran importancia dentro del colectivo infantil. Tienen como base los granos de cereal (trigo, maíz, cebada, etc.), sin embargo, son alimentos de bajo valor biológico por su escaso contenido proteico, y por ello para aumentar el valor nutricional de los mismos es frecuente la incorporación de verduras, frutas e incluso legumbres en la formulación del alimento (Ozer et al., 2006). Otro problema de este tipo de alimentos es la posible contaminación de los cereales por mohos durante su cultivo y/o almacenamiento, de forma que pueden dar lugar a aparición de micotoxinas en el alimento. Sin embargo, numerosos estudios han relacionado el descenso de los niveles de micotoxinas con el proceso de extrusión; siendo esta una ventaja más del proceso de extrusión frente a otros métodos tradicionales de procesado de alimentos.

Durante la extrusión, los procesos térmicos y el cizallamiento afectan a las materias primas alimentarias provocando modificaciones de todo tipo: estructurales, químicas, transformaciones nutricionales (como la gelatinización del almidón, la desnaturalización proteica, oxidación lipídica, degradación de vitaminas y antinutrientes), así como el incremento de la biodisponibilidad de minerales y de la fibra dietética soluble. La extrusión puede también inducir cambios organolépticos en el alimento, teniendo especial importancia en la aparición de nuevas texturas y sabores en el alimento (Alam et al., 2015).

4.1. PROPIEDADES ORGANOLÉPTICAS Y MORFOLÓGICAS DE LOS ALIMENTOS EXTRUIDOS

Características organolépticas

La humedad tiene un importante papel en la **textura** de los *snacks*, ya que afecta directamente a su comportamiento reológico provocando que estos *snacks* sean más o menos crujientes, lo cual resulta un factor determinante en la aceptabilidad del consumidor.

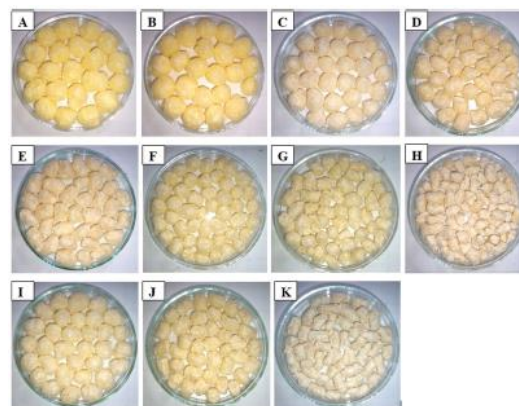
En un estudio publicado en el año 2007 realizado por Mazumder, Roopa y Bhattacharya, se determinó cómo variaba la textura de los snacks en función de su contenido acuoso. Gracias a este estudio, se pudo comprobar que los snacks resultaban menos crujientes cuando la actividad de agua (A_w) en el alimento era superior a 0,5. Por tanto, en la producción de un alimento extruido es necesario tener en cuenta la actividad de agua (A_w) para que ésta no supere los niveles máximos que comprometen a la aceptabilidad del producto.

Por otro lado, la humedad también afecta a la estabilidad de los nutrientes durante el proceso de extrusión, como a la lisina. Según Cheftel (1986), se debería trabajar bajo condiciones de la extrusión determinadas (temperaturas de 180 °C con un contenido de humedad no superior al 15%) para evitar la pérdida de nutrientes debido principalmente a la reacción de Maillard (Singh, Gamlath y Wakeling, 2007).

Otros factores que influyen en la textura del producto extruido son el contenido proteico y de fibra de la matriz alimentaria, de modo que por ejemplo la suplementación de las harinas de cereal con legumbres, como la soja o el garbanzo, incrementan el contenido proteico y de fibra, los cuales ejercen un papel importante en las propiedades relacionadas con la textura como la dureza, cohesividad, masticabilidad, elasticidad y resistencia (Shah et al., 2016).

En un estudio reciente se determinó el efecto de la adición de legumbres sobre las características organolépticas, mediante la evaluación sensorial del color, sabor, textura, el crujiente y en general, la aceptabilidad que tenía en la muestra de población objeto de estudio. Se añadieron diferentes porcentajes de granos de soja (*Glycine max*) y de garbanzo (*Cicer arietinum*) a la harina de maíz base (*Zea mays*) (Shah et al., 2016).

Figura 2: Imagen de los *snacks* con base de maíz extruidos (Shah et al., 2016)



En cuanto al color, la puntuación más alta la obtuvo la formulación con menor contenido de soja (20%, muestra C), de garbanzo (20%, muestra F) y soja-garbanzo (10-10%, muestra D). Mientras que las muestras con mejores resultados de textura (crujiente) fueron la mezcla con menor proporción de soja y garbanzo, por lo que cuanto mayor es la suplementación en leguminosas, menor es el crujiente del alimento extruido.

Morfología

En un estudio realizado por Becker et al. (2014), se pudo observar cómo la morfología varía tras la extrusión de la harina de arroz (figuras 3 y 4). En la figura 3 (harina sin extruir), la estructura de las partículas muestra su agrupación en algunas zonas, mientras que en otras áreas presentan superficie lisa. La figura 4 (harina extruida) muestra una superficie irregular y compacta, con algunos orificios debido a que durante el proceso de extrusión, las burbujas de aire quedan retenidas al producirse la expansión de los materiales con almidón durante la descompresión del producto extruido (Becker et al., 2014).

Figura 3: Imagen de la harina de arroz sin extruir obtenida por microscopía electrónica a 2000X aumentos(Becker et al., 2014)

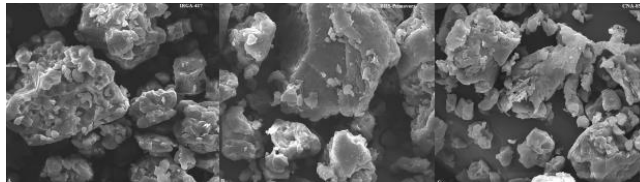
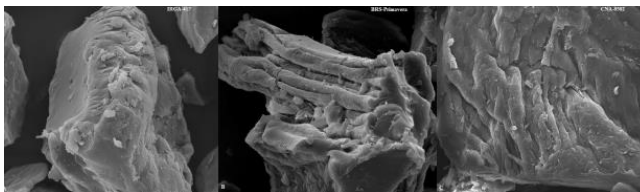


Figura 4: Imagen de la harina de arroz extruida obtenida por microscopía electrónica a 2000X aumentos (Becker et al., 2014)



4.2. INFLUENCIA DE LA EXTRUSION EN LA COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DE LAS HARINAS

Efecto sobre los hidratos de carbono

El control de los hidratos de carbono durante la extrusión es un factor crítico para la calidad nutricional y sensorial del producto final, como la textura y sensación de boca. Esta fracción en los cereales y la mayoría de las legumbres consiste en más del 50%, formada por almidón y otros polisacáridos, monosacáridos y oligosacáridos. Durante la extrusión los **azúcares solubles** experimentan una reducción significativa de su contenido, Berrios et al. (2010) publicaron una disminución del 17% en el contenido total de carbohidratos (TAC) en harinas de extrudidas de garbanzo. Este efecto puede deberse a que el almidón y otros polisacáridos se descomponen en componentes de menor peso molecular, como es el caso de la sacarosa que se escinde en glucosa y fructosa, azúcares reductores que son más susceptibles a la reacción de Maillard.

Por otro lado, la extrusión podría aumentar el contenido de azúcar soluble, probablemente debido a una modificación de la estructura mecánica, aumentando la superficie específica y mejorando así la disponibilidad de estos compuestos. Morales et al. (2015b) publicaron un ligero aumento de sacarosa, maltosa y algunos oligosacáridos (considerados compuestos bioactivos), como son la estaquiosa y rafinosa, en harinas de lenteja extrudidas. En general, el proceso de extrusión da lugar a una disminución de los oligosacáridos en el producto final (40 a un 60%) debido a la excisión molecular durante el proceso (Borejszo & Khan, 1992; Morales et al., 2015b).

El arroz, el trigo y el maíz son las principales fuentes de **almidón** en alimentos extruidos comercializados. Temperaturas y porcentajes de humedad bajos durante el proceso de extrusión (110 – 140°C y 19%, respectivamente) van a favorecer el proceso de gelatinización (Singh et al., 2007) y mejorar la digestibilidad del almidón, ya que su estructura se rompe, aumentando el contenido de azúcares solubles (Wang y Klopfenstein, 1993). Por ejemplo, Politz, Timpa y Wasserman publicaron una reducción significativa del peso molecular del almidón en harina de trigo tras el proceso de extrusión a 160°C, de forma similar a los resultados que obtuvieron Alonso, Aguirre y Marzo (2000) en guisantes extruidos en comparación con guisantes crudos.

En términos generales, el proceso de extrusión no afecta a la **fibra dietética total** (TDF) en cereales y legumbres (Singh et al., 2007). Sin embargo, se ha establecido que este efecto está altamente condicionado a la matriz alimentaria. Por ejemplo, estudios realizados por Alonso et al. (2001) indicaron cambios insignificantes en el contenido de fibra dietética total (TDF) en harina de trigo extruida (161 – 180 °C) y harina de judías (150 – 155°C), pero Frías et al. (2011) publicaron una disminución de 7 a 16% en la harina de guisante (*Pisumsativum*) extruidas a 129 – 142 °C. En el caso de la fibra soluble, se han observado ligeros aumentos de esta fracción tras el proceso de extrusión, probablemente debido a la degradación parcial de la fracción insoluble (Berrios et al., 2010; Morales et al., 2015a; Ralet, Della Valle y Thibault, 1993).

Efecto sobre las proteínas

El efecto de extrusión en la fracción proteica ha sido ampliamente estudiada durante las últimas décadas, sobre todo existen estudios que se centran en la evaluación de la digestibilidad *in vitro* y del contenido de lisina después del procesado.

En términos generales, la digestibilidad de proteínas aumenta tras el proceso de extrusión debido a que él se favorece la desnaturalización de las proteínas haciéndolas más accesibles a la acción de las proteasas (Della Valle et al., 1994; Alam et al., 2016). El valor nutricional de las proteínas depende de la disponibilidad, cantidad y disponibilidad de los aminoácidos esenciales. La calidad proteica depende sobre todo de la digestibilidad según la FAO (2011). Los valores de digestibilidad proteica de los productos extruídos son superiores a los que presentan los productos sin extruir. La posible causa se le atribuye a la desnaturalización proteica y la inactivación de factores antinutricionales que afectan a la digestión, como son los inhibidores de tripsina y quimiotripsina (Morales et al., 2015a).

Anuonye, Jigam y Ndaako (2012) estudiaron la influencia del proceso de extrusión en el contenido de aminoácidos esenciales en garbanzos crudos y extruidos, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 1: Perfil aminoacídico del garbanzo crudo y harina de garbanzo extruida (g/100g) y el porcentaje de reducción de cada aminoácido

Aminoácidos	Harina de garbanzo cruda (g/100g)	Harina de garbanzo extuida (g/100g)	Reducción (%)
Lisina	7,80	3,25	58,33
Histidina	3,67	1,66	54,77

Ácido aspártico	11,58	6,02	48,01
Treonina	3,12	2,11	32,37
Cisteína	1,19	0,66	41,18
Valina	5,85	3,02	48,38
Metionina	1,19	0,70	41,18
Isoleucina	3,47	2,29	34,01
Leucina	6,47	5,11	21,02
Fenilalanina	6,15	5,16	16,10

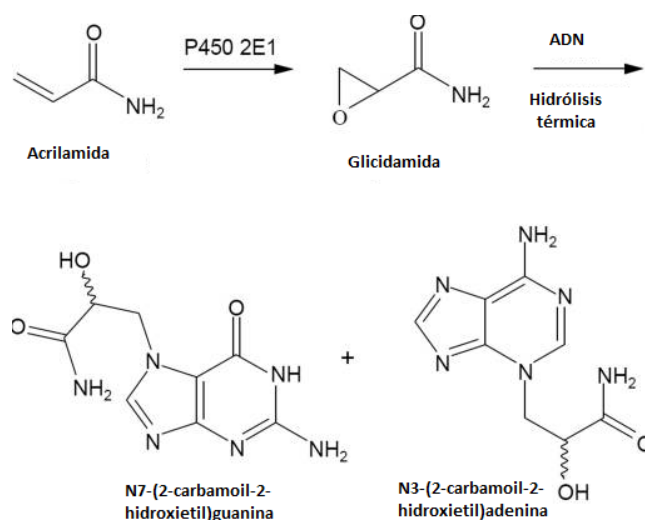
Entre las variables del proceso de extrusión que afectan más a la digestibilidad proteica, se encuentra la relación de alimentación (*feed ratio*), seguido de la temperatura. Una de las ventajas de la extrusión es, por tanto, la destrucción de los factores antinutricionales, termolábiles como los inhibidores de tripsina, hemaglutininas, taninos, etc. y por lo general todos aquellos que inhiben la digestibilidad proteica (Singh et al., 2007; Morales et al., 2015b).

La pérdida de lisina en el alimento tras el proceso de extrusión está relacionada con la **reacción de Maillard**, proceso por el cual los aminoácidos interaccionan con los grupos carbonilo de los azúcares reductores a través de los grupos amino libres. La lisina es el aminoácido más reactivo, ya que tiene disponible dos grupos amino libres en su estructura. Al ser la lisina un aminoácido muy limitado en los cereales, las harinas de cereales extruidas pueden presentar muy bajos valores de este aminoácido. Las condiciones del proceso de extrusión son las responsables de la mayor o menor pérdida de éste aminoácido. Tomando la lisina como indicador de la pérdida de aminoácidos, se concluye que temperaturas superiores a 180°C y humedad superior al 15% favorecen la reacción de Maillard. Para mantener la lisina en rangos normales en el producto extruido, sería conveniente trabajar a temperatura por debajo de la indicada anteriormente, controlando la temperatura, disminuyendo la cantidad de azúcares reductores, e incorporando alimentos ricos en lisina, como las legumbres, a la formulación (Singh et al., 2007).

Otra desventaja asociada a la reacción de Maillard es la formación de acrilamida (Figura 5) en productos de cereales, patatas y arroz. La acrilamida se encuentra clasificada como agente carcinogénico del grupo 2A. Se puede originar también durante el proceso de extrusión de los cereales (Studer, Blank y Stadler, 2004) y su formación es dependiente del tipo de aminoácidos existente en la mezcla cruda. La presencia de asparragina fomenta su

formación, por lo que es importante tener en cuenta que a menor presencia de este aminoácido en la mezcla inicial, menor formación de acrilamida habrá en el producto extruído (Studer et al., 2004). El uso de extrusores de doble tornillo también favorecen la aparición de acrilamida por la alta energía térmica y mecánica que emplean (Singh et al., 2007).

Figura 5: Estructuras de la acrilamida, glicidamida y su reacción con el ADN (Beland et al., 2015)



Efecto sobre las grasas

Los cereales y las legumbres (no oleaginosas) tienen un bajo contenido en grasa (2%), por lo que en la extrusión de harinas de cereales y legumbre no tiene una especial relevancia el efecto sobre los lípidos. Sin embargo, en los productos extruidos a veces se añaden lípidos a la mezcla inicial. Los productos con elevado contenido en grasa (por encima del 5 – 6%) disminuyen la fuerza de torsión durante el proceso. Un alto contenido en ácidos grasos libres (AGL) pueden dejar sabores indeseables en los alimentos. Estos ácidos grasos libres vienen de la hidrólisis de los triglicéridos (TG) por acción de las lipasas y/o altas temperaturas, de modo que las temperaturas empleadas durante el proceso de extrusión son suficientes para producir una desnaturalización de las enzimas hidrolíticas (por ejemplo las lipasas), lo que impediría que actúen sobre los TG escindiéndolos en AGL y dando lugar a dichos olores (Singh et al., 2007).

4.3. EFECTOS DE LA EXTRUSIÓN SOBRE LOS COMPUESTOS BIOACTIVOS EN LAS HARINAS

Los granos de cereal son una de las principales fuentes de **vitaminas del grupo B**, por lo que resulta importante determinar la influencia del proceso de extrusión sobre el contenido

de estas vitaminas (Tabla 2; Athar et al., 2006). Diversos estudios han correlacionado como disminuían las vitaminas del grupo B conforme se sometían a fuerzas mecánicas comprendidas entre 0,09 y 0,13 kWh/kg con tiempos de retención de entre 30 segundos a 1 minuto a una temperatura de 178 °C durante el proceso de extrusión (Cheftel, 1986).

Tabla 2: Porcentaje de retención de vitaminas del grupo B después de la extrusión (Athar et al., 2006).

Vitaminas (mg/100g)	Avena	Maiz	Maiz + guisante
Tiamina	23	44	61
Riboflavina	100	86	70
Niacina	100	75	60
Piridoxina	35	100	18

La disminución de vitaminas en el producto extruído no estaba influído por la temperatura; la mayor estabilidad se asociaba a la riboflavina y niacina, mientras que la tiamina es la que presentaba las mayores reducciones en los productos extruídos (Athar et al., 2006).

En el caso de la **vitamina C**, diferente estudio indican que la pérdida de esta vitamina (9 al 80%) en alimentos extruidos se debe principalmente al aumento de la temperatura (160 – 180°C) que tiene lugar durante el proceso de extrusión, de modo que altas temperaturas y bajo porcentaje de humedad favorecen la degradación del ácido ascórbico (Killeit, 1994).

En general, los **tocoferoles** son vitaminas liposolubles y su disminución está estrechamente asociadas con la degradación de los lípidos (Hakansson y Jagerstad, 1990; Morales et al., 2015a). Zielinski, Kozłowska y Lewczuk (2001) indicaron un descenso del 40 al 93% en tocoferoles totales de diferentes cereales extruidos (avena, cebada, trigo, centeno) después de un tratamiento térmico corto (extrusión a 120°C), observándose las menores pérdidas en la harina de avena. Así mismo, la sensibilidad de las distintas isoformas de esta vitamina depende de las variables del proceso de extrusión. Por ejemplo, en harinas de *Lathyrus sativus* L. se ha publicado que un aumento de las temperaturas de extrusión induce la disminución de α -tocoferol, mientras que la disminución de γ -tocoferol está más correlacionada con el contenido acuoso durante la extrusión (Grela, Jensen, y Jakobsen, 1999).

Los **compuestos fenólicos** y la actividad antioxidante han sido el punto de mira de muchos de los estudios realizados recientemente. Además, muchos *snacks* extruídos llevan incorporados vegetales (como el brócoli) y/o frutas con el afán de incrementar los compuestos bioactivos en el producto final y por lo tanto su capacidad antioxidante.

La disminución de los niveles de compuestos fenólicos, al igual que ocurría con las vitaminas, estaban relacionados con el incremento de temperatura durante el proceso de extrusión. Sin embargo, en un estudio publicado sobre *snacks* extruídos elaborados a partir de harina de maíz enriquecidos con brócoli, se ha visto cómo el aumento de la temperatura durante el proceso de extrusión incrementaba los valores de compuestos fenólicos, lo que supone el efecto contrario a lo observado en otros estudios. Este hecho se explica debido a que durante el proceso de extrusión se produce la liberación de los compuestos fenólicos contenidos en las células y/o unidos a la fracción de fibra. Por otro lado, los compuestos fenólicos pueden sufrir descarboxilaciones durante el proceso de extrusión, hecho que se suma a que el contenido de humedad puede promover la polimerización de los compuestos fenólicos, afectando a la extractibilidad de los compuestos fenólicos y provocando una reducción de la actividad antioxidante (Bisharat et al., 2014).

4.4. EFECTO DE LA EXTRUSIÓN SOBRE COMPUESTOS INDESEADOS

Micotoxinas

Las micotoxinas son metabolitos secundarios procedentes de los mohos que producen micotoxicosis, enfermedades que afectan al ser humano y a los animales. La gravedad de dichas enfermedades depende no sólo del tipo de micotoxina, sino también de la edad, estado nutricional del individuo y grado de exposición (Peraica et al., 2000). De modo que a presencia de micotoxinas en los alimentos compromete el perfil de seguridad del alimento y, por ende, la salud del ser humano. Sin embargo, numerosos estudios han relacionado el descenso de los niveles de micotoxinas con el proceso de extrusión, siendo una ventaja más de este proceso tecnológico frente a los métodos tradicionales de tratamiento de alimentos.

Los principales microorganismos que producen micotoxinas son *Fusarium*; *Aspergillus* y *Penicillium*, entre otros. La contaminación de los cereales por mohos como los

del género *Fusarium* suele producirse durante el cultivo, sin embargo gracias a la extrusión se va a producir un descenso en los niveles de micotoxinas.

A pesar de que la prevención de la contaminación por micotoxinas es fundamental para las industria agraria y alimentaria, en la mayoría de los casos este hecho es inevitable para el productor. La reducción del contenido de micotoxinas durante la extrusión varía dependiendo de varios factores, como el tipo de extrusor, el tipo de tornillo, la temperatura, la velocidad del tornillo, el grado de humedad en la harina y el uso de aditivos (Castells et al., 2005).

Las **aflatoxinas**, en condiciones de humedad y temperatura elevada, aparecen en alimentos como los frutos secos, cereales y arroz. Son producidas por *Aspergillus* y conllevan en la salud graves problemas, actuando como inmunosupresores, mutagénicos, teratogénicos y carcinogénicos (Peraica et al., 2000). En presencia de metabisulfito de sodio se consiguió reducir la aflatoxina AFB1 hasta un 25%, mientras que sin el aditivo sólo se redujo hasta un 10 – 25% (Cazzaniga et al., 2001). Un estudio llevado a cabo por Hameed en 1993 demostró que el proceso de extrusión a 105°C reducía el contenido total de aflatoxinas en un 50 – 80%. En este estudio, los aditivos de metabisulfito de sodio, bisulfito de sodio, hidróxido de calcio, peróxido de hidrógeno no tenían efecto en la reducción de los niveles. Conclusiones similares obtuvo Cheftel en 1986, donde el contenido de AFB1 descendía un 87% en presencia de un 2 – 2,5% de hidróxido de amonio. En ausencia de este aditivo, AFB1 se reducía hasta un 23 – 66% de sus valores. Por tanto, el proceso de extrusión ayuda a la disminución del contenido de aflatoxinas, siendo éste potenciado por la adición de dichos aditivos (Castells et al., 2005).

Las **fumomisinas** son micotoxinas producidas por *Fusarium moniliforme*. Se pueden encontrar en harinas de maíz o sorgo. Las de mayor importancia toxicológica son las fumomisinas B1 (FB1) y B2 (FB2), las cuales pueden causar intoxicaciones que se asocian con dolor abdominal, y han sido clasificadas como posibles carcinógenos para el ser humano (Peraica et al., 2000). Las fumomisinas son muy estables a elevadas temperaturas. Sin embargo, se ha demostrado que a mayor temperatura del extrusor, se produce una mayor inactivación de las mismas. De modo que temperaturas superiores a 160°C reducen el contenido de FB1 hasta un 92% de su valor inicial (Castells et al., 2005). Entre un rango de temperatura de 70 – 105°C el contenido en micotoxinas se puede reducir en un 30%, mientras que a temperaturas de 170 – 220°C el contenido en micotoxinas quedaba reducido en un 70%. La humedad también afecta al contenido en fumomisinas. En el caso de fumomisinas B2

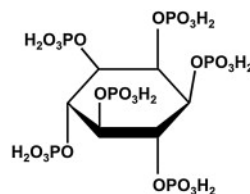
(FB2) se observó la misma tendencia: se consigue una mayor reducción del contenido de FB2 conforme aumenta la temperatura, una elevada velocidad y con bajo contenido acuoso (Castells et al., 2005).

Antinutrientes

Los antinutrientes se pueden encontrar en las semillas de las leguminosas, tienen efectos negativos sobre la composición nutricional de los alimentos por disminuir la disponibilidad de algunos nutrientes. Destacando el ácido fítico, inhibidores de tripsina, oxalato y lectinas (Kaur et al., 2015).

El **ácido fítico** (figura 6) y sus sales (fitatos) son compuestos clasificados como antinutrientes por la disminución de la biodisponibilidad de ciertos minerales, como el hierro y calcio. Se encuentra en ciertos alimentos como el arroz y las nueces, y su presencia da lugar a complejos estables con cationes divalentes y trivalentes (hierro, cobre, zinc, calcio) (Lee et al., 2015).

Figura 6: Estructura del ácido fítico (Higuchi, 2014)



El proceso de extrusión reduce significativamente el contenido de ácido fítico (a temperaturas de 120 – 140 °C y 20% de humedad). Este hecho se debe, en mayor parte, a la labilidad de este compuesto en presencia de altas temperaturas (Kaur et al., 2015).

Los **inhibidores de tripsina**, también conocidos como inhibidores de Bowman-Birk, son sustancias de carácter proteico que se encuentran en la soja y en otras semillas de legumbres. Estos compuestos en presencia de una proteasa y un sustrato producen una notoria disminución en la velocidad de la reacción catalizada por la enzima. Se caracterizan por ser termolábiles, de modo que a las temperaturas de extrusión (120 – 140 °C) se produce su desnaturalización proteica, disminuyendo la actividad enzimática de los mismos (Kaur et al., 2015).

El **ácido oxálico** y sus sales (oxalatos) se encuentra en multitud de alimentos de origen vegetal, entre ellos los cereales y leguminosas. Se considera un compuesto quelante de minerales, principalmente calcio, dando lugar a la formación de calculos renales y a la desmineralización osea. En comparación con el resto de antinutrientes, es el compuesto que menos se ve influenciado por la temperatura y por lo tanto del proceso de extrusión (Kaur et al., 2015).

Las **lectinas**, también denominadas hemaglutininas, son proteínas sensibles a las temperaturas que actúan en el organismo como eritroaglutininas y leucoaglutininas. Durante el proceso de extrusión se produce la desnaturalización proteica, reduciéndose o eliminándose totalmente su contenido en el alimento (Morales et al., 2015b). Comparando este método frente a otros más tradicionales, es el que más reduce el contenido de este antinutriente (Alonso et al., 2000).

5. CONCLUSIONES

La extrusión es un proceso complejo multivariable que requiere un minucioso control en los parámetros que influyen en el proceso, gracias al cual la industria alimentaria puede garantizar una mayor aceptabilidad de los alimentos en la población diana.

La aplicación del proceso de extrusión a las harinas de cereales y legumbres induce los siguientes cambios y/o modificaciones:

- El proceso de extrusión modifica la textura del alimento. Se debe controlar la humedad (<15%) y el contenido graso (<5%) para conseguir una textura agradable y una mayor estabilidad por parte del consumidor.
- Con la extrusión se mejora la digestibilidad del almidón (hidrólisis y gelatinización) y de las proteínas (desnaturalización). La lisina es el aminoácido que sufre mayores reducciones, por ser el más reactivo en la reacción de Maillard y es sensible a la humedad. La suplementación de las harinas con alimentos como legumbres y frutos secos, incrementa la disponibilidad de este aminoácido.
- La extrusión induce cierta pérdida de vitaminas, especialmente de la tiamina. Sin embargo, se podría contrarrestar incorporando en la formulación alimentos ricos en tiamina (pistachos, avellanas, judías blancas, etc.).

- El empleo de altas temperaturas disminuye el contenido en algunos compuestos indeseables y/o tóxicos (antinutrientes y micotoxinas). El uso de ciertos aditivos como el metabisulfito de sodio potencia el efecto de la extrusión sobre las micotoxinas, especialmente las fumomisininas y aflatoxinas.

Todo ello hace que del proceso de extrusión sea una técnica fundamental y beneficiosa para la industria alimentaria en todos los aspectos, tanto nutricionalmente como sensorialmente.

6. BIBLIOGRAFÍA

Alonso, R., Aguirre, A. y Marzo, F. (2000). "Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and in vitro digestibility of protein and starch in faba and kidney beans". *Food Chemistry*, 68: 159–165.

Alonso, R., Rubio, L.A., Muzquiz, M., y Marzo, F. (2001). "The effect of extrusion cooking on mineral bioavailability in pea and kidney bean seed meals." *Animal Feed Science and Technology*, 94: 1-13.

Anuonye, J.C., Jigam, A.A. y Ndaako, G.M. (2012). "Effects of extrusion cooking on the nutrients and antinutrients composition of pigeon pea and unripe plantain blends". *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 2(5): 58-162.

Athar, N., Hardacre, A., Taylor, G., Clark, S., Harding, R. y McLaughlin, J. (2006). "Vitamin retention in extruded food products". *Journal of Food Composition and Analysis*, 19: 379-383.

Becker, F.S., da Costa Eifert, E., SoaresSoares Jr., M., Souza Tavares, A. y Vânia Carvalho, A. (2014). "Physical and Functionalevaluation of ExtrudedFloursobtainedfromdifferent rice genotypes". *Ciência e Agrotecnologia*, 38(4): 367-374.

Beland, F.A., Olson, G.R., Mendoza, M.C.B., Marques, M.M. y Doerge, D.R. (2015). "Carcinogenicity of glycidamide in B6C3F1 mice and F344/N rats from a two-year drinking water exposure". *Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, 86: 104–115.

Berrios, J., Morales, P., Cámara, M. y Sánchez Mata, M.C. (2010). Carbohydrate Composition of Raw and Extruded Pulse Flours. *Journal of Food Research International*, 40: 531-536.

Bisharat, G.I., Lazou, A.E., Panagiotou, N.M., Krokida, M.K. y Maroulis, Z.B. (2015). "Antioxidant potential and quality characteristics of vegetable-enriched corn-based extruded snacks". *Journal of Food Science and Technology*, 52(7): 3986–4000.

Borejszo, Z. y Khan, K. (1992). "Reduction of Flatulence-causing sugars by high temperature extrusion of pinto vean high starch fractions". *Journal of Food Science*, 57: 771-777.

Castells, M., Marín, S., Sanchis, V. y Ramos, A.J. (2005). "Fate of mycotoxins in cereals during extrusion cooking: A review". *Food Additives & Contaminants*, 22(2): 150-157.

Cazzaniga, D., Basílico, J.C., González, R.J., Torres, R.L. y de Greef, D.M. (2001). "Mycotoxins inactivation by extrusion cooking of corn flour". *Letters in Applied Microbiology*, 33: 144-147.

Cheftel, J.C. (1986). "Nutritional effects of extrusion cooking". *Food Chemistry*, 20: 263-283.

Della Valle, G., Quillien, I. y Gueguen, J. (1994). "Relationships between processing conditions and starch and protein modifications during extrusion-cooking of pea flour". *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 64(4): 509-517.

Grela, E.R., Jensen, S.K. y Jakobsen, K. (1999). "Fatty acid composition and content of tocopherols and carotenoids in raw and extruded grass pea (*Lathyrus sativus* L.)". *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79: 2075-2078.

Guy, R.C.E. (2001). Extrusion cooking. Technologies and applications. 173-177.

Guy, R.C.E. (2003). Extrusion cooking. Principles and practice. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition. Second edition*.

Hameed, H.G. (1993). "Extrusion and chemical treatments for destruction of aflatoxin in naturally-contaminated corn".

Kaur, S., Sharma, S., Singh, B. y Dar, B.N. (2015). "Effect of extrusion variables (temperature, moisture) on the antinutrient components of cereal brans". *Journal of Food Science and Technology*, 52(3): 1670-1676.

Killeit, U. (1994). "Vitamin retention in extrusion cooking". *Food Chemistry*, 49(2): 149-155.

Lee, H.H., Loh, S.P., Bong, C.F.J., Sarbini, S.R. y Yiu, P.H. (2015). "Impact of phytic acid on nutrient bioaccessibility and antioxidant properties of dehusked rice". *Journal of Food Science and Technology*, 52(12): 7806-7816.

Mazumder, P., Roopa, B.S. y Bhattacharya, S. (2007). "Textural attributes of a model snack food at different moisture contents". *Journal of Food Engineering*. 79: 511-516.

Morales, P., Cebadera-Miranda, L., Cámara, R.M., Reis, F.S., Barros, L., Berrios, J., Ferreira, I. y Cámara, M. (2015a). "Lentil flour formulations to develop new snack-type products by extrusion processing: Phytochemicals and antioxidant capacity". *Journal of Functional Foods*, 19: 537-544.

Morales, P., Berrios, J., Varela, A., Burbano, C., Cuadrado, C., Muzquiz, M. y Pedrosa, M.M. (2015b). "Novel fiber-rich lentil flours as snack-type functional foods: an extrusion cooking effect on bioactive compounds". *Journal of Functional Foods*, 6: 3135-3143.

Ozer et al. (2006). *International Journal of Food Science and Technology*, 41: 289–293.

Patil, H., Tiwari, R.V. y Repka, M.A. (2016). "Hot-Melt Extrusion: from Theory to Application in Pharmaceutical Formulation". *AAPS Pharm SciTech*, 17(1): 20-42.

Peraica, M., Radic, B., Lucic, A. y Pavlovic, M.. (2000). "Efectos tóxicos de las micotoxinas en el ser humano". *Boletín de la Organización Mundial de la Salud*, 2: 80-92.

Politz, M.L., Timpa, J.D. y Wasserman, B.P. (1994). "Quantitative measurement of extrusion-induced starch fragmentation products in maize flour using nonaqueous automated gel-permeation chromatography". *Cereal Chemistry*, 71: 532–536.

Ralet, M.C., Della Valle, G. y Thibault, J.F. (1993). "Raw and extruded fiber from pea hulls. Part 1: composition and physico-chemical properties". *Carbohydrate Polymers*, 20: 17–23.

Shah, F.U.H., Sharif, M.K., Butt, M.S. y Shahid, M. (2016). "Development of Protein, Dietary Fiber and Micronutrient Enriched Extruded Corn Snacks". *Journal of Texture Studies*, 1-10.

Singh, S., Gamlath, S. y Wakeling, L. (2007). "Nutritional aspects of food extrusion: a review". *International Journal of Food Science and Technology*, 42: 916-929.

Studer, A., Blank, I. y Stadler, R.H. (2004). "Thermal processing Contaminants in Foodstuffs and Potencial Strategies of Control". *Czech Journal of Food Science*, 22: 1-10.

Van der Poel, A.F.B., Den Hartog, L.A., Van Stiphout, W.A.A., Bremmers, R. y Huisman, J. (1990). "Effects of extrusion of maize on ileal and faecal digestibility of nutrients and performance of young piglets". *Animal Feed Science and Technology*, 29: 309-320.

Wang, W.M. y Klopfenstein, C.F. (1993). "Effects of twin-screw extrusion on the nutritional quality of wheat, barley, oats". *Cereal Chemistry*, 70: 712–725.

Zielinski, H., Kozłowska, H. y Lewczuk, B. (2001). "Bioactive compounds in the cereal grains before and after hydrothermal processing". *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2(3): 159-169.