



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior
de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
AGRONÓMICA Y DEL MEDIO NATURAL

APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE
EXTRUSIÓN EN PRODUCTOS CON ALTO
CONTENIDO EN PROTEÍNA

TRABAJO FINAL DE GRADO EN CIENCIA Y
TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS

Autora: Raquel Murillo González

Tutoras: Gemma Moraga Ballesteros
Amparo Quiles Chuliá

Tutora externa: Mariana Valverde Belda

Curso académico 2019-2020
Valencia, 6 de julio de 2020

TÍTULO: APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE EXTRUSIÓN EN PRODUCTOS CON ALTO CONTENIDO EN PROTEÍNA.

Autora: Raquel Murillo González

Tutoras: Gemma Moraga Ballesteros; Amparo Quiles Chuliá

Tutora externa: Mariana Valverde Belda

RESUMEN: El estilo de vida de hoy en día se caracteriza por la prisa constante, una vida acelerada y largas horas de trabajo que dificultan, muchas veces, el poder tener una alimentación adecuada. Por eso, la preferencia por parte del consumidor por los productos listos para el consumo aumenta cada vez más, así como la demanda de que éstos sean naturales y saludables. En este aspecto, la industria alimentaria se ha abierto paso y ha utilizado diferentes técnicas para cubrir estas expectativas y necesidades de los consumidores. Una de estas técnicas es la extrusión. La extrusión es un proceso rápido y continuo de cocción, mezcla y formación de productos a alta temperatura en el que se fuerza el paso de la masa a través de una restricción u orificio con diferentes geometrías. Es una técnica muy extendida gracias a su elevada versatilidad, tanto por las amplias combinaciones de variables de proceso como por la tipología de productos que se pueden obtener. Es un método de procesado con una amplia trayectoria, utilizado principalmente para producir snacks expandidos elaborados a base de almidón. Éstos suelen carecer de proteína y otros compuestos nutritivos como la fibra. Por eso, las investigaciones más recientes sobre la tecnología de extrusión se enfocan en el estudio de la influencia de la inclusión de proteína en la formulación de los snacks, sobre la expansión y características estructurales y sensoriales de éstos. Por otra parte, la tendencia social se dirige cada vez más hacia el consumo de productos vegetales en detrimento de la carne. El uso de la técnica de extrusión podría permitir obtener y desarrollar productos proteicos, a base de vegetales y otras fuentes proteicas no cárnicas, de textura similar a las de la carne y con buenas propiedades sensoriales. Para la obtención de texturizados de proteína de alta calidad nutritiva está siendo imprescindible la generación de conocimiento a través de la investigación.

Este trabajo tiene como objetivo profundizar en el conocimiento de la tecnología de extrusión y en su uso para la obtención y desarrollo de snacks extrudidos y texturizados de proteína vegetal y de otras fuentes no cárnicas de alto valor nutritivo. Además, se pretende poner de manifiesto su posible uso en el desarrollo de nuevos alimentos saludables que satisfagan las tendencias sociales y las demandas actuales de los consumidores.

PALABRAS CLAVE: Snacks extrudidos, proteína vegetal, condiciones de proceso, expansión, fuentes proteicas no cárnicas, texturizados de proteínas, análogos de carne.

TÍTOL: APLICACIÓ DE LA TECNOLOGIA D'EXTRUSIÓ EN PRODUCTES AMB ALT CONTINGUT EN PROTEÏNA.

Autora: Raquel Murillo González

Tutores: Gemma Moraga Ballesteros; Amparo Quiles Chuliá

Tutora externa: Mariana Valverde Belda

RESUM: L'estil de vida de hui en dia es caracteritza per la pressa constant, una vida accelerada i llargues hores de treball que dificulten, moltes vegades, el poder tindre una alimentació adequada. Per això, la preferència per part del consumidor pels productes llestos per al consum augmenta cada vegada més, així com la demanda que estos siguen naturals i saludables. En este aspecte, la indústria alimentària s'ha obert pas i ha utilitzat diferents tècniques per a cobrir estes expectatives i necessitats dels consumidors. Una d'estes tècniques és l'extrusió. L'extrusió és un procés ràpid i continu de cocció, mescla i formació de productes a alta temperatura en què es força el pas de la massa a través d'una restricció o orifici amb diferents geometries. És una tècnica molt estesa gràcies a la seua elevada versatilitat, tant per les àmplies combinacions de variables de procés com per la tipologia de productes que es poden obtindre. És un mètode de processat amb una àmplia trajectòria, utilitzat principalment per a produir snacks expandits elaborats a base de midó. Estos solen mancar de proteïna i altres compostos nutritius com la fibra. Per això, les investigacions més recents sobre la tecnologia d'extrusió s'enfoquen en l'estudi de la influència de la inclusió de proteïna en la formulació dels snacks, sobre l'expansió i característiques estructurals i sensorials d'estos. D'altra banda, la tendència social es dirigeix cada vegada més cap al consum de productes vegetals en detriment de la carn. L'ús de la tècnica d'extrusió podria permetre obtindre i desenvolupar productes proteics, a base de vegetals i altres fonts proteiques no càrniques, de textura semblant a les de la carn i amb bones propietats sensorials. Per a l'obtenció de texturitzats de proteïna d'alta qualitat nutritiva està sent imprescindible la generació de coneixement a través de la investigació.

Este treball té com a objectiu aprofundir en el coneixement de la tecnologia d'extrusió i en el seu ús per a l'obtenció i desenvolupament de snacks extrudits i texturitzats de proteïna vegetal i d'altres fonts no càrniques d'alt valor nutritiu. A més, es pretén posar de manifest el seu possible ús en el desenvolupament de nous aliments saludables que puguen satisfer les tendències socials i les demandes actuals dels consumidors

PARAULES CLAU: Snacks extrudits, proteïna vegetal, condicions de procés, expansió, fonts proteiques no càrniques, texturitzats de proteïnes, anàlegs de carn.

TITLE: APPLICATION OF EXTRUSION TECHNOLOGY IN PRODUCTS WITH A HIGH PROTEIN CONTENT.

Author: Raquel Murillo González

Tutors: Gemma Moraga Ballesteros; Amparo Quiles Chuliá

External tutor: Mariana Valverde Belda

ABSTRACT: Today's lifestyle is characterized by constant haste, an accelerated life and long hours of work that often make it difficult to have an adequate diet. Therefore, the consumer's preference for ready-to-eat products increases more and more, as does the demand that they be natural and healthy. In this regard, the food industry has broken through and used different techniques to meet these expectations and needs of consumers. One of these techniques is extrusion. Extrusion is a fast and continuous process of cooking, mixing and forming high-temperature products in which the passage of the dough is forced through a restriction or hole with different geometries. It is a very widespread technique thanks to its high versatility, both due to the wide combinations of process variables and the type of products that can be obtained. It is a processing method with a long history, mainly used to produce expanded snacks made from starch. These often lack protein and other nutritional compounds like fiber. For this reason, the most recent research on extrusion technology focuses on the study of the influence of protein inclusion in the formulation of snacks, on the expansion and structural and sensory characteristics of these. On the other hand, the social trend is increasingly directed towards the consumption of plant products to the detriment of meat. The use of the extrusion technique could allow obtaining and developing protein products, based on vegetables and other non-meat protein sources, with a similar texture to that of meat and with good sensory properties. In order to obtain high quality nutritional texturized protein, the generation of knowledge through research is essential.

This work aims to deepen the knowledge of extrusion technology and its use to obtain and develop extruded and textured snacks of vegetable protein and other non-meat sources of high nutritional value. In addition, it is intended to highlight its possible use in the development of new healthy foods that meet social trends and current consumer demands.

KEY WORDS: Extruded snacks, vegetable protein, process conditions, expansion, non-meat protein sources, texturized protein, meat analogues.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, José Antonio y Merche, principalmente, por haberme inculcado desde pequeña el sentido de la responsabilidad y por haber sido tan constantes en mi vida académica. Por haberme enseñado que la ley del mínimo esfuerzo no es válida y haber insistido en que algún día mis esfuerzos serían recompensados.

A mi hermana Rebeca, por ver en mí un modelo a seguir y creer en mi futuro.

A Amparo y Gemma por haber hecho amenas sus clases y por haberme confiado tal proyecto, lo mismo que Mariana, que ha sido muy paciente y de trato fácil.

A mis amigas Anna, Yesmina y Sara, que han sido siempre comprensivas conmigo y me han dado apoyo emocional.

Y, por último, pero no menos importante, a Santi, Juanba, Javi y Víctor por haber sido mis compañeros de cabina incluso aquellos domingos en que cortaban las calles por carreras y era más difícil el acceso a la universidad. Y a Sara por haber sido en este último año mi confidente. Sois lo mejor de estos cuatro años de carrera.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 QUÉ ES LA EXTRUSIÓN. MERCADO E INTERÉS	1
1.2 OBJETIVO DEL ESTUDIO	2
2. SNACKS EXTRUDIDOS	2
2.1 MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS Y COMPONENTES DE INTERÉS	3
2.2 CONDICIONES DE LA TÉCNICA.....	7
2.2.1 Proteína	10
2.2.2 Almidón	12
2.2.3 Fibra.....	14
3. TEXTURIZACIÓN DE PROTEÍNAS	18
3.1 MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS Y COMPONENTES DE INTERÉS	19
3.2 CONDICIONES DE LA TÉCNICA.....	21
4. RETOS ACTUALES Y FUTURAS APLICACIONES	26
5. CONCLUSIONES	27
6. BIBLIOGRAFÍA	28

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. Partes de un extrusor de tornillo simple

Figura 2. Partes del tornillo

Tabla 1. Influencia de las variables independientes sobre las variables dependientes

Tabla 2. Efectos sobre el snack final que tienen los principales componentes en extrusión

Tabla 3. Materias primas y condiciones del proceso de extrusión estudiadas en los últimos años

Tabla 4. Principales fuentes de proteína vegetal estudiadas

Tabla 5. Composición química requerida de la soja u otras fuentes vegetales para ser texturizada (TVP)

Tabla 6. Composición química final requerida en un producto texturizado con alta humedad (HMEC)

Figura 3. Extrusor de doble tornillo co-rotativo

Tabla 7. Influencia de las variables independientes sobre las variables dependientes en HMEC

LISTADO DE ABREVIATURAS

- a_w**: Actividad de agua
- CE**: Comunidad europea
- DDG**: Distiller's dried grains (granos secos de destilería)
- EAA**: Essential aminoacids (aminoácidos esenciales)
- FAN**: Factores antinutricionales
- HMEC**: High moisture extrusion cooking (extrusión con alta humedad)
- HMMA**: High moisture meat analogues (análogos cárnicos)
- HTST**: High temperature, short time (alta temperatura y poco tiempo)
- I+D**: Investigación y desarrollo
- LMEC**: Low moisture extrusion cooking (extrusion con baja humedad)
- OHC**: Oil-holding capacity (capacidad de retención de aceite)
- ODS**: Objetivos de Desarrollo Sostenible
- rpm**: Revoluciones por minuto
- RS3**: Resistant starch type 3 (almidón resistente tipo 3)
- SME**: Specific Mechanical Energy (energía mecánica específica)
- TAC**: Total available carbohydrates (carbohidratos totales disponibles)
- T_g**: Glass transition temperature (temperatura de transición vítrea)
- TVP**: Texturized vegetable protein (proteína vegetal texturizada)
- WAI**: Water absorption index (índice de absorción de agua)
- WAC**: Water absorption capacity (capacidad de absorción de agua)
- WHC**: Water-holding capacity (capacidad de retención de agua)

1. INTRODUCCIÓN

1.1 QUÉ ES LA EXTRUSIÓN. MERCADO E INTERÉS

Actualmente, la principal fuente de proteínas y la más explotada en el mundo es la de origen animal. Además de las implicaciones sobre la salud (problemas cardiovasculares, obesidad) que tiene el consumo de carnes, según un estudio realizado por Goodlan, y Anhand (2009) los subproductos del ganado son los responsables del 51% de las emisiones de gases de efecto invernadero, de este modo, concluyen que sustituir los productos ganaderos por alternativas basadas en vegetales es la mejor estrategia para combatir el cambio climático. Cada vez más, los recursos escasean y el planeta se resiente. En esta línea, los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) (Naciones Unidas), adoptados por las Naciones Unidas en 2015, buscan asegurar la sostenibilidad del planeta y mejorar la calidad de vida de todos. En base al ODS número 9, la innovación es fundamental y en este sentido, la industria alimentaria tiene un papel importante, no solo en cuanto a la eficiencia de procesos, sino también en la identificación de nuevas fuentes proteicas para el desarrollo de una economía más competitiva, sostenible e integradora. Las principales líneas de I+D se enfocan en la búsqueda de alternativas sostenibles a partir de nuevas fuentes de proteínas, como las de origen vegetal, entre otras (AINIA, 2019a). Las proteínas vegetales se consideran materias primas prometedoras para la producción sostenible de nuevos productos alimenticios ricos en proteínas (Hicks y Verbeek, 2016).

La tecnología de extrusión es buena candidata en este aspecto. La extrusión es la operación de dar forma a una sustancia plástica o material moldeable forzando su paso a través de una restricción o apertura. Se emplea principalmente en alimentos ricos en almidón y en proteína (productos de confitería, alimentación infantil, cereales para desayuno, snacks, alimentos deshidratados...). Ésta se puede realizar en frío, sin aplicar temperatura, sólo presión (pasta sin cocción, salchichas, pastas para confitería...) o en caliente, con aplicación de energía térmica y mecánica (cereales de desayuno, modificación de harinas, snacks, análogos cárnicos, proteína texturizada...) (AINIA, 2018). Este último tipo de extrusión es el que se emplea para obtener alimentos texturizados y es el que se va a abordar en este trabajo.

Así pues, esta técnica no es sólo interesante por la variedad de productos que ofrece, ya que permite desarrollar nuevos productos mediante la generación de nuevas formas o texturas y la mezcla de diferentes ingredientes y sabores, sino que, además, permite obtener alimentos nutritivos, ricos en proteína y/o fibra, y más funcionales. Por ejemplo, algunos trabajos (Alonso y Marzo, 2000; Arêas *et al.*, 2016) demuestran que esta técnica puede mejorar la digestibilidad de las proteínas, es decir, la facilidad con que estos componentes del alimento se convierten en sustancias que el organismo puede aprovechar para su nutrición.

La extrusión es una técnica que se está estudiando cada vez más porque presenta algunas ventajas interesantes: la extrusión es versátil y admite el uso de ingredientes procedentes de subproductos de la industria agroalimentaria, al

ser un proceso en el que los productos se someten a altas temperaturas durante un corto espacio de tiempo (HTST), se garantiza la seguridad del producto sin alterar significativamente su valor nutricional (Leonard *et al.*, 2019). Además, la extrusión parece reducir la oxidación lipídica y la contaminación microbiana (Li *et al.*, 2019). Si durante el proceso de extrusión se incorporan a la formulación subproductos vegetales, ricos en proteína y fibra, se puede mejorar el valor nutricional de este tipo de productos. Esto permitiría cubrir la demanda por parte del consumidor de productos saludables y nutritivos, y cumplir con los objetivos sostenibles de economía circular, al revalorizar los excedentes de otros procesos alimentarios.

Debido a las características que ofrece la tecnología de extrusión, cada vez se está volviendo más popular e incluso está reemplazando otras técnicas de procesado tradicionales (Asare *et al.*, 2011), como el horneado o la fritura (Kumar Dubey *et al.*, 2014).

En definitiva, la extrusión es una tecnología que abre oportunidades a los fabricantes a la hora de ampliar su gama de productos hacia aquellos con un alto contenido de proteína vegetal y bajos en grasas. Es una tecnología de procesado que encaja muy bien en el objetivo y compromiso actual de reducción del contenido en grasa de los alimentos y con la demanda social hacia las proteínas vegetales. También puede contribuir en las soluciones contra el desperdicio de alimentos.

1.2 OBJETIVO DEL ESTUDIO

Este trabajo tiene como objetivo profundizar en el conocimiento de la tecnología de extrusión y en su uso para la obtención y desarrollo de snacks extrudidos y texturizados de proteína vegetal y de otras fuentes no cárnicas de alto valor nutritivo. Además, se pretende poner de manifiesto su posible uso en el desarrollo de nuevos alimentos saludables que satisfagan las tendencias sociales y las demandas actuales de los consumidores

2. SNACKS EXTRUDIDOS

La extrusión de alimentos permite obtener productos muy distintos, destinados a diferentes sectores, como pastas, cereales para el desayuno, galletas, alimentos infantiles, productos de confitería, chicles, piensos para mascotas y snacks, entre otros. Como cualquier operación de procesado, la extrusión produce cambios en el alimento, tanto a nivel interno como externo, provocando modificaciones en la funcionalidad de los ingredientes que formarán parte de la composición de éste. En los siguientes subapartados se describirán detalladamente qué materias primas se usan en la elaboración de los snacks extrudidos y de qué manera cambian las propiedades de los componentes mayoritarios durante el proceso de extrusión. Para ello, también se especificarán las condiciones operativas más frecuentes de la técnica.

2.1 MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS Y COMPONENTES DE INTERÉS

Todos los alimentos han de tener ciertas características sensoriales que el consumidor aprecie y hagan que perciba al producto como de calidad. Las galletas tradicionales han de ser crujientes, un zumo de naranja ha de tener un color anaranjado adecuado, un helado cremoso no debe presentar cristales de hielo... y así se podrían enumerar todos los alimentos.

Pues bien, respecto a los snacks extrudidos, éstos tienen que presentar una buena expansión, textura crujiente, buena microestructura y adecuada coloración. Esto es lo que Campanella *et al.* (2002) afirmaron: “la calidad de un snack extrudido depende del ratio de expansión, la densidad aparente, la microestructura, así como de las propiedades texturales, como la fuerza de rotura y la textura crujiente”. Es por ello que los snacks que se encuentran actualmente en el mercado están fundamentalmente hechos a base de almidón, por ser éste un macronutriente con muy buenas características de expansión (Meng *et al.*, 2010). Durante el proceso de extrusión, el almidón sufre algunos cambios importantes, especialmente la gelatinización, la despolimerización y la dextrinización debido a la alta temperatura que se aplica. Por efecto de la temperatura, los puentes de hidrógeno intermoleculares se rompen y la estructura cristalina del gránulo de almidón se altera, pasando a un estado amorfo, es decir, adopta una estructura más desorganizada. Al no existir puentes de hidrógeno intermoleculares, el gránulo de almidón tiene puntos de unión libres que usa para unirse a las moléculas de agua. De esta manera, los gránulos se hinchan, porque han absorbido agua, contribuyendo al aumento de la consistencia de la masa y de su viscosidad. La alta viscosidad conlleva a que el extrusor aplique más energía mecánica (SME), haya más cizalla y la presión sea mayor, cosa que afectará a la expansión. El producto se expande cuando, al salir del barril por la boquilla, pierde agua por la diferencia de presión entre el interior del extrusor y la presión ambiental, y con ello se retiene el gas generado (Leonard *et al.*, 2019). La forma en la que se lleva a cabo la expansión se comenta con más detalle en el apartado “Condiciones de la técnica”.

Otro aspecto que hace interesante el uso de almidón en este tipo de productos es el que durante el proceso tengan lugar reacciones de Maillard. Estas reacciones químicas comienzan por la reacción entre el grupo carbonilo de un azúcar reductor y el grupo amino de una proteína, a altas temperaturas. Como resultado se generan productos de reacción, como las melanoidinas, que oscurecen al snack extrudido y lo dotan de cierto sabor característico que el consumidor suele apreciar (Wani y Kumar, 2016).

Los snacks que se encuentran actualmente en el mercado están hechos mayoritariamente a base de maíz o arroz (Saldanha do Carmo *et al.*, 2019). Debido a ello, el valor nutricional de estos snacks no es demasiado bueno, siendo productos bastante calóricos y con contenidos muy bajos en nutrientes y proteína (Singha *et al.*, 2018). Por esta razón y en base a la demanda del consumidor de productos con alto valor nutricional, es interesante combinar diferentes materias primas de elevado valor nutritivo, como la proteína y fibra

con almidón, para obtener una buena expansión. Por ejemplo, en el caso del arroz, éste tiene muy buena expansión porque los gránulos de almidón son muy pequeños, además de otras características positivas como que es fácil de digerir, es hipoalergénico, etc (Philipp *et al.*, 2017) ... No obstante, su contenido en proteína es bajo y la lisina, un aminoácido esencial (EAA), es el factor limitante en su composición (Chaiyakul *et al.*, 2009), además de carecer de niveles adecuados de treonina, otro EAA, y vitaminas A, C y D (Li *et al.*, 2019). Para paliar estos aspectos negativos, se ha investigado sobre la adición de proteína vegetal al producto mediante la mezcla del cereal con legumbres como el garbanzo, las lentejas, o los guisantes, e incluso se han utilizado otros ingredientes ricos en proteína como la castaña, trigo sarraceno, cacahuete y avena, un cereal peculiar que tiene alto contenido en proteína, ácidos grasos insaturados y fibra soluble (Saldanha do Carmo *et al.*, 2019). La fibra también es muy interesante a nivel nutricional, por lo que muchos autores han estudiado la incorporación de este nutriente a partir de subproductos de la industria alimentaria, como por ejemplo, de los granos secos de destilería (Singha *et al.*, 2018), que son subproductos de la producción de etanol, la torta de cáñamo desgrasada (Jozinović *et al.*, 2017), que es subproducto de la producción de aceite, y linaza, hollejo de rosa mosqueta, pulpa de patata y hollejo de manzana (Tomaszewska-Ciosk *et al.*, 2019). La inclusión de proteína de origen vegetal con fibras dietéticas en la extrusión de formulaciones de carbohidratos complejos conlleva un bajo índice glucémico y permite elaborar productos funcionales y con alto valor nutricional, siendo una buena alternativa a los snacks a base de cereales (Morales *et al.*, 2015).

Sin embargo y a pesar de las buenas propiedades nutricionales que la adición de estos ingredientes conlleva, su influencia y repercusión en la expansión del extrudido no es favorable.

Durante la cocción por extrusión, las proteínas se despliegan, se realinean, se hidrolizan y pueden reticularse con otros ingredientes como el almidón (Philipp *et al.*, 2017). Esto afecta a la microestructura y textura del extrudido final.

El aumento de la proporción de proteína en la formulación a extruir aumenta la densidad aparente del producto. Este parámetro es inversamente proporcional al ratio de expansión. Por tanto, a mayor densidad aparente, menor será la expansión del snack. En el estudio de Chaiyakul *et al.* (2009) con arroz glutinoso, gluten de trigo y sémola de soja, la formación de una red de proteínas tridimensional por las proteínas del gluten y el agua disminuyó el hinchamiento del almidón, impidiendo que la gelatinización fuera la adecuada y reduciendo la extensibilidad del polímero durante la expansión a la salida del extrusor. Además, la red de proteínas es rígida y densa, y esto conlleva una mayor dureza del extrudido, con burbujas de aire más pequeñas y finas.

La proteína, así mismo, puede reaccionar con el almidón y con otras proteínas mediante puentes disulfuro, que también tienen como consecuencia una menor expansión en el producto final (Li *et al.*, 2019). En el estudio de Li *et al.* (2019), llevado a cabo con arroz, trigo sarraceno y cacahuete se vio que, a mayor cantidad de harina de cacahuete y trigo sarraceno, el grado de expansión era menor, debido al alto contenido en proteína y lípidos de esta mezcla, éstos

últimos actuando como plastificantes. Además, la fibra del trigo sarraceno reacciona muy bien con el agua, lo que evita en gran medida la pérdida de humedad en la boquilla, y eso lleva a una menor expansión del producto final. En el estudio de Onwulata y Konstance (2006) se observó que la viscosidad de la pasta cocida era menor cuando añadían proteína de suero a una base de maíz, y esto hizo que la expansión del extrudido fuera menor.

Sin embargo, hay que tener en cuenta la cantidad de proteína añadida. Faubion y Hosney (1982) estudiaron el efecto de la concentración de proteína de soja aislada que se añadía al snack y vieron que, en un rango de 1 a 8%, la expansión se mejoraba, pero con un contenido en proteína del 10% la expansión era menor. De la misma manera, en el estudio de adición de proteína de guisante a una base de almidón de arroz (Philipp *et al.*, 2017) se mostró que la adición de proteína aislada en un 10% mejoró la expansión del almidón de arroz. Se estudiaron tres niveles, con un 10, 30 y 50% de adición de proteína de guisante aislada. Además, se observó una rápida solidificación de la masa después de que saliera de la matriz del extrusor, lo que posiblemente se debió a una T_g (temperatura de transición vítrea) relativamente alta como resultado del alto contenido de almidón. Así, se obtuvieron extrudidos altamente expandidos, caracterizados por bajas densidades y dureza. Por el contrario, la adición de 30% de proteína dio lugar a una masa más densa y menos expandida, aunque con cierta expansión inicial. Esto podría estar relacionado con una disminución de la T_g de la masa. Esperadamente, un aumento de la concentración de la proteína al 50% dio como resultado extrudidos mal expandidos y densos, y sin ninguna expansión inicial.

La T_g tiene un papel importante, pues la expansión y, por tanto, la microestructura final del extrudido depende de la reología de la masa y de este parámetro. A su vez, la T_g de la mezcla cocida viene influida por las condiciones del proceso, que más tarde se comentarán, y por la materia prima que se usa. En este estudio en concreto, de proteína aislada de guisante, la T_g disminuía al aumentar la cantidad de proteína. Este parámetro es la línea de separación entre un producto cristalino y organizado y uno gomoso y maleable. Por debajo de su T_g , el material se encuentra vítreo, cristalino, mientras que por encima se encuentra gomoso. Eso es lo que le ocurre al almidón cuando hay exceso de agua y se hincha, dando como resultado su gelatinización. Pasa de estado organizado y cristalino a estado gomoso. La T_g de este material es bastante elevada, ya que el peso molecular tiene gran importancia (Martínez *et al.*, 2011). A mayor peso molecular, la T_g es más alta. Por eso, al añadir proteína, un polímero de alto peso molecular, pero en menor grado en comparación con el almidón, la T_g de la mezcla desciende en relación a la T_g del almidón. Esto es importante, ya que el producto sale a mucha presión del extrusor. Al salir, la presión decae y la temperatura también. El producto se expandirá hasta que llegue a la T_g del snack, donde cesará la expansión, volviéndose un producto vítreo y crujiente. Por tanto, cuando se aumenta la cantidad de proteína, se produce una disminución de la temperatura de transición vítrea, que resulta en la solidificación retardada del material después de salir de la matriz del extrusor, dándole tiempo a la proteína a encogerse y dar un extrudido más denso.

Para que el almidón gelatinice, es decir, se vuelva gomoso, tiene que alcanzar temperaturas superiores a su T_g . Es fundamental que gelatinice para que se produzca la expansión posteriormente. Por eso, las mezclas con poca viscosidad no expanden bien, ya sea por falta de agua (tiene que haber un mínimo), por exceso de la misma, o por alto contenido en lípidos. En estos dos últimos casos, la masa se plastifica, y la cizalla no es tan alta. El agua y la grasa actúan de lubricantes. Sin embargo, hay otro factor que influye en la disponibilidad del agua para unirse al almidón. Hablamos de la presencia de fibra y azúcar.

En el caso de la fibra, se ha comentado antes que reacciona muy bien con el agua e impide que el almidón la utilice. Esto llevaría a que su temperatura de gelatinización aumente, retardando el proceso.

La industria alimentaria produce muchos productos de desecho que de normal se destinan a alimentación animal. Sin embargo, estas corrientes residuales aún contienen grandes cantidades de nutrientes, como fibra y polifenoles. Por eso, se investiga sobre la inclusión de estas fracciones en los snacks, para aprovechar al máximo los ingredientes, aportar mayor valor nutricional al producto y minimizar el impacto ambiental que estas corrientes tendrían (Tomaszewska-Ciosk *et al.*, 2019). Generalmente, la adición de estos subproductos vegetales conlleva una menor expansión por aumento de la densidad aparente. Sin embargo, también se ha visto que, en otros casos, la fibra soluble mejora la expansión. Teniendo en cuenta las cantidades, la adición de granos secos de destilería al snack con sémola de maíz y proteína de garbanzo, por debajo de un 10%, mejoró el ratio de expansión por aumento de la viscosidad de la masa cocida. Es decir, depende de las cantidades de fibra que se añadan, como ocurre en el caso de la proteína, de la materia prima, y de las condiciones del proceso (mayor o menor temperatura, velocidad del tornillo, SME aplicada, etc). (Singha *et al.*, 2018).

Otro de los factores que influyen en el grado de expansión es la presencia de azúcar. El azúcar hace que la temperatura de gelatinización del almidón también aumente (Martínez *et al.*, 2011). Esto es lo que ocurre al incorporar harina de castaña al extrudido (Sacchetti *et al.*, 2004). Aunque es un ingrediente poco común en este tipo de productos, se ha estudiado su efecto en el extrudido final por las propiedades que tiene la castaña. Tiene grandes cantidades de lisina y treonina en su composición, así como niveles considerables de fibra dietética, vitamina E y las del grupo B. Así pues, si se combina con arroz, falto en lisina y treonina, se produce un efecto sinérgico y un snack con buen perfil de aminoácidos. Además, el arroz no enmascara el sabor típico y característico de la castaña y, al tener éste niveles bajos de proteína, se reducen las reacciones de Maillard, problema común al usar harina de castaña, pues ésta contiene altos niveles de azúcares reductores. Las reacciones de Maillard, en ocasiones, dependiendo de su extensión pueden ser no deseables llegando a potenciar la formación de productos amargos y duros (Sacchetti *et al.*, 2004)

El índice de absorción de agua (WAI) y la capacidad de retención de agua (WHC) son parámetros que miden el grado de gelatinización del almidón, siendo elevados a mayor gelatinización. Así pues, al aumentar el porcentaje de harina de castaña se produjo una disminución en el índice de absorción de agua, debido al alto porcentaje de azúcares presentes en la harina de castaña, fundamentalmente la sacarosa. La sacarosa tiene un efecto restrictivo en el proceso de gelatinización, pues compite con el almidón por el agua disponible y, además, interacciona con él, impidiendo que se hidrate. Esto hace que la temperatura a la que ocurre la gelatinización del almidón aumente. Sin embargo, también se vio poca gelatinización y, por tanto, menor expansión, al usar más arroz que castaña. En ese caso, en el estudio se usaron temperaturas de extrusión más bajas. Teniendo en cuenta que el almidón de arroz gelatiniza a temperaturas muy altas, si se usan temperaturas de extrusión inferiores, la gelatinización no es adecuada.

Todos estos estudios sobre fuentes proteicas de origen vegetal tienen como objetivo abastecer la demanda de la población y reducir el impacto ambiental. En 2019, la CE (Comunidad europea) recoge en su último informe que el mercado de legumbres y proteínas vegetales procesadas está en expansión, debido a una mayor demanda de alimentos ecológicos y a un incremento de las personas que optan por dietas veganas y vegetarianas en los últimos años (AINIA, 2019b).

En esta línea, algo que AINIA (Centro Tecnológico ubicado en Paterna, Valencia) también investiga son las algas y los insectos como fuentes proteicas de interés. Aunque esta última es de origen animal, merece una mención especial en cuanto su papel en la sostenibilidad y su elevado valor nutritivo.

2.2 CONDICIONES DE LA TÉCNICA

Al ser un proceso HTST, la extrusión comporta grandes ventajas, inhibiendo la actuación de ciertos compuestos y potenciando reacciones deseables. Por ejemplo, a altas temperaturas los factores antinutricionales (FAN), así como ciertos microorganismos se inactivan, y las reacciones de Maillard tienen lugar (Leonard *et al.*, 2019). Sin embargo, las altas temperaturas también pueden tener efectos negativos en condiciones extremas, dando como resultado una reducción en la digestibilidad de las proteínas o compuestos indeseables resultantes de las reacciones de Maillard, por ejemplo. Es decir, se debe buscar un equilibrio entre la materia prima que se usa y las condiciones de proceso para obtener un producto seguro, inocuo y con nutrientes biodisponibles.

En este subapartado se van a especificar los parámetros que deben controlarse en el proceso y cómo influyen éstos en los principales compuestos del snack, como la proteína, los carbohidratos o la fibra, y su repercusión en la estructura del extrudido final.

Desde el punto de vista de control de proceso, el sistema está compuesto por variables dependientes y variables independientes. Un extrusor combina diversas operaciones unitarias: mezclado, cocido, amasado, cizalla y formado

y/o expansión. La combinación de estas operaciones es posible gracias al control de las variables operativas.

Los parámetros de proceso que se deben controlar directamente, o variables independientes, son las materias primas, el perfil de temperaturas, la velocidad de rotación de los husillos, el caudal de agua, la alimentación y la configuración husillo/boquilla. Aunque esta última se fija para una aplicación determinada. Cambios en estos parámetros operativos causan cambios en las variables dependientes del proceso como la temperatura del producto a la salida de la boquilla, la presión en la boquilla, y la viscosidad, así como cambios en la energía mecánica específica (SME) o en los atributos de calidad del producto extrudido obtenido. De hecho, la SME dependerá de la reología de la masa, que a su vez depende de la materia prima y de los parámetros de proceso.

Para entender un poco mejor estos parámetros, se debe conocer qué es un extrusor y cómo funciona. Tal y como se muestra en la *Figura 1*, un extrusor es un biorreactor con un barril cilíndrico que consta de tres zonas: la zona de alimentación, la zona de transición/amasado y la zona de cocción y formado. La mezcla se introduce en la zona de alimentación, junto con una determinada cantidad de agua. A lo largo del barril y a medida que la masa pasa por las diferentes zonas, las temperaturas van aumentando, así como la presión, siendo mayor la temperatura a la salida por la boquilla (die). Al salir el material por la boquilla adopta una forma determinada y se expande.

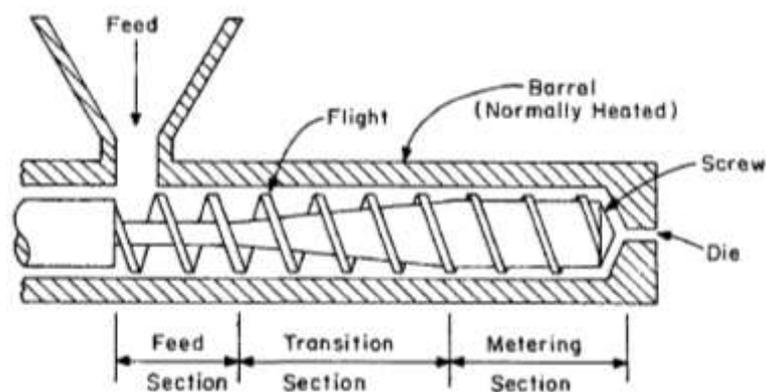


Figura 1. Partes de un extrusor de tornillo simple (Harmann y Harper, 1974)

Dentro del extrusor el material es sometido a fuerzas de corte y cizallamiento gracias al tornillo (screw) y esto, en parte, determina la reología de la masa. La SME que se aplica es directamente proporcional a la velocidad del tornillo y refleja el grado de degradación y transformación de los compuestos (Leonard *et al.*, 2019). En la *Figura 2* se muestran las partes del tornillo.

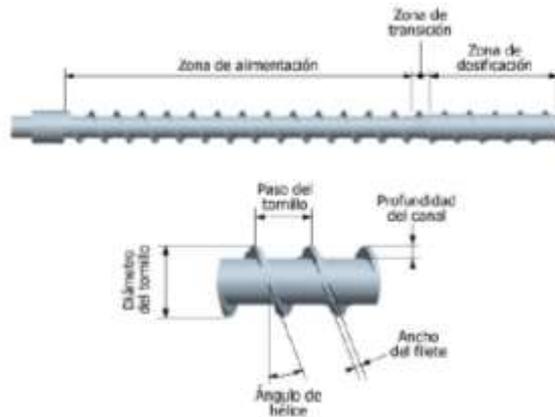


Figura 2. Partes del tornillo (Escola Politècnica Superior d'Alcoi, UPV)

Un extrusor puede ser de tornillo simple, como el de la *Figura 1*, o de doble tornillo. La elección de uno u otro depende de lo que el fabricante desee y de los requerimientos del proceso, ya que la extrusión de doble tornillo admite materias primas con mayor porcentaje de grasa y humedad y permite procesar productos muy viscosos y también en polvo (Leonard *et al.*, 2019), siendo este tipo de extrusor más versátil que el de tornillo simple, pero también más caro.

Así pues, teniendo en cuenta que el objetivo que se desea en este estudio es aumentar la cantidad de proteína y compuestos nutritivos y conseguir una expansión y textura adecuadas, las variables del proceso utilizadas van a depender de qué materia prima se use. Para determinar estos parámetros se tiene en cuenta el desarrollo de la expansión del snack y los cambios que sufren los compuestos a lo largo del proceso.

La expansión, según Kokini *et al.* (1992), comprende diferentes etapas. Hay una expansión inicial de la masa cocida, que a menudo es seguida por una fase de contracción antes de que la masa solidifique. Después de salir del extrusor por la boquilla, la masa fundida se expande debido a la caída repentina de la presión, ya que pasa de presión elevada a presión atmosférica, y esto resulta en una evaporación de la humedad interna. La masa se expande hasta que su temperatura disminuye por debajo de su T_g , donde cesa la expansión por el aumento en la viscosidad asociado a la transición vítrea. Por lo tanto, y reincidiendo, el crecimiento de los poros y la expansión de la masa cocida se ven fuertemente afectados por las propiedades reológicas y por la T_g de la mezcla, que a su vez están influenciadas por los ingredientes utilizados y las condiciones de proceso.

A priori, parece que las altas presiones, velocidades de tornillo y temperaturas son las condiciones óptimas para llevar a cabo la operación, ya que con la temperatura se favorecen las reacciones de Maillard, la gelatinización del almidón, y la destrucción de compuestos indeseables, y con las altas presiones y velocidades se consigue una alta SME, viscosidad de la mezcla y una expansión más notable. De forma general, las condiciones óptimas suelen ser las siguientes: temperaturas de barril 120-180°C, velocidades de rotación de tornillo de 100-600 rpm, humedad de alimentación 8-30%, y presiones 95-140

bar. Sin embargo, a veces no se da el valor de la presión, sino la relación de compresión del tornillo que, Según Beltrán y Marcilla (2012), “es la relación volumétrica de las vueltas del filete en las zonas de alimentación y de dosificado” y se suele expresar en términos de la relación de profundidades del canal en ambas zonas. Las relaciones de compresión típicas oscilan entre 2.0 y 4.0. Una zona de dosificado de pequeña profundidad, es decir, alta relación de compresión implica mayor velocidad de cizalla sobre la masa para una velocidad de tornillo determinada, y se asocia también con un gradiente de presión mayor (Beltrán y Marcilla, 2012). Sin embargo, hay ciertos matices y excepciones que tienen que ver con los cambios que cada nutriente experimenta dentro del extrusor en función de las condiciones operativas aplicadas.

2.2.1 Proteína

El consumo de proteína es muy importante en la nutrición humana, ya que permite incorporar aminoácidos que, si no fuera por la dieta, el organismo no podría aprovechar para llevar a cabo sus funciones, pues no los sintetiza (Martínez y García, 2012). Son los EAA, como la lisina, treonina o metionina, entre otros. Por tanto, la proteína está conformada por aminoácidos. A esta conformación se le conoce como estructura primaria. Sin embargo, esta macromolécula necesita tener una disposición en el espacio determinada para poder estar activa. Así pues, adopta la estructura secundaria cuando los hidrógenos de la secuencia primaria interactúan entre sí. Al plegarse, presenta una disposición tridimensional, que recibe el nombre de estructura terciaria, que es específica de cada proteína y determina las características fisicoquímicas de la misma. Pero, en su mayoría, las proteínas se componen de más de una cadena polipeptídica, dando lugar así a la estructura cuaternaria, un complejo macromolecular mayor. Si estas dos conformaciones se alteran, la funcionalidad de la proteína también. La alteración de las estructuras cuaternaria y terciaria recibe el nombre de desnaturalización proteica, muchas veces favorecida por las altas temperaturas.

Hay diferentes estudios sobre la desnaturalización y la digestibilidad de la proteína. A altas temperaturas, se ha visto, por un lado, que la desnaturalización proteica y la formación de nuevos compuestos mediante, por ejemplo, puentes disulfuro, hace que la digestibilidad de la proteína disminuya. No obstante, otros estudios han demostrado que esta desnaturalización deja abierta a la proteína, con mayor superficie para que las enzimas se unan, facilitando ese proceso de digestión enzimática (Alonso y Marzo, 2000).

Por otro lado, se ha visto que la extrusión inactiva FANs, lo que implica que la macromolécula en cuestión esté biodisponible. Las legumbres contienen inhibidores de proteasas, las enzimas que digieren las proteínas. Cuando el inhibidor se une a la proteasa, el organismo humano no asimila la proteína y al final la acaba excretando. Por eso es importante no sólo incorporar proteína, sino determinar su funcionalidad. Una temperatura de extrusión de 140°C ha demostrado ser efectiva contra ese tipo de FANs en trigo y salvado de arroz. Se vio también que, a una velocidad de tornillo de 180 rpm, el inhibidor de la

proteasa se redujo en un 88-91% en un extrudido africano a base de fruta de pan, maíz y soja (Nikmaram *et al.*, 2017).

Singh *et al.* (2007) concluyeron que temperaturas superiores a 180°C y humedades inferiores al 15% favorecen las reacciones de Maillard, suponiendo esto una pérdida notable del aminoácido esencial lisina. Trabajando a temperaturas inferiores a 180°C, como por ejemplo 140°C, se logra minimizar la pérdida de lisina e inactivar los FANs como los inhibidores de proteasas o los taninos, que tienen tendencia a unirse a las proteínas y enzimas digestivas, dificultando la digestión de los complejos formados (Aletor, 1993). Usar temperaturas medias en el proceso hace que se conserve la proteína, no sólo porque se reduce la pérdida de digestibilidad, sino porque no se implican tanto en las reacciones de Maillard (Leonard *et al.*, 2019).

En cuanto a la expansión y no a la funcionalidad proteica, una variación en la temperatura y la humedad de la alimentación no siempre influye significativamente en los resultados.

En el caso de Philipp *et al.* (2017) la humedad de la alimentación sí que influyó en la expansión, siendo ésta mayor a humedades bajas. Así pues, las muestras extrudidas a base de arroz y proteína de guisante, con una humedad del 23% presentaron mayor expansión que las de 26%. Parece que las altas humedades hacen disminuir la viscosidad e inhiben la expansión del poro. En cuanto a la velocidad, por lo general, a mayor velocidad de tornillo mejor expansión y menor densidad aparente. La expansión se estudió en dos niveles, siendo éstos 400 y 600 rpm, y el resultado fue que la expansión era mejor a velocidades de 600 rpm. En este caso, el aumento de la velocidad del tornillo dio como resultado una diferencia de presión mayor en el troquel, dando lugar a una mayor evaporación y, por lo tanto, una mayor expansión de la masa fundida después de salir del extrusor.

Meng *et al.* (2010) vieron que, para un snack a base de garbanzo, en un intervalo de velocidades de 250 a 320 rpm, la SME aumentó proporcionalmente a la velocidad del tornillo. La SME influye en el comportamiento viscoelástico del material durante la extrusión y, según Moraru y Kokini (2003), normalmente resulta en una expansión buena y deseada. Sin embargo, la expansión depende del grado de cizalla. El aumento de la velocidad del tornillo aumenta la intensidad del tratamiento mecánico y conlleva a la reducción de la viscosidad de la masa cocida por mayor degradación molecular (Xie *et al.*, 2012). Fang *et al.* (2013) afirmaron que el aumento de la SME conlleva una mayor despolimerización de las proteínas, dando lugar a proteínas de menor peso molecular. También ocurre lo mismo en el caso del almidón. En apartados posteriores se verá que altas velocidades del tornillo no siempre implican buena expansión, debido a la degradación molecular.

En el estudio en cuestión de Meng *et al.* (2010), el aumento del contenido de humedad de alimentación no tuvo efecto sobre la SME y la expansión, ya que el rango de trabajo era relativamente estrecho (16-18%).

Cuando la materia prima tiene alto contenido en proteína, la SME es menor en comparación a la obtenida en la extrusión de cereales. En este caso, en el que la materia prima es garbanzo, el alto contenido de proteína y bajo contenido de almidón de la mezcla de alimentación dio como resultado menor viscosidad de la masa, y por eso la SME observada en el estudio fue menor. De ahí que la expansión sea menor a mayor contenido en proteína.

Igualmente, Singha *et al.* (2018) obtuvieron extrudidos expandidos deseables con alto nivel de proteína, con mezclas que contenían 20% de granos secos de destilería (DDG), extrudidos a una temperatura de 140°C, velocidad de tornillo de 167 rpm y un 19% de humedad de alimentación. Mayor temperatura de extrusión y mayor porcentaje de DDG ocasionaron un descenso en la luminosidad del producto, debido a las reacciones de Maillard, ya que los productos de destilería son muy ricos en proteínas. No se puede determinar si es más o menos aceptable, ya que este tipo de productos no son comunes en el mercado y no hay un estándar de color que diga cuál es el óptimo. Sin embargo, tras análisis estadístico se obtuvo que los productos mejor extrudidos y con mayor aceptación fueron los que se procesaron a la temperatura más alta del estudio, y a una velocidad de tornillo intermedia, siendo el rango estudiado de 100 a 200 rpm.

Por tanto, y como se puede observar en los diferentes estudios, se desea una temperatura de trabajo de aproximadamente 140°C, a la cual se destruyen los principales FANs, se minimizan las reacciones de Maillard (y con ello la pérdida de EAA), la dureza y pérdida de luminosidad. Se desea una velocidad de tornillo relativamente alta, intermedia en algunos casos, con el fin de aumentar la SME y la expansión. Si bien es cierto esto, todo depende de la materia prima que se utilice y de la cantidad de proteína y almidón que la mezcla tenga. En esta línea se podría evaluar utilizar materias primas con alto contenido en proteína, pero también con una parte importante de almidón, que no sean cereales. Por ejemplo, el garbanzo es una legumbre muy interesante, ya que no contiene gran cantidad de FANs, lo cual es una ventaja a la hora de aplicar la temperatura de trabajo, y tiene un 24,4% de proteína, 9% de fibra y un 60% de carbohidratos complejos, de entre los cuales el almidón representa un 50%.

2.2.2 Almidón

El almidón es un componente muy importante en este tipo de técnica de procesado. Es la base de prácticamente todos los extrudidos que existen actualmente, y es el principal responsable de la estructura porosa y expandida que los caracteriza.

Ya se ha comentado anteriormente que para que se produzca la expansión, el almidón debe estar gelatinizado y, según Cunningham (1996), los parámetros que significativamente afectan a la conversión del almidón en extrusión de doble tornillo son la SME, la humedad de alimentación y los sólidos presentes.

Una SME más alta generalmente resulta en un mayor grado de gelatinización del almidón y expansión del extrudido. Por lo tanto, se desea un mayor SME para expandir los productos (Meng *et al.*, 2010). Sin embargo, esto no implica que una alta velocidad del tornillo, por su buena correlación con la SME, sea

favorable y conlleve mayor expansión del extrudido. El WAI evalúa el grado de gelatinización del almidón (Ding *et al.*, 2005) y, en un estudio de extrusión de mezclas a base de copos blancos de soja, se vio que el WAI era menor a mayor velocidad del tornillo (Singh y Muthukumarappan, 2017). Cuanto mayor era la cizalla, había más polímeros dañados y la disponibilidad de grupos hidrofílicos capaces de unirse a las moléculas de agua era menor. De ahí que se obtuvieran valores más bajos de WAI a altas velocidades de tornillo.

En cuanto a la humedad en la alimentación, por regla general, cuanto mayor sea ésta, menor índice de expansión se obtiene, ya que aumenta la densidad aparente debido a la plastificación de la masa fundida, disminuyendo así su elasticidad, la SME y la gelatinización. Esto puede explicar la pérdida de expansión al aumentar la cantidad de humedad del 12 al 16% en un snack a base de almidón y proteína de guisante, y fibra de avena (Saldanha do Carmo *et al.*, 2019). Por el contrario, un contenido de humedad más bajo aumenta la viscosidad aparente de la suspensión, lo que a su vez afecta la SME impartida y genera una presión más alta en el extrusor, cosa que afectará a la expansión por la diferencia de presiones a la salida por la boquilla.

El contenido en humedad también afecta a otros atributos, como el color. En este mismo estudio, las muestras procesadas en el valor de humedad más baja mostraron la menor luminosidad de todos los extrudidos y los valores más altos de *a* (más oscuros y amarronados) y también de *b* (parámetros del espacio CIELab), consecuencia de las reacciones de Maillard. Sin embargo, para este tipo de snacks fueron deseables estas características. Se obtuvieron snacks crujientes y jugosos, con sabor a maíz tostado, y los atributos típicos de sabor a cereal. A mayor humedad se obtuvieron extrudidos con mayor dureza, tenacidad, y poco crujientes, es decir, inaceptables.

De la Rosa-Millán *et al.* (2019) declararon que la dextrinización, que envuelve la hidrólisis y repolimerización del almidón en dextrinas, puede tener lugar en condiciones de poca humedad y alto grado de cizallamiento. Vieron mayor proporción de almidón dañado a mayor temperatura. Las altas temperaturas y la cizalla mejoran la digestibilidad del almidón, pues aumentan la superficie disponible para su hidrólisis, haciéndolo menos resistente a la acción enzimática (Rafiq *et al.*, 2017).

Por otro lado, Berrios *et al.* (2010) vieron un aumento significativo de 5-17% en el contenido total de carbohidratos disponibles (TAC) en extrusión de harinas de lenteja, garbanzo y guisante. Este aumento seguramente sea debido a la ruptura celular, causando una modificación estructural en los carbohidratos y mayor porosidad en su pared celular, cosa que hace más fácil la difusión del agua al interior de los extrudidos y, por tanto, que los carbohidratos estén más disponibles. Sin embargo, estos autores observaron justo lo contrario al trabajar con guisante y garbanzo a una temperatura de extrusión de 160°C. Y, en estudios anteriores, Alonso *et al.* (2001) afirmaron que el contenido en TAC de las harinas a base de alubias no cambió significativamente después de haber sido extrudidas a temperaturas de trabajo de 150-155°C.

Estas diferencias entre los resultados de los distintos estudios se explican por la variación en los parámetros de extrusión y por la variabilidad de la materia prima empleada.

La materia prima que se utiliza y su composición tiene gran importancia en la elección de las condiciones operativas. En apartados anteriores se ha mencionado el caso de la castaña, rica en sacarosa y azúcares reductores. La presencia de estos sólidos no sólo limita la expansión del almidón, sino el uso de temperaturas elevadas, pues los azúcares reductores son los implicados en las reacciones de Maillard. El sabor y color consecuente puede ser deseable o no, dependiendo del grado en que se desarrollen estas reacciones. En este estudio se vio que el extrudido a base de arroz y castaña fue aceptable con un contenido en castaña del 30% y una temperatura de trabajo de 120°C. Temperaturas inferiores hacen que el almidón no gelatinice bien. No obstante, es importante controlar adecuadamente la temperatura, ya que las reacciones de Maillard pueden llevar a la formación de acrilamida, compuesto carcinogénico. La acrilamida se ve favorecida por la presencia de ciertos aminoácidos como la asparragina o la treonina, el primero presente en el arroz (materia prima usada en el estudio en cuestión), y el segundo presente en la castaña. Así mismo, el uso de extrusores de doble tornillo fomenta la aparición de este compuesto por su alto grado de cizallamiento (Singh *et al.*, 2007). Por tanto, aunque para gelatinizar el almidón por regla general se requieran altas temperaturas, es necesario conocer la composición de la materia prima para evitar compuestos indeseables.

2.2.3 Fibra

Con el objetivo de incorporar proteína a los extrudidos y así mejorar su valor nutricional se ha utilizado en la mayoría de los casos legumbres, por ser éstas una materia prima relativamente barata y altamente funcional, pues contienen grandes cantidades de proteína y fibra. La fibra se puede clasificar en dos grupos: fibras solubles y fibras insolubles. El primer grupo comprende las fibras fermentables y viscosas (oligosacáridos, pectinas, β -glucanos, y galactomananos), y el segundo hace referencia a las que son escasamente fermentables y degradadas, insolubles y no viscosas (celulosa, hemicelulosa y lignina) (Martínez y García, 2012).

Además de las legumbres se ha estudiado la adición de subproductos de la industria alimentaria, ricos también en proteína y fibra, como es el caso de la torta desgrasada de cáñamo, subproducto de la producción de aceite, así como de los DDG, entre otros. Por ello, también se ha investigado sobre el efecto de la extrusión en este componente, la fibra, y cómo influye esta fracción en la reología de la masa, en la expansión y características organolépticas del producto final, ya que su incorporación no es sólo interesante a nivel de salud, sino también a nivel medioambiental mediante la utilización y aprovechamiento de estas corrientes residuales.

Así pues, la fibra es un componente mayoritario en los subproductos de origen vegetal y, tras haber estudiado ampliamente el contenido final en fibra dietética total (TDF) en los snacks, se ha llegado a diferentes conclusiones. Un estudio

con harina de cebada (Vasanthan *et al.*, 2002) condujo a un mayor contenido en fibra total al final del proceso de extrusión. Sin embargo, en un estudio de un snack con harina de guisante y arroz se vio todo lo contrario (Arribas *et al.*, 2017). El contenido final depende de la temperatura, de la humedad de la alimentación y de la cantidad de cizalla ejercida.

Las altas temperaturas y velocidades del tornillo tuvieron un efecto de aumento de la TDF en un snack de salvado de trigo (Rashid *et al.*, 2015). Este estudio explica que es debido al mayor contenido en fibra soluble y la formación de almidón resistente durante el almacenamiento por retrogradación de la amilosa (RS3). La extrusión induce la formación de compuestos que reaccionan con el almidón y lo hacen resistente, y el RS3 es considerado un tipo de fibra soluble (Villarroel *et al.*, 2018). Otros autores, sin embargo, han visto que bajo esas mismas condiciones se reduce el contenido de la TDF. Ellos explican que las fibras solubles formadas eran tan pequeñas en su estudio que, en el ensayo para la determinación de fibra, el alcohol era incapaz de encontrarlas y hacerlas precipitar, obteniendo valores de TDF inferiores (Jan *et al.*, 2017).

Se ha concluido muchas veces que la fibra reduce la expansión del extrudido, pero hay que diferenciar entre los dos tipos de fibra. La fibra insoluble es la que diluye al almidón, plastificando la masa y haciendo que la gelatinización sea más débil. Sin embargo, la fibra soluble mejora la expansión porque acelera la formación de vapor en el extrusor y ayuda en el crecimiento de las burbujas de aire y, por regla general, la extrusión mejora la proporción de fibra soluble (Leonard *et al.*, 2019 y Chaiyakul *et al.*, 2009). Brennan *et al.* (2008) confirmaron que la reducción de la expansión y aumento de la densidad en los extrudidos, normalmente atribuida a la fibra dietética en general, es debido a las mezclas que contenían fracciones de fibra insoluble.

Hay que tener en cuenta también las demás fracciones de estos subproductos. Por ejemplo, en snacks producidos a base de sémola de maíz, el añadir semilla de lino o manzana empeoraba más la expansión que si se añadía pulpa de patata o rosa mosqueta. Este estudio apunta a que es debido a los lípidos de la semilla de lino, que lubrican y reducen la cizalla, y a las pectinas y azúcares de la manzana (Tomaszewska-Ciosk *et al.*, 2019). Por eso, se han buscado alternativas al aumento de temperatura y velocidad del tornillo, para aumentar la expansión cuando se incorporan subproductos. En este estudio se investigó sobre el efecto del etanol como agente de expansión. Se vio que la adición de etanol mejoraba el ratio de expansión, sin diferencia en función de la concentración de etanol añadido (2 y 4%). Esto permite y permitió utilizar temperaturas de extrusión más bajas, impidiendo así que ciertos componentes termosensibles, como los antioxidantes o vitaminas, se perdieran. A su vez, un aumento en la temperatura y la presión supuso un aumento en la expansión al aumentar la presión de vapor del agua y del etanol.

Otros agentes de expansión utilizados han sido N₂ y CO₂. En el caso de un estudio de snacks extrudidos a base de harinas de guisante y lentejas rojas (Chan *et al.*, 2018), se usaron gases de N₂ y CO₂ para la extrusión de harina de guisantes, y gas N₂ durante la extrusión de harina de lentejas rojas (en presencia de CO₂, los extrudidos hechos de harina de lentejas rojas no

podieron retener el gas en el barril). Se utilizó una temperatura de 150°C. Se observó un leve, pero significativo, aumento en la expansión en los extrudidos a base de guisante tratados con N₂. En cuanto a la microestructura, los agentes de expansión mejoraron la distribución de las burbujas de aire en el interior del producto, aumentando la nucleación y su homogeneidad. Los agentes de expansión también mejoraron la textura crujiente. Además, ésta no sólo se midió en seco, sino con el producto en húmedo. La capacidad que tiene el producto de conservar esta propiedad en húmedo se llama “vida de bol”. En este sentido, el nitrógeno empeoraba la textura crujiente en húmedo. Sin embargo, en el caso del CO₂, no fue significativa la diferencia entre usar el gas o no, pero sí que se vio un leve aumento de la textura crujiente en húmedo en el caso de los extrudidos de harina de guisante. Por tanto, el uso de N₂ se recomienda en extrudidos listos para el consumo, en seco, y el de CO₂ en productos donde se requiera mayor “vida de bol”.

Volviendo a la fibra, se suele decir que ésta reduce la expansión, debido a la competitividad que tiene con el almidón por el agua. En algunos casos, se ha visto que altos valores de velocidad de tornillo no son favorables porque se reduce el WAI por ruptura de componentes (tanto almidón como fibra) que puedan formar enlaces con el agua. El WAI se redujo en el caso de adición de DDG y altas velocidades de tornillo (Singha *et al.*, 2018). No obstante, se ha comentado que, en otros casos, esta condición y las altas temperaturas mejoran la proporción de fibra soluble, que mejora la expansión. En cualquier caso, se puede incluir agentes gaseosos de expansión con el fin de mejorarla. El uso de uno u otro dependerá de la materia prima utilizada, de la solubilidad del agente en ella y del uso que se le prevea dar al producto final. Habrá que controlar la presión de inyección, dependiendo de la materia prima, pues en algunos casos las altas presiones (más de 300 kPa) aumentan la dureza del extrudido (Koksel y Masatcioglu, 2018).

Para concluir el apartado de snacks extrudidos y, a modo de resumen, la *Tabla 1* muestra cómo influyen, por regla general, las variables independientes y controlables del proceso en las dependientes. Igualmente, se resume en la *Tabla 2* el efecto que conlleva en el desarrollo y características del snack final la incorporación de los diferentes componentes estudiados. Además, en la *Tabla 3* se presenta una recopilación, de las materias primas y de las condiciones del proceso empleadas de los principales productos extrudidos estudiados en los últimos años.

Tabla 1. Influencia de las variables independientes sobre las variables dependientes

VARIABLES INDEPENDIENTES	VARIABLES DEPENDIENTES					
	Presión	Temperatura salida	WAI	WHC	SME	Expansión
Temperatura	↓	↑	↑ (por alta gelatinización) ó ↓ (por elementos muy dañados)	↑ ó ↓ (igual que WAI)	↓	↑
Humedad	↓	↓	↑ (por presencia de fibra) ó ↓ (por carencia de gelatinización)	↑ ó ↓ (igual que WAI)	↓	↓
Velocidad tornillo	↓	↑	↓	↓	↑	↑ ó ↓ (por degradación molecular)

Tabla 2. Efectos sobre el snack final que tienen los principales componentes en extrusión

COMPONENTE	EFEECTO
Almidón	↑ expansión, viscosidad de la masa, WAI y WHC
Proteína	↑ densidad aparente, ↓ expansión, ↑ dureza, ↓ Tg masa y la SME
Fibra soluble	↑ expansión y WHC
Fibra insoluble	↓ expansión, diluye al almidón
Azúcar	↑ Tg almidón, dureza y color oscuro y ↓ expansión

Tabla 3. Materias primas y condiciones del proceso de extrusión estudiadas en los últimos años

PRODUCTO	FUENTE PROTEICA	OTROS COMPONENTES	CONDICIONES DEL PROCESO	EXPANSIÓN EN EL SNACK FINAL	REFERENCIA
Snack expandido principalmente a base de guisante y avena	Fracciones ricas en guisantes y avena enriquecidas en proteínas	Almidón de guisante y fibra de avena	La formulación final fue de 50% de almidón de guisante, 40% fibra de avena y 10% proteína de guisante. Temperatura 146-175°C, 11,2-16,8% de humedad (bs), 200 rpm	La mayor expansión y crujencia se obtuvo con una Tª de 160°C, 200 rpm y el menor contenido en humedad (11,2% bs)	Saldanha do Carmo <i>et al.</i> , 2019
Snack extrudido principalmente a base de arroz glutinoso	Arroz	Gluten de trigo y sémola de soja	Temperatura 150 y 180°C, 400 rpm y 20, 25 y 30% de humedad (bh)	Se obtuvo la máxima expansión bajo las condiciones de 20% (bh) de humedad y 180°C.	Chaiyakul <i>et al.</i> , 2009
Snack extrudido a partir de harina de castaña y arroz	Harina de castaña	Harina de arroz	Temperatura 90, 105 y 120°C, 80 rpm, 35% de humedad y 2,5-3 MPa de presión	Un 30% de castaña en el snack extrudido a 120°C mostró el mejor rendimiento, lo que resultó en un producto tipo snack bien gelatinizado y bien expandido con buenos atributos sensoriales	Sacchetti <i>et al.</i> , 2004
Snack extrudido a base de guisante y arroz	Proteína de guisante	Almidón de arroz	Temperatura 130 y 150°C, 23 y 26% de humedad, 400 y 600 rpm	Buena expansión con 10% de proteína y altas velocidades de tornillo	Philipp <i>et al.</i> , 2017
Snack extrudido a base de harina de garbanzo	Harina de garbanzo	Almidón de patata, lecitina de soja, suero concentrado	Temperatura 150-170°C, 250-320 rpm y 16-18% de humedad	Buena expansión a baja humedad, altas velocidades de tornillo y temperaturas de barril intermedias	Meng <i>et al.</i> , 2010
Snack extrudido a base de granos de maíz con adición de subproductos ricos en fibra y etanol	Maíz	Fibra y etanol	Adición de fibra mediante semillas de linaza, orujo de manzana, rosa mosqueta o pulpa de patata a niveles de 0%, 10% o 20% (bs), con 12% de agua. Adición de 2% o 4% de etil etanol. Temperatura 170°C, 200 rpm.	La adición de los subproductos causó una disminución en la relación de expansión y un aumento en la dureza de los snacks. La presencia de etanol aumentó la relación de expansión de los snacks.	Tomaszewska-Ciosk <i>et al.</i> , 2019
Snack extrudido a base de harina de garbanzo, granos de destilería y sémola de maíz. Snack nutritivo sin gluten, rico en proteínas y fibra dietética.	Harina de garbanzo y granos de destilería	Sémola de maíz	Temperatura 100-140°C, 100-200 rpm, relación de compresión de tornillo 1,5:1.	Las condiciones óptimas fueron: 20% de DDG, 140°C, 167 rpm y 19% de humedad	Singha <i>et al.</i> , 2018
Snack extrudido a base de harina de cacahuete, de trigo sarraceno y de mezcla de arroces.	Cacahuete, trigo sarraceno y arroz		Harina de cacahuete y de trigo sarraceno en una proporción de 1:2. Esta mezcla (PBF) se mezcló luego con harina de arroz en una proporción del 100%. Temperatura 120-140°C, 15-25 Hz de velocidad de tornillo, 18-22 % de humedad.	Las variables óptimas del proceso fueron: 25% de PBF, 22% de humedad, 120°C y 25 Hz de velocidad del tornillo.	Li <i>et al.</i> , 2019
Snack extrudido a base de maíz, enriquecido con torta de cáñamo desengasada	Torta de cáñamo desengasada	Sémola de maíz y la fibra de la torta de cáñamo desengasada	Se añadió un 5 y 10% de torta de cáñamo y se estudió la humedad a un 15, 20 y 25%. Temperatura 120 y 150°C, 100 rpm.	Las condiciones óptimas fueron 5% de torta de cáñamo desengasada, 15% de humedad y 150°C.	Jozinović <i>et al.</i> , 2017
Snack extrudido a base de harina de guisante amarillo y lentejas rojas, con agentes de expansión	Guisante y lentejas	Agentes de expansión (nitrógeno y dióxido de carbono)	Temperatura 150°C, 200 rpm, 18% humedad, 300 kPa de presión de inyección de los gases.	Los agentes de expansión mejoraron la expansión, generando burbujas de aire más pequeñas, finas y más distribuidas.	Chan <i>et al.</i> , 2018

3. TEXTURIZACIÓN DE PROTEÍNAS

El consumidor busca alimentos saludables, naturales y exige que éstos sean medioambientalmente sostenibles. La industria debe satisfacer estas demandas, pero sin olvidar que, además, los nuevos alimentos han de cubrir sus expectativas en cuanto a cualidades organolépticas y sabor (AINIA, 2017). Volviendo a la versatilidad que esta tecnología ofrece, la extrusión es capaz de texturizar proteínas bajo unas determinadas condiciones operativas, y crear

análogos de carne (HMMA). Estos productos son muy interesantes, ya que el consumo global de carne ha ido reduciéndose debido a una mayor conciencia social, ecológica, ética y saludable (Samard y Ryu, 2019a). Así mismo, los estudios e informes apuntan a que para 2050 la población mundial alcanzará la cifra de 9 millones de habitantes y se prevé que será necesario un 70% más de alimento para poder abastecer a todo el mundo (Aiking, 2011). Y es una evidencia que la producción de carne y el mantenimiento de estos animales en granja tiene mucho más impacto ambiental que el cultivo de plantas o incluso insectos, los cuales necesitan menos recursos (Nijdam *et al.*, 2012).

Es imprescindible, por tanto, el desarrollo de nuevas matrices alimentarias, altamente proteicas, que puedan reemplazar, al menos parcialmente, a las proteínas de origen animal. Estas nuevas matrices alimentarias estudiadas han sido principalmente de origen vegetal. Sin embargo, aunque el consumidor demande este tipo de productos más sostenibles, no es capaz de prescindir de la sensación en boca que la carne ofrece, y por eso los análogos de carne adquieren gran importancia.

Así pues, ¿qué es la texturización proteica y cómo se consiguen los análogos de carne? Aunque en los siguientes subapartados se responde a estas preguntas de una manera más concreta, a modo de introducción y según Samard y Ryu (2019a), texturización es el proceso de convertir un agregado de proteína en una estructura fibrosa. Esto se consigue sometiendo a la proteína a una situación de estrés, provocando su desnaturalización, orientación y reorganización de los nuevos agregados. Los análogos de carne son un producto proteico hecho a base de materias primas de origen vegetal, que contienen EAA, son bajos en grasas saturadas y carecen de colesterol. En este proceso la protagonista es la proteína, y no el almidón, ya que es ésta la responsable de ofrecer esa textura semejante a la del músculo animal.

A continuación, se exponen las condiciones operativas y las principales materias primas estudiadas en el proceso de texturización para la obtención de análogos de la carne.

3.1 MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS Y COMPONENTES DE INTERÉS

A diferencia del proceso de extrusión en caliente, que tiene como objetivo producir snacks expandidos, la texturización proteica tiene como meta producir productos fibrosos y con textura parecida a la del músculo animal. Estos productos son demandados por la población vegana y vegetariana, entre otros.

Tal y como se ha estudiado en apartados anteriores, la incorporación de proteína a los snacks reduce la expansión. Por tanto, no es de extrañar que, si el principal ingrediente en este proceso es la proteína, se obtengan productos duros, firmes y consistentes, y que sea necesaria la hidratación para su consumo, como ocurre en los productos *topping* que se consumen directamente (AINIA, 2019c). Los materiales texturizados también se pueden incluir en otros productos como ingrediente constitutivo del alimento. La obtención de un texturizado u otro depende de las condiciones operativas,

básicamente del contenido en humedad. Por eso, se distinguen dos tipos de texturización: con altas humedades (HMEC) y con bajas humedades (LMEC).

Cuando la finalidad es conseguir una determinada textura, similar a la de la carne, la incorporación de proteína no tiene tanto el objetivo de aumentar el valor nutricional, sino que se busca su capacidad funcional y propiedades tecnológicas. Así pues, es de gran interés su capacidad emulsionante, su solubilidad, su capacidad espumante y gelificante y, también, la WHC y OHC (capacidad de retención de aceite); estas propiedades juegan un papel esencial en la formación de la estructura proteica deseada (Kyriakopoulou *et al.*, 2019).

Por regla general, y logrando el objetivo de obtener productos más saludables, los texturizados o análogos de carne suelen ser bajos en grasas (Kyriakopoulou *et al.*, 2019). En el proceso de extrusión en caliente, ésta actúa como lubricante y, por tanto, es de interés reducir su contenido para obtener snacks expandidos. En el caso de la texturización, la grasa juega un papel importante, pues contribuye a la jugosidad, hace que el producto sea tierno y, además, le aporta sabor (Reig *et al.*, 2008).

En la *Tabla 4* se recogen las principales materias primas de origen vegetal altamente proteicas, que se han estudiado en la tecnología de texturización. Seguidamente, se analizan las más usadas, las que actualmente se encuentran en el mercado y sus aplicaciones.

Tabla 4. Principales fuentes de proteína vegetal estudiadas (Kyriakopoulou *et al.*, 2019)

Proteínas de oleaginosas	Soja, colza/canola, algodón, cacahuete, semillas de girasol, sésamo, cártamo, linaza
Proteínas céreas	Trigo, maíz, arroz, cebada, avena, sorgo
Proteínas de leguminosas	Alubias, garbanzos, lentejas, guisantes

Actualmente, la mayoría de los productos texturizados o análogos de carne están hechos a base de soja. La soja tiene una textura y un sabor muy parecido al de la carne, además de ser barata. Presenta, también, muy buenas cualidades tecnológicas. Se puede aislar y concentrar, siendo el contenido en proteína un 90 y un 70% respectivamente (Kyriakopoulou *et al.*, 2019). Para ciertas recetas se prefieren los aislados de proteína, pues el color y el sabor son más tenues. No obstante, en cuanto a los análogos de carne esto no es significativo. Sin embargo, sí lo es por otro lado, pues los aislados son más puros y, por tanto, contienen más proteína y menos cantidad del resto de componentes. Y éstos muchas veces son fundamentales para conseguir simular la textura cárnica. Tolstoguzov (1993) destaca que la presencia de una fase dispersa, por ejemplo, constituida por proteína o polisacáridos, puede contribuir a la formación de estructuras anisotrópicas similares a las del músculo. La fase dispersa puede ser resultado de la presencia de agua libre que se embebe dentro de la matriz del biopolímero, o también por la presencia de otros biopolímeros termodinámicamente incompatibles. Cuando esta fase dispersa se forma, las características del flujo en la sección de la boquilla inducen a la deformación, coalescencia y orientación de esta fase dispersa en la dirección del flujo (Pietsch *et al.*, 2019a). Además, con el uso de

concentrados en lugar de aislados, el aporte de grasa es ligeramente mayor y con ese mínimo aporte, se obtendrá un texturizado un poco más jugoso.

Se han obtenido exitosamente estructuras anisotrópicas con proteína de soja concentrada (Pietsch *et al.*, 2019b), aislada, gluten de trigo (Pietsch *et al.*, 2019a) y proteína aislada de guisante (Osen *et al.*, 2014). Esta última fuente proteica es de gran interés, pues el guisante es una de las legumbres que proporciona altos niveles de EAA y tiene bajo potencial en la inducción de respuestas alérgicas (Samard y Ryu, 2019b), cosa que la soja y el trigo tienen como inconveniente.

En el siguiente apartado se explican los dos tipos de texturización y cómo se obtiene la estructura anisotrópica necesaria para simular el músculo cárnico.

3.2 CONDICIONES DE LA TÉCNICA

Hasta ahora se ha visto que hay algunos parámetros de proceso que actúan como plastificantes de la masa y como lubricantes. Uno de ellos era la humedad de la alimentación. Pues bien, cuando se habla de texturización se pueden distinguir dos maneras de operar: con alta humedad o con baja humedad (Lin *et al.*, 2000). ¿Cómo saber cuándo usar una u otra opción?

Ambos procesos se resumen en tres pasos: preacondicionamiento del material antes de extruirlo, cocción dentro del extrusor y, por último, enfriamiento a la salida, en la boquilla (Riaz, 2004).

La técnica LMEC consiste en las mismas condiciones que las estudiadas en extrusión en caliente, pero con mayor contenido en proteína para poder conseguir la texturización (TVP). Los productos que se obtienen son densos, duros y con poca expansión y, por tanto, deberán ser rehidratados antes de su cocción y consumo en el hogar. Es el caso, por ejemplo, de la soja texturizada. Cuando ésta se rehidrata, cosa que hace con facilidad, adquiere una textura esponjosa. También se pueden rehidratar a nivel industrial para incorporarlos como extensores cárnicos, en salchichas o en cualquier otra carne para mejorar su WHC. Para poder texturizar una proteína, la materia prima debe tener unos determinados valores de proteína, fibra y lípidos. La *Tabla 5* muestra esos valores.

Tabla 5. Composición química requerida de la soja u otras fuentes vegetales para ser texturizada (TVP) (Applewhite, 1989; Berk, 2018)

COMPONENTE	CANTIDAD
Proteína	≥45-50%
Fibra	3,5-8%
Lípidos	0,5-6,5%

En el caso de HMEC, se utilizan humedades de alimentación del orden del 60-70% y temperaturas hasta los 140°C (AINIA, 2019c), alcanzando a veces los 160 o 180°C. Por tanto, se obtienen productos más húmedos, de 40-65% de agua, tal y como indica la *Tabla 7*.

Tabla 7. Composición química final requerida en un producto texturizado con alta humedad (HMEC) (Knoch, 2016)

COMPONENTE	CANTIDAD
Proteína	20-30%
Agua	40-65%
Lípidos	<10%

Generalmente se utilizan extrusores de doble tornillo, como el de la *Figura 3*. Hay una diferencia fundamental entre éstos y los vistos en extrusión en caliente. Se trata de la boquilla, que es larga e incorpora un sistema de enfriamiento que permite bajar la temperatura de la masa hasta los 70-80°C o incluso en algunos casos hasta los 50°C. La longitud y temperatura de la boquilla de enfriamiento son dos características a tener en cuenta, pues será durante esa fase de enfriamiento principalmente cuando las interacciones entre proteínas se lleven a cabo (Osen *et al.*, 2014) y se produzca una orientación de estas redes en la dirección del flujo (Pietsch *et al.*, 2019a). Al enfriarse a la salida del extrusor, la proteína se reorganiza formando enlaces covalentes y no covalentes (AINIA, 2019c). Además, de esta forma se evita la pequeña expansión que la masa pudiera experimentar. Al finalizar este paso, normalmente se congelan las muestras, a -18°C (Zhang *et al.*, 2020) o temperaturas inferiores (-70°C, Samard y Ryu, 2019a) para mejorar la estructura (Giezen *et al.*, 2014).

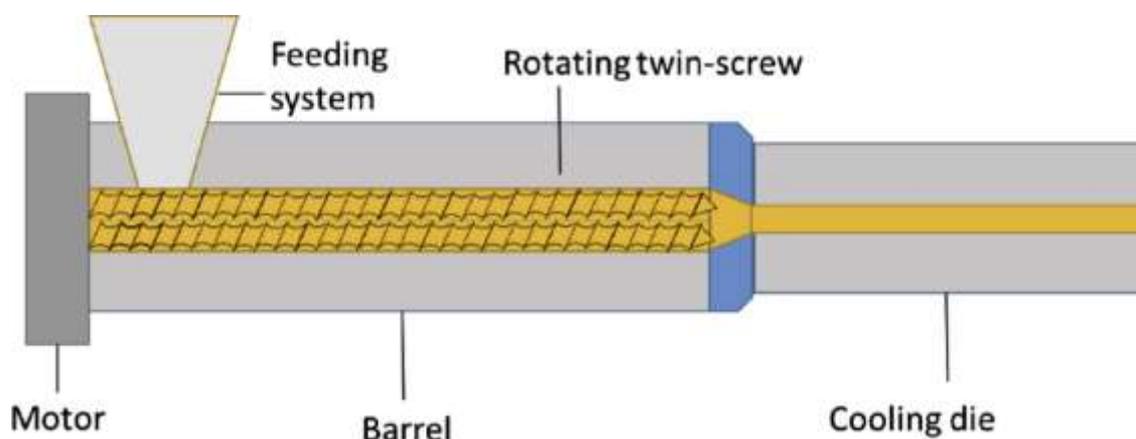


Figura 3. Extrusor de doble tornillo co-rotativo (Kyriakopoulou *et al.*, 2019)

Al igual que en extrusión en caliente, es necesario ejercer control sobre el perfil de temperaturas, la velocidad del tornillo, el caudal de agua a la entrada, el caudal de alimentación y las características fisicoquímicas de la muestra (Kyriakopoulou *et al.*, 2019).

La texturización de una proteína se consigue cuando ésta se despliega, perdiendo su estructura cuaternaria, y siendo accesible a otros compuestos. Por tanto, a mayor temperatura mayor será la desnaturalización, mayor la digestibilidad de la proteína y mayor su texturización. Para medir el grado de texturización se emplea el parámetro WHC, que determinará la cantidad de agua que puede retener la proteína texturizada cuando se rehidrata (Samard y Ryu, 2019b) y la WAC (capacidad de absorción de agua) para determinar las propiedades estructurales. En relación con esto también se mide el índice de integridad, que se refiere al residuo de estructura fibrosa que queda después de que la proteína texturizada haya sido rehidratada, homogeneizada y secada.

Se ha estudiado conjuntamente la texturización de proteína aislada de soja, aislada de guisante, aislada de cacahuete y gluten de trigo (Samard y Ryu, 2019b). En este estudio, se usó una temperatura de extrusión de 140°C, una velocidad de rotación de tornillo de 250 rpm y 50% de humedad de alimentación. Es decir, no se variaron los niveles, sino que bajo esas condiciones se evaluó la capacidad de texturización de esas fuentes proteicas de origen vegetal. Se vio que los valores de WHC eran mayores para la proteína aislada de soja y la aislada de guisante. Pero también la proteína de guisante presentó valores más elevados del índice de integridad, junto con el gluten de trigo, que la proteína aislada de soja y la de cacahuete. Las estructuras fibrosas de la proteína de guisante y gluten de trigo eran más duras y difíciles de romper con altas presiones y temperaturas durante su estancia en el autoclave (Samard y Ryu, 2018 y 2019b utilizaron un autoclave para presurizar las muestras y determinar el índice de integridad). Estas proteínas fueron las que desarrollaron mayor elasticidad, masticabilidad y, bajo estas condiciones operativas, fueron las más adecuadas para producir buenos texturizados.

Es importante tener en cuenta la funcionalidad de la proteína. La solubilidad es un parámetro que está relacionado con el índice de integridad, siendo estos dos inversamente proporcionales. Se evalúa la solubilidad de la proteína a diferentes pH y se compara con la misma sin texturizar. Los resultados indican que las proteínas texturizadas presentan menor solubilidad, en todo el rango de pH, que las proteínas nativas. De entre todas las materias primas, las que obtuvieron valores más bajos de solubilidad fueron la proteína aislada de guisante y el gluten de trigo. Esto conlleva una pérdida de funcionalidad (Ghumman *et al.*, 2016). No obstante, hay que analizar el perfil amonoacídico y tener en cuenta el historial de tratamiento térmico al que se ha sometido a la proteína (Yada, 2004), ya que la cantidad de grupos polares e hidrofóbicos tienen influencia en las capacidades emulsionantes, surfactantes y en la WHC y OHC. Se observó alta capacidad emulsionante en el caso de la proteína aislada de guisante y gluten de trigo, por sus grandes contenidos en aminoácidos hidrofóbicos. Por ello, se concluyó que estas dos proteínas, bajo las condiciones operativas estudiadas, se podrían utilizar como extensores de

carne, y se podrían desarrollar análogos de carne (HMMA) a base de estas dos fuentes proteicas, como alternativa a los análogos a base de soja.

Sin embargo, se debe hacer comparaciones de textura entre los análogos de carne y la propia carne, así como estudiar a diferentes niveles los parámetros de proceso. Samard y Ryu (2019a) hicieron, por primera vez, un estudio comparativo entre los HMMA y las carnes. Estudiaron una muestra de proteína de soja y gluten de trigo en una relación 40:60, y la compararon con carne de vaca, cerdo y pollo, las carnes más consumidas a nivel mundial en 2017. Las condiciones de proceso fueron 250 rpm de velocidad de tornillo y 140°C de temperatura de barril. Al igual que en el caso anterior, el índice de solubilidad del nitrógeno descendió en las proteínas texturizadas, y también en las carnes cocinadas respecto al estado crudo. La solubilidad de la proteína texturizada fue similar a la carne de pollo cocinada. En cuanto al índice de integridad y la WAC, la carne de vaca fue la que presentó una textura más firme y dura después del proceso del autoclave, y la de pollo fue la que más se asemejó a la proteína texturizada, con mayores valores de WAC. Por tanto, en este caso, la textura de la proteína texturizada a base de gluten de trigo y proteína de soja se parecía a la textura de la carne de pollo.

El gluten de trigo es capaz de formar la estructura anisotrópica que confiere la fibrosidad deseada en el análogo de carne. De acuerdo con lo mencionado en el anterior apartado, se reafirma la teoría de la fase dispersa de Tolstoguzov (1993) cuando se aumenta la temperatura de trabajo de 100 a 155°C al texturizar una muestra de gluten de trigo. Los espacios en la matriz proteica del gluten de trigo presentaban una orientación y elongación en la dirección del flujo en la temperatura más alta. Esto formaría la fase dispersa, junto con el agua libre. En HMEC para obtener HMMA, las deformaciones y la orientación dependen principalmente de la geometría del interior del barril, de la temperatura de enfriamiento y de las propiedades reológicas. En el estudio de Pietsch *et al.* (2019a), todos estos parámetros se mantuvieron constantes, a excepción de la temperatura. Se puede explicar la orientación de las proteínas por la movilidad que éstas tienen a diferentes temperaturas. El aumento de temperatura también puede incentivar la polimerización del gluten, lo que aumenta la dureza de la proteína texturizada y forma la estructura anisotrópica. El grado de polimerización depende también de la velocidad del tornillo. A una temperatura constante de 140°C, el aumento de las rpm de 180 a 800 implica la reducción de la cantidad de gluten extraíble, en concreto del 30% al 17%. El gluten que no se extrae es debido a la formación de enlaces covalentes (Lagrain *et al.*, 2008). Por tanto, el aumento de la velocidad de tornillo implica mayor formación de estructura anisotrópica.

Schmitt *et al.*, (1998) apuntaron que el grado de fibrosidad viene determinado por la dirección de la cizalla (longitudinal o transversal), y más cuando a ello se le suma el contenido en humedad. Pietsch *et al.* (2019a) estudiaron la texturización de proteína de cacahuete a altas temperaturas combinadas con altas humedades y vieron que tanto la fuerza de corte longitudinal como la transversal, descienden a medida que aumenta el contenido en humedad a temperatura constante (155°C). Por otro lado, disminuye la fuerza de corte al aumentar la temperatura a una humedad constante (60%). Por tanto,

concluyeron que en esas condiciones no se puede formar una estructura fibrosa.

El aumento de la temperatura no siempre implica la formación de estructuras fibrosas adecuadas. Este aumento conduce a una mayor SME, tal y como apunta la *Tabla 6* y, según Fang *et al.* (2014), esto conlleva a un menor grado de texturización; en su estudio, la proteína de guisante estudiada fue más soluble en el tampón fosfato con el aumento de la SME. Como se ha mencionado antes, a mayor texturización, menor solubilidad, y con el aumento de la SME, el tamaño de los agregados de proteína se reduce, siendo más solubles (menor texturización).

Tabla 6. Influencia de las variables independientes sobre las variables dependientes en HMEC

VARIABLES INDEPENDIENTES	VARIABLES DEPENDIENTES					
	Presión	Temperatura salida	WAC	WHC	SME	Texturización
Temperatura	↓	↑	↑	↑	↑	↑ (por desnaturalización y orientación) ó ↓ (por aumento de SME)
Velocidad tornillo	↓	↑	↑	↑	↑	↑ (más orientación en la dirección del flujo)

Osen *et al.* (2014) texturizaron 3 proteínas aisladas de guisante, que habían tenido un historial de tratamiento térmico distinto, y observaron que la SME descendía al aumentar de 140 a 150°C, pero aumentaba al aumentar la temperatura hasta 160°C, y que la texturización de la proteína identificada como PPI 1 fue la que obtuvo menor valor de SME, y la PPI 2 fue la de mayor SME. La diferencia entre estas dos proteínas es la composición química, que varía muy poco. La PPI 2 fue la más soluble de todas, pero no pudieron sacar conclusiones sobre qué propiedad exacta de las proteínas afecta al consumo de energía. Sin embargo, la PPI 2 era la que menos historial de tratamiento térmico tenía y aún presentaba proteína nativa antes de la texturización. En el momento en que estas fracciones de proteína se desnaturalizan, la SME aumenta repentinamente y también la viscosidad. En este estudio sí que se vio que las altas temperaturas favorecían la formación de estructuras fibrosas, del orden de 160°C. De hecho, se concluyó que la temperatura influía más en este aspecto que la materia prima en sí.

Aunque todo este campo de investigación está en auge, aún son necesarios muchos estudios que correlacionen exactamente los parámetros de texturización. También es necesario la comparativa con carnes, y según indican Samard y Ryu (2019b), se necesitan más investigaciones sobre combinaciones de proteínas vegetales, reducción de azúcar y aumento del sabor cárnico en estos texturizados. Igualmente, Pietsch *et al.* (2019b) apuntan que se requieren más investigaciones detalladas sobre la influencia de los polisacáridos en los mecanismos de estructuración de proteínas como la soja.

4. RETOS ACTUALES Y FUTURAS APLICACIONES

“¿Por qué esta magnífica tecnología, que ahorra trabajo y nos hace la vida más fácil, nos aporta tan poca felicidad? La respuesta simplemente es esta: porque aún no hemos aprendido a usarla con acierto” (Albert Einstein).

A pesar de los avances en la tecnología de extrusión, la industria alimentaria aún tiene muchos retos por delante. En estos momentos la industria alimentaria debe profundizar en la caracterización de la funcionalidad de fuentes proteicas de diferente procedencia. Conociendo estas funcionalidades, será posible valorar la sustitución de ciertos aditivos por proteínas que aportarán estas mismas funciones y un valor nutricional adicional (AINIA, 2019d).

Según Lillford y Hermansson (2020), aunque hay tecnologías, como la extrusión, que permiten obtener productos a base de proteína vegetal que simulen la carne animal, pocas son las que proporcionan un producto aceptable con propiedades sensoriales similares al músculo animal a un precio comparable. Se necesita más investigación sobre el proceso y la caracterización del producto con el fin de conseguir una mayor aceptabilidad por semejanza de sabor y textura. También se requiere más conocimiento sobre el papel que tecnológicamente juega la proteína en este tipo de productos.

Por su parte, Griffith Jones (2016) explica que la complejidad de la composición proteica de las legumbres, entre otras, ha hecho más fuerte el reto de la identificación de las fuentes de proteína más adecuadas para los HMMA. Este autor defiende que, más que estudios centrados en las propiedades de las materias primas compuestas por varias proteínas, carbohidratos, lípidos, etc..., se necesita mejorar la extracción y caracterización detallada de las fracciones proteicas individualmente para poder entender mejor la verdadera funcionalidad de las mismas. Además, conociendo su valor nutricional y funcionalidad se podrá elegir un determinado nivel de pureza según la finalidad y el público objetivo al que se pretenda satisfacer (AINIA, 2019d).

Las propiedades emulsionantes de las proteínas son de gran interés a la hora de elaborar sustitutivos o extensores cárnicos, pues permiten la incorporación de grasa y agua obteniendo un producto homogéneo, con una textura agradable. Existen varios estudios sobre la mejora de esta característica mediante la unión covalente de la proteína con polisacáridos, pues se combinan las propiedades emulsionantes de éstas con la estabilización que ofrecen los polisacáridos (Villamiel *et al.*, 2009). Esta búsqueda de mejora de la capacidad emulsionante se debe a que los agregados de proteína desnaturalizada de origen vegetal todavía no son capaces de parecerse a la estructura anisotrópica tridimensional de las fibras musculares. Sha y Xiong (2020) señalan que ciertas características deseadas en los análogos no se han conseguido alcanzar, como la jugosidad y la ternura de la carne, y que se debe investigar, así mismo, sobre el sabor, la estética y la apariencia. Reincidiendo, esto se conseguirá ampliando el conocimiento sobre la funcionalidad proteica.

De acuerdo con la revisión realizada, se ha identificado mención a otras fuentes proteicas como los insectos o incluso la producción del tejido mediante los cultivos celulares. Por factores culturales, los insectos no son consumidos en los países occidentales, por regla general. Debido al rechazo que generan, es más fácil su ingesta a través de una barrita proteica que a través del consumo de los insectos enteros. Mediante la extrusión se pueden conseguir snacks a base de harinas de este tipo de proteína. El reto está en determinar cómo influyen los parámetros del proceso de extrusión en esa matriz alimentaria, y a qué nivel repercute esa proteína en la expansión final.

Otro aspecto futuro está relacionado con la nutrición. Los productos extrudidos, al tener baja actividad de agua (a_w), tienen una vida útil mayor y esto los hace interesantes y atractivos a nivel comercial y logístico (AINIA, 2019c). Son productos poco perecederos, y con su aumento nutricional se podría evitar en muchas ocasiones los casos de malnutrición en los países en vías de desarrollo. Además, la tecnología de extrusión se usa en la impresión 3D, sobre la cual se necesita mucha mejora, para hacer más robusto al proceso, rápido y barato. La impresión 3D permite el diseño personalizado de alimentos y control de nutrición personalizada, constituyendo una herramienta de creación de prototipos para facilitar el desarrollo de nuevos productos alimenticios hechos a medida (Marced Adrià, 2015). El papel de las proteínas en la extrusión para la impresión 3D es importante, y se busca la formación de una estructura tridimensional que dé lugar a una determinada reología, sobre la cual también se investiga.

Sin duda, y en vista de los últimos artículos publicados sobre la extrusión, son muchos los esfuerzos que se hacen para aprovechar al máximo esta técnica tan versátil y ajustarse a las nuevas demandas y necesidades, tanto humanas y físicas como del planeta, porque el uso de fuentes proteicas de orígenes distintos al animal será cada vez más ineludible.

5. CONCLUSIONES

La tecnología de extrusión permite la obtención de alimentos funcionales, de alto valor nutritivo, bajos en grasa, de elevada vida útil y seguros. Es una tecnología prometedora para el desarrollo de alimentos de futuro que ya hoy empiezan a ser demandados por los consumidores, alimentos que tienen que cumplir elevados estándares nutritivos y de calidad. Para usarla de forma adecuada, es importante, profundizar y evolucionar en el conocimiento de esta tecnología. La elección inadecuada de la materia prima y de las condiciones de procesado podrían conducir a una pérdida del valor nutricional y de la funcionalidad de los ingredientes. En este trabajo se ha revisado de forma extensa el impacto que tiene la inclusión de proteína en la formulación de snacks y las diferentes opciones que permiten obtener texturizados de proteínas vegetales que imitan la textura de los productos cárnicos. Sin embargo, se requiere un importante trabajo de investigación, que ofrezca alternativas como el uso de agentes de expansión, para llegar a desarrollar productos con alto contenido en proteína, un índice de expansión adecuado y de calidad. Así mismo, se debe ampliar el conocimiento sobre la obtención de

la estructura y textura deseada en los análogos cárnicos, realizando más comparativas con diferentes carnes y estudiando fuentes proteicas diferentes a las vegetales y las cárnicas.

6. BIBLIOGRAFÍA

AIKING, H. (2011). "Future protein supply" en *Trends in Food Science and Technology*, vol. 22, núm. 2-3, p.112-120.

AINIA (2017). *Extrusión para el diseño de nuevos ingredientes*. <<https://www.ainia.es/tecnoalimentalia/tecnologia/extrusion-nuevos-ingredientes/>> [Consulta: 18 de junio de 2020]

AINIA (2018). *Desarrollo de alimentos enriquecidos por extrusión con ingredientes naturales* <<https://www.ainia.es/noticias/prensa/desarrollo-alimentos-enriquecidos-por-extrusion-ingredientes-naturales/>> [Consulta: 30 de marzo de 2020]

AINIA (2019a). *Proteínas 2030: diseñando nuevos alimentos sostenibles*. <<https://www.ainia.es/jornada-innovacion-proteinas/>> [Consulta: 30 de marzo de 2020]

AINIA (2019b). *Insectos, leguminosas y algas: Las proteínas del futuro serán vegetales y sostenibles* <<https://www.ainia.es/noticias/prensa/insectos-leguminosas-proteina-vegetal/>> [Consulta: 8 de junio de 2020]

AINIA (2019c). *Cómo conseguir nuevas matrices de proteínas a partir de la extrusión*. <<https://www.ainia.es/tecnoalimentalia/tecnologia/como-conseguir-nuevas-matrices-de-proteinas-a-partir-de-la-extrusion/>> [Consulta: 18 de junio de 2020]

AINIA (2019d). *¿Qué factores considerar en la selección de proteínas?* <<https://www.ainia.es/tecnoalimentalia/proteina-funcionalidades-tecnologicas-extrusion/>> [Consulta: 20 de junio de 2020]

ALETOR, V. (1993). "Allelochemicals in plant foods and feedingstuffs: 1" en *Nutritional, biochemical and physiopathological aspects in animal production. Veterinary and Human Toxicology*, vol. 35, núm. 1, p. 57-67.

ALONSO, R. 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" en *Food Chemistry*, vol. 68, p. 59-165.

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" en *Animal Feed Science and Technology*, vol. 94, p. 1-13.

APPLEWHITE, T. H. (1989). *Proceedings of the World Congress on Vegetable Protein Utilization in Human Foods and Animal Feedstuffs*. Champaign, Ill.: American Oil Chemists' Society.

ARÊAS, J. A. G., ROCHA-OLIVIERI, C. M. y MARQUES, M. R. (2016). "Extrusion cooking: Chemical and nutritional changes" en B. Caballero, P. M. Finglas, and F. Toldr. (eds.), *Encyclopedia of food and health*, p. 569–575. Cambridge, MA: Academic Press

ARRIBAS, C., CABELLOS, B., SÁNCHEZ, C., CUADRADO, C., GUILLAMÓN, E. y PEDROSA, M. M. (2017). "The impact of extrusion on the nutritional composition, dietary fiber and in vitro digestibility of gluten-free snacks based on rice, pea and carob flour blends" en *Food and Function*, vol. 18, p. 3654-3663.

ASARE, E. K., SEFA-DEDEH, S., AFOAKWA, E. O., SAKYI-DAWSON, E. y BUDU, A. S. (2011). "Extrusion cooking of rice-groundnut-cowpea mixtures-effects of extruder characteristics of extrudates using response surface methodology" en *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 36, p. 465-476.

BELTRÁN RICO, M. y MARCILLA GOMIS, A. (2012). *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*. Editorial: Universidad Alicante. ISBN: 978-84-9717-232-5, 276 páginas.

BERK, Z. (2018). *Food Process Engineering and Technology*. Academic Press.

BERRIOS, J. D. J., MORALES, P., CÁMARA, M. y SÁNCHEZ MATA, M. C. (2010). "Carbohydrate composition of raw and extruded pulse flours" en *Food Research International*, vol. 40, p. 531-536.

BRENNAN, M.A., MERTS, I., MONRO, J., WOOLNOUGH, J. y BRENNAN, C.S. (2008). "Impact of guar and wheat bran on the physical and nutritional quality of extruded breakfast cereals" en *Starch-Stärke*, vol. 60, p. 248-256.

CAMPANELLA, O.H., LI, P.X., ROSS, K.A. y OKOS, M.R. (2002). "The role of rheology in extrusion" en *Engineering and Food for the 21st Century*, ed. Welti-Chanes, J., Barbosa-Cánovas, G.V., Miguel Aguilera, J., p. 393-413.

CHAIYAKUL, S., JANGCHUD, K., JANGCHUD, A., WUTTIJUMNONG, P. y WINGER, R. (2009). "Effect of extrusion conditions on physical and chemical properties of high protein glutinous rice-based snack" en *LWT-Food Science and Technology*, vol. 42, p. 781-787.

CHAN, E., MASATCIOGLU, T. M. y KOKSEL, F. (2018). "Effects of different blowing agents on physical properties of extruded puffed snacks made from yellow pea and red lentil flours" en *Journal of Food Process Engineering*, vol. 42, núm. 3, e12989.

CUNNINGHAM, R. L. (1996). "Effect of processing conditions on intrinsic viscosity of extruded cornstarch" en *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 60, núm. 2, p.181-186.

DE LA ROSA-MILLÁN, J., HEREDIA-OLEA, E., PEREZ-CARRILLO, E., GUAJARDO-FLORES, D. y SERNA-SALD.VAR, S. O. (2019). "Effect of decortication, germination and extrusion on physicochemical and in vitro protein and starch digestion characteristics of black beans (*Phaseolus vulgaris* L.)" en *LWT-Food Science and Technology*, vol. 102, p. 330-337.

DING, Q., AINSWORTH, P., TUCKER, G. y MARSON, H. (2005). "The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks" en *Journal of Food Engineering*, vol. 66, núm 3, p. 283-289.

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR D'ALCOI, UPV. ÀREA D'ENGINYERIA DELS PROCESOS DE FABRICACIÓ. "La extrusión de materiales poliméricos". <<https://www.upv.es/bin2/caches/miw/visfit?id=510532&idioma=C>> [Consulta: 10 de junio de 2020]

FAUBION, J.M. y HOSENEY, R.C. (1982). "High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour. II. Effect of protein and lipid on extrudate properties" en *Cereal Chem*, vol. 59, núm. 6, p. 533-537.

FANG, Y., ZHANG, B., WEI, Y. y LI, S. (2013). "Effects of specific mechanical energy on soy protein aggregation during extrusion process studied by size exclusion chromatography coupled with multi-angle laser light scattering" en *Journal of Food Engineering*, vol. 115, núm. 2, p. 220-225.

FANG, Y., ZHANG, B. y WEI, Y. (2014). "Effects of the specific mechanical energy on the physicochemical properties of texturized soy protein during high-moisture extrusion cooking" en *Journal of Food Engineering*, vol. 121, p. 32-38.

GHUMMAN, A., KAUR, A., SINGH, N. y SINGH, B. (2016). "Effect of feed moisture and extrusion temperature on protein digestibility and extrusion behaviour of lentil and horsegram" en *LWT-Food Science and Technology*, vol. 70, p. 349-357.

GIEZEN F.E., JANSEN, W.W.J.T. y WILLEMSSEN, J.H.A. (2014). "Method of Making Structured Protein Composition". *Google Patents*. <<https://patents.google.com/patent/US20140127363A1/en>>

GRIFFITH JONES, O. (2016). "Recent advances in the functionality of non-animalsourced proteins contributing to their use in meat analogs" en *Current Opinion in Food Science*, vol. 7, p. 7-13.

HARMANN, D. V. y HARPER, J. M. (1974). "Modeling a forming foods extruder" en *Journal of Food Science*, vol. 39, núm. 6, p. 1099-1104.

JAN, R., SAXENA, S. D. y SINGH, S. (2017). "Effect of extrusion variables on antioxidant activity, total phenolic content and dietary fibre content of gluten-free extrudate from germinated *Chenopodium album* flour" en *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 52, p. 2623-2630.

JOZINOVIĆ, A., AČKAR, Đ., JOKIĆ, S., BABIĆ, J., PANAK BALENTIĆ, J., BANOŽIĆ, M. y ŠUBARIĆ, D. (2017). "Optimisation of Extrusion Variables for the Production of Corn Snack Products Enriched with Defatted Hemp Cake" en *Czech Journal of Food Sciences*, vol. 35, núm. 6, p. 507-516.

KNOCH, A. (2016). "Production of Restructured Meatlike Products by High Moisture Extrusion Technology" en *Reference Module in Food Science*.

KOKINI, J.L., CHANG, C.N. y LAI, L.S. (1992). "The role of rheological properties on extrudate expansion" en *Food Extrusion Science and Technology*, ed. Kokini JL, Ho C-T, Karwe MV. New York: Marcel Dekker Inc. p. 631-653.

KOKSEL, F. y MASATCIOGLU, M. (2018). "Physical properties of puffed yellow pea snacks produced by nitrogen gas assisted extrusion cooking" en *LWT-Food Science and Technology*, vol. 93, p. 592-598.

KYRIAKOPOULOU, K., DEKKERS, B. y JAN VAN DER GOOT, A. (2019). "Plant-Based Meat Analogues" en *Sustainable Meat Production and Processing*, K. Kyriakopoulou, B. Dekkers, A. Janvan der Goot. Academic Press, p. 103-126.

KUMAR DUBEY, R. y BHATTACHARYA, S. (2014). "Extrusion Processing of Foods" en *Conventional and Advanced Food Processing Technologies*, Suwendu Bhattacharya. Wiley Blackwell, ISBN: 978-1-118-40632-8, 744 páginas.

<<https://www.wiley.com/enus/Conventional+and+Advanced+Food+Processing+Technologies-p-9781118406328>> [Consulta: 31 de marzo de 2020]

LAGRAIN, B., THEWISSEN, B.G., BRIJS, K. y DELCOUR, J.A. (2008). "Mechanism of gliadin–glutenin cross-linking during hydrothermal treatment" en *Food Chemistry*, vol. 107, núm. 2, p. 753-760.

LEONARD, W., ZHANG, P., DANYANG, Y. y ZHONGXIANG F. (2019). "Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview" en *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, vol. 19, p. 218–246.

LILLFORD, P. y HERMANSSON, A-M. (2020). "Global missions and the critical needs of food science and technology" en *Trends in Food Science and Technology*, article in press <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224420304386>> [Consulta: 22 de junio de 2020]

LIN, S., HUFF, H.E. y HSIEH, F. (2000). "Texture and chemical characteristics of soy protein meat analog extruded at high moisture" en *Journal of Food Science*, vol. 65, p. 264-269.

LI, H., XIONG, Z. y LI, X. (2019). "Optimization of the extrusion process for the development of extruded snacks using peanut, buckwheat, and rice blend" en *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 43, núm. 12, e14264.

MARCED ADRIÀ, J. (2015). *Evaluación de formulaciones alimentarias para su impresión en 3D*. Proyecto final de carrera. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

MARTÍNEZ, J. y GARCÍA, P. (2012). *Nutrición humana*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

MARTÍNEZ, N. *et al.* (2011). *Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno*. Valencia: Editorial Universidad Politécnica de Valencia.

MORALES, P., CEBADERA-MIRANDA, L., CÁMARA, R. M., REIS, F. S., BARRO, L., DE J. BERRIOS, J., FERREIRA, I. C.F.R. y CÁMARA, M. (2015). "Lentil flour formulations to develop new snack-type products by extrusion processing: Phytochemicals and antioxidant capacity" en *Journal of Functional Foods*, vol. 19, p. 537-544.

MORARU, C.I. y KOKINI, J.L. (2003). "Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods" en *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 2, núm. 4, p. 147-165.

NACIONES UNIDAS. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*, <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>> [Consulta: 30 de marzo de 2020]

NIJDAM, D., ROOD, T. y WESTHOEK, H. (2012). "The price of protein: review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes" en *Food Policy*, vol. 37, p.760-770.

NIKMARAM, N., LEONG, S. Y., KOUBAA, M., ZHU, Z., BARBA, F.J., GREINER, R., OEY, I. y ROOHINEJAD, S. (2017). "Effect of extrusion on the anti-nutritional factors of food products: An overview" en *Food Control*, vol. 79, p. 62-73.

ONWULATA, C. I. y KONSTANCE, R. P. (2006). "Extruded corn meal and whey protein concentrate: Effect of particle size" en *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 30, núm. 4, p. 475-487.

OSEN, R., TOELSTED, S., WILD, F., EISNER, P. y SCHWEIGGERT-WEISZ, U. (2014). "High moisture extrusion cooking of pea protein isolates: Raw material characteristics, extruder responses, and texture properties" en *Journal of Food Engineering*, vol. 127, p. 67-74.

PHILIPP, C., OEY, I., SILCOCK, P., BECK, S. M. y BUCKOW, R. (2017). "Impact of protein content on physical and microstructural properties of extruded rice starch-pea protein snacks" en *Journal of Food Engineering*, vol. 212, p. 165-173.

PIETSCH, V.L., WERNER, R., KARBSTEIN, H.P. y EMIN, M. A. (2019a). "High moisture extrusion of wheat gluten: Relationship between process parameters, protein polymerization, and final product characteristics" en *Journal of Food Engineering*, vol. 259, p. 3-11.

PIETSCH, V.L., BÜHLER, J.M., WERNER, R., KARBSTEIN, H.P. y EMIN, M. A. (2019b). "High moisture extrusion of soy protein concentrate: Influence of thermomechanical treatment on protein-protein interactions and rheological properties" en *Journal of Food Engineering*, vol. 251, p. 11-18.

RASHID, S., RAKHA, A., ANJUM, F. M., AHMED, W. y SOHAIL, M. (2015). "Effects of extrusion cooking on the dietary fibre content and Water Solubility Index of wheat bran extrudates" en *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 50, p. 1533-1537.

RAFIQ, A., SHARMA, S. y SINGH, B. (2017). "Regression analysis of glutenfree pasta from brown rice for characterization and in vitro digestibility" en *Journal of Food Processing & Preservation*, vol. 41, e12830

REIG, M., LILLFORD, P.J. y TOLDRÁ, F. (2008). "Structured meat products" en *Food Materials Science*. Springer, New York, New York, NY, p. 501-523.

RIAZ, M.N. (2004). "Texturized soy protein as an ingredient" en *Yada, RY (Ed.), Proteins in food processing*. CRC Press, Woodhead Pub., Cambridge, Inglaterra, p. 517-558.

SACCHETTI, G., PINNAVAIA, G.G., GUIDOLIN, E. y DALLA ROSA, M. (2004). "Effects of extrusion temperature and feed composition on the functional, physical and sensory properties of chestnut and rice flour-based snack-like products" en *Food Research International*, vol. 37, p.527-534.

SALDANHA DO CARMO, C., VARELA, P., POUUROUX, C., DESSEV, T., MYHRER, K., RIEDER, A., ZOBEL, H., SAHLSTRØM, S. y KNUTSEN, S.H. (2019). "The impact of extrusion parameters on physicochemical, nutritional and sensorial properties of expanded snacks from pea and oat fractions" en *LWT-Food Science and Technology*, vol. 112, 108252.

SAMARD, S. y RYU, G-H. (2019a). "A comparison of physicochemical characteristics, texture, and structure of meat analogue and meats" en *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 99, p. 2708-2715.

SAMARD, S. y RYU, G-H. (2019b). "Physicochemical and functional characteristics of plant protein-based meat analogs" en *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 43, núm. 10, e14123.

SHA, L. y XIONG, Y. L. (2020). "Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges" en *Trends in Food Science and Technology*, vol. 102, p. 51-61.

SINGH, S., GAMLATH, S. y WAKELING, L. (2007). "Nutritional aspects of food extrusion: A review" en *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 42, p. 916-929

SINGH, S. K. y MUTHUKUMARAPPAN, K. (2017). "A viscosity model for soy white flakes-based aquafeed dough in a single screw extruder" en *Journal of Food Process Engineering*, vol 40, p.1-7. e12357.

SINGHA, P., SINGH, S. K. y MUTHUKUMARAPPAN, K. (2018). "Physicochemical and nutritional properties of extrudates from food grade distiller's dried grains, garbanzo flour, and corn grits" en *Food Science and Nutrition*, vol 6, p. 1914-1926.

TOLSTOGUZOV, V.B. (1993). "Thermoplastic extrusion: the mechanism of the formation of extrudate structure and properties" en *Journal of American Oil Chemists' Society*, vol. 70, núm. 4, p. 417-424.

TOMASZEWSKA-CIOSK, E., ZDYBEL, E., LECH, K. y NEMŚ, A. (2019). "Effect of ethanol on properties of extrudates enriched with high-fibre by-products" en *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 54, p. 2811-2820.

VASANTHAN, T., GAOSONG, J., YEUNG, J. y LI, J. (2002). "Dietary fiber profile of barley flour as affected by extrusion cooking" en *Food Chemistry*, vol. 77, p. 35-40.

VILLAMIEL, M., LÓPEZ-FANDIÑO, R., SORIA, A. C. y MORENO, F. J. (2009). "Obtención de seroproteínas funcionales vía reacción de Maillard" en *Digital.Csic*, Ed: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España) <<https://digital.csic.es/bitstream/10261/155155/1/seroproteinas.pdf>> [Consulta: 23 de junio de 2020]

VILLARROEL, P., GÓMEZ, C., VERA, C. y TORRES, J. (2018). "Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos" en *Revista chilena de nutrición*, vol. 45, núm. 3, p. 271-278.

WANI, S. A. y KUMAR, P. (2016). "Influence of different mixtures of ingredients on the physicochemical, nutritional and pasting properties of extruded snacks" en *Journal of Food Measurement and Characterization*, vol. 10, núm. 3, p. 690-700.

XIE, F., HALLEY, P.J. y AVÉROUS, L. (2012). "Rheology to understand and optimize processibility, structures and properties of starch polymeric materials" en *Progress in Polymer Science*, vol. 37, núm. 4, p. 595-623.

YADA, R.Y. (2004). "Proteins in food processing". CRC Press, Woodhead Pub., Cambridge, Eng.

ZHANG, J., LIU, L., JIANG, Y., FAISAL, S. y WANG, Q. (2020). "A new insight into the high-moisture extrusion process of peanut protein: From the aspect of the orders and amount of energy input" en *Journal of Food Engineering*, vol. 264.