



ESTUDIO DE LA MEJORA DE LA FUNCIONALIDAD DE HARINAS Y ALMIDONES SIN GLUTEN MEDIANTE TRATAMIENTOS FÍSICOS INNOVADORES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Curso: 2017/18

Alumna: Sara de Pablos Alcalde

Tutoras: Felicidad Ronda Balbás

Ángela García Solaesa

Tutora externa: Marina Villanueva Barrero

Máster en Calidad, Desarrollo e Innovación de Alimentos
E.T.S. Ingenierías Agrarias, Campus de la Yutera (Palencia)
Universidad de Valladolid

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 1 |
| ABSTRACT | 1 |
| INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| MODIFICACIÓN FÍSICA DE HARINAS Y ALMIDONES SIN GLUTEN | 5 |
| TRATAMIENTO HIDROTÉRMICO (HMT)..... | 5 |
| Influencia de HMT en la solubilidad | 6 |
| Influencia de HMT en las propiedades de empastado y en la viscosidad..... | 7 |
| Influencia de HMT en la temperatura de gelatinización..... | 7 |
| Influencia de HMT en la textura del gel..... | 8 |
| Aplicaciones de harinas y almidones tratados con HMT | 8 |
| TRATAMIENTO CON MICROONDAS | 10 |
| Influencia del tratamiento microondas en las propiedades de empastado y viscosidad..... | 13 |
| Influencia del tratamiento microondas en la temperatura de gelatinización..... | 13 |
| Aplicaciones de harinas y almidones tratados con microondas..... | 14 |
| ALTAS PRESIONES HIDROSTÁTICAS (HPP)..... | 14 |
| Influencia de HPP en las propiedades reológicas de las masas | 16 |
| Aplicaciones de harinas y almidones tratados con HPP..... | 17 |
| ULTRASONIDOS..... | 17 |
| Influencia de los ultrasonidos en la solubilidad | 19 |
| Influencia de los ultrasonidos en las propiedades de empastado y viscosidad | 19 |
| Influencia de los ultrasonidos en la temperatura de gelatinización | 19 |
| Influencia de los ultrasonidos en el contenido proteico y actividad antioxidante... | 20 |
| PULSOS ELÉCTRICOS DE ALTO VOLTAJE | 20 |
| CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS | 22 |
| AGRADECIMIENTOS..... | 23 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 23 |

RESUMEN

El actual crecimiento del mercado de productos sin gluten se debe a la alta incidencia de la enfermedad celiaca junto con consumidores que demandan este tipo de productos por hábitos culturales y dietéticos. El gluten ejerce un papel fundamental y es el principal responsable de las características viscoelásticas de la masa, por lo que obtener productos sin gluten de elevada calidad es un reto tecnológico. La presente revisión tiene como objetivo discutir los principales resultados de la modificación física de harinas de cereales y pseudocereales y almidones sin gluten, de diferente origen botánico, a través de técnicas de procesamiento innovadoras. Estas tecnologías mejoran la funcionalidad, al modificar la estructura molecular del almidón, como principal componente, e influir en los procesos de gelatinización-retrogradación. Tratamientos hidrotérmicos o asistidos con microondas, aportan una estabilidad térmica mejorada y disminuyen la retrogradación. Las altas presiones hidrostáticas, por otro lado, mejoran la elasticidad y viscosidad, y en consecuencia, la retención de gas, volumen y textura de la masa. Técnicas menos estudiadas como los ultrasonidos o pulsos eléctricos, también aportan efectos positivos. En base a ello, los productos desarrollados a partir de estas harinas y almidones tratados presentan características reológicas adecuadas y son aceptados por el consumidor. Muchas de estas tecnologías, a su vez, se caracterizan por ser medioambientalmente seguras al no dejar residuos y en muchos casos de bajo coste operacional. Si bien es cierto, condiciones de proceso o diferencias en el origen botánico son variables que influyen en gran medida en los resultados obtenidos y que requieren un mayor estudio.

ABSTRACT

The current growth of the gluten-free product market is due to the high incidence rate of gluten intolerance along with consumers who demand this type of products by cultural and dietetic habits. Gluten plays an important role and is the main responsible for the viscoelastic properties of dough, so obtaining high quality gluten-free products is a technological challenge. This review aims talk about the main results of the physical modification of gluten-free cereal and pseudocereals flours and starches, which have different botanical origin, through innovative processing techniques. These technologies improve functionality, by modifying the molecular structure of starch, as the main component, and working in gelatinization-retrogradation processes. Heat-moisture or microwave-assisted treatments improve thermal stability and decrease retrogradation. High pressure processing, on the other hand, upgrade elasticity and viscosity, and consequently, gas retention, volume and texture of dough. Techniques which have been less studied such as ultrasounds and pulsed electric fields also provide positive effects. Based on this, products developed from these treated flours and starches present suitable rheological properties and are accepted by consumers. In addition, many of these technologies are environmentally safe by not leaving waste and in many cases low operational prices. It should be pointed out that different process conditions and botanical origin have a great impact on the results, so more studies are required.

INTRODUCCIÓN

La tendencia creciente de personas diagnosticadas de enfermedad celiaca, junto con otros consumidores que demandan productos sin gluten como resultado de creencias culturales o saludables y hábitos dietéticos, ha dado lugar al nacimiento de un nuevo mercado constituido por productos elaborados a partir de cereales alternativos al trigo (Prakash, Shalini & Arya, 2017). Se trata de uno de los mercados de mayor crecimiento en el mundo de la alimentación en la actualidad, con un aumento anual del 10,4%, pasando de 4,63 billones facturados en 2015 a 7,59 que se prevén en 2020. El porcentaje de alimentación y bebida sin gluten lanzada al mercado en el periodo de 2013 a 2015 pasó del 7,9% al 11,8%. Se prevé que Europa sea el mercado alimentario con mayor proyección de crecimiento (Bustamante et al., 2017; Gao, Janes, Chaiya, Brennan & Brennan, 2018).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) define al gluten como la fracción proteica encontrada en el trigo, cebada, centeno, avena, sus variedades híbridas (Triticale) o derivados de los mismos, que es insoluble en agua y en solución de cloruro de sodio de 0,5 M (Badiu, Aprodu & Banu, 2014). En concreto, el gluten es la combinación funcional de dos tipos específicos de proteína que en el trigo son denominados, glutenina (una glutelina) y gliadina (una prolamina). De manera combinada, estas proteínas contribuyen al carácter viscoelástico de la masa, lo que permite atrapar el gas durante la fermentación. Las burbujas expanden y aportan la suficiente porosidad como para generar un producto con una textura de baja densidad tras el horneado (Casper & Atwell, 2014).

Hay tres principales formas en las que la población reacciona a la ingesta de gluten: alergia (alergia al gluten), autoinmune (enfermedad celiaca, dermatitis herpetiforme y ataxia al gluten) y mediada por el sistema inmunológico (sensibilidad al gluten) (Gao et al., 2018). La enfermedad celiaca es un desorden del tracto gastrointestinal en el cual la ingestión de gluten daña la mucosa del intestino delgado por un mecanismo inmune inmediato, debido a la intolerancia permanente a las prolaminas presentes en el trigo (gliadina), en el centeno (secalina) y en la cebada (hordeina). Anemia, úlceras bucales, diarrea, dolor abdominal, fatiga, osteoporosis, pérdida de peso, depresión, etc. son algunos de los síntomas clínicos más importantes de dicha enfermedad (Badiu et al., 2014; Naqash, Gani, Gani & Masoodi, 2017). La prevalencia se estima entre el 0,5 y el 2% de la población en la mayoría de las ciudades europeas y en Estados Unidos, identificándose como una de las alteraciones más comunes en el mundo. En la actualidad, el único tratamiento terapéutico posible es evitar la ingestión de gluten, siguiendo de manera muy estricta una dieta sin gluten (Cappa, Barbosa-cánovas, Lucisano & Mariotti, 2016; Singh & Aastha, 2014). Sin embargo, como ya se ha mencionado, además de la población afectada, algunos consumidores evitan la ingesta de gluten como parte de su estilo de vida (Gao et al., 2018). Diversas enfermedades en las cuales la eliminación del gluten supone una mejora de la salud ha ocasionado que la población que sigue una dieta saludable tenga tendencia a eliminarlo, evitando así el llamado “wheat belly” en torno a los posibles inconvenientes de una dieta dominada por el trigo. Esto ha tenido una influencia directa en el mercado de los productos sin gluten.

Cabe destacar que el 65% de los consumidores compran estos productos porque los consideran más saludables, el 27% para perder peso, el 11% por cuestiones relacionadas con el estado de salud (inflamación y depresión) y el 20% por otras razones (Witczak, Ziobro, Juszczak & Korus, 2016).

De acuerdo con el Reglamento de ejecución (UE) N° 828/2014 de la Comisión de 30 de julio de 2014 relativo a los requisitos para la transmisión de información a los consumidores sobre la ausencia o la presencia reducida de gluten en los alimentos, la declaración “sin gluten” solamente podrá utilizarse cuando los alimentos, tal como se venden al consumidor final, no contengan más de 20 mg/kg de gluten. En cuanto a la declaración “muy bajo en gluten”, solamente podrá utilizarse cuando alimentos que consistan en trigo, centeno, cebada, avena o sus variedades híbridas, o que contengan uno o más ingredientes hechos a partir de estos cereales, que se hayan procesado específicamente para reducir su contenido de gluten, no contengan más de 100 mg/kg de gluten en el alimento tal como se vende al consumidor final (Europea, 2014).

Bajo estas condiciones, las principales materias primas que pueden aparecer en una producción de alimentos sin gluten son almidones (arroz, maíz, patata, sorgo, etc.) y harinas de cereales y pseudocereales (arroz, maíz, sorgo, mijo, trigo sarraceno, teff, amaranto, quinoa, soja, tapioca, garbanzo, lino, castaña, algarroba y bellota) (Prakash et al., 2017; Witczak et al., 2016). Además, el almidón de trigo y la harina de avena, siempre y cuando se produzcan bajo condiciones que garanticen la total ausencia de gluten, son también tenidos en cuenta (Gómez & Martínez, 2016).

En torno al 86% de todos los productos sin gluten están elaborados con harina o almidón de arroz o de maíz. El resto de las materias citadas sólo se encuentran en un 2 – 4% de dichos productos (Figura 1.). La elección por la harina de arroz se fundamenta en su color blanco, sabor neutro, alta digestibilidad y propiedades hipoalergénicas (Schoenlechner, 2017).

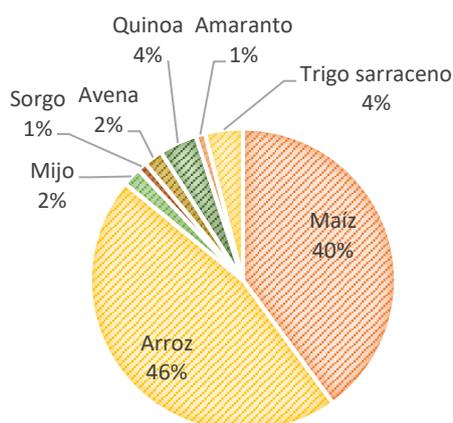


Figura 1. Materias empleadas en el mercado de productos sin gluten (Schoenlechner, 2017)

Muchas de las harinas sin gluten empleadas constituyen una buena fuente de componentes beneficiosos para la salud, principalmente debido a su contenido en flavonoides, ácidos fenólicos y lignanos. El arroz negro destaca por tener la mayor composición en flavonoides y antocianinas. Por su parte, los ácidos fenólicos predominan en harinas de garbanzo y de avena sin gluten, mientras que el contenido más alto en lignanos se encuentra en la harina de arroz blanco. Todo ello hace que estas harinas además de ser recomendadas para las personas afectadas por la enfermedad celiaca constituyan una buena fuente alternativa de compuestos promotores para la salud (Rocchetti et al., 2017).

El almidón forma la textura primaria y es agente formador de estructura en los sistemas sin gluten (Naqash et al., 2017). Además del almidón nativo, componente natural de los alimentos, los productos sin gluten pueden contener almidones químicamente modificados, los cuales se clasifican como aditivos alimentarios. La adición de los mismos influye en las propiedades reológicas y de absorción de agua de la masa, grado de gelatinización del almidón, textura y estabilidad térmica, mecánica y ante cambios de pH. Los almidones modificados físicamente también pueden incorporarse a la producción de alimentos sin gluten. En contraste con los modificados de forma química, estos se consideran similares al almidón nativo y pueden formar parte de productos calificados con “etiqueta limpia”, preferidos por los consumidores (Witczak et al., 2016). El proceso de gelatinización – retrogradación desarrolla un papel fundamental en el control de la textura y calidad de los productos que contienen almidón. Este fenómeno se vuelve más crítico en los productos horneados sin gluten. De forma general, la gelatinización tiene lugar por calentamiento del almidón en presencia de suficiente cantidad de agua, tras lo cual la estructura cristalina se rompe de forma irreversible y rápida. En ese momento, la amilosa sale del gránulo incrementando la viscosidad del sistema debido al hinchamiento de los mismos y a la solubilización de esta que hace que se forme un gel. La retrogradación tiene lugar por el enfriamiento tras la cocción, de modo que el almidón gelatinizado cristaliza y las moléculas de amilosa se unen formando agregados que aumentan de tamaño hasta que exceden las dimensiones coloidales y precipitan (Cappa, Lucisano, Barbosa-Cánovas & Mariotti, 2016).

La sustitución del gluten representa el mayor reto tecnológico a la hora de producir productos de elevada calidad ya que aporta a la masa extensibilidad, elasticidad, cohesividad y contribuye a la capacidad de absorción de agua (Singh & Aastha, 2014). En el caso de la panificación, en concreto, el gluten desempeña un papel esencial, y por ello el pan sin gluten suelen ser menos deseable en relación con su apariencia, sabor, aroma y textura ya que sus proteínas no poseen las propiedades viscoelásticas características (Vallons, Ryan & Arendt, 2011). La red de gluten que se forma durante el proceso de amasado genera una estructura tridimensional que aporta elasticidad a la masa. Esta red atrapa las burbujas de dióxido de carbono que se generan en la fermentación por las levaduras, lo cual ocasiona el crecimiento. Cuando la masa es horneada, la red coagula, contribuyendo a la estabilidad final del producto (Gallagher, 2009). Por todo ello, en el pasado, las masas sin gluten se han descrito por ser menos cohesivas y elásticas, difíciles de manipular y con una baja retención de gas. Los productos resultantes presentaban bajo volumen, corteza pálida, textura que se desmigajaba, estructura de miga densa, poco flavor almidonado, bajo poder nutritivo y elevada capacidad de rancidez (Badiu et al., 2014; Cappa et al., 2016a; O’Shea, Arendt & Gallagher, 2014; Singh & Aastha, 2014).

En los últimos años, se han investigado métodos alternativos para mejorar las características y calidad de las masas sin gluten. La aplicación de ingredientes sin gluten como el almidón, productos lácteos e hidrocoloides, entre otras combinaciones, han sido empleados (Gao et al., 2018; Singh & Aastha, 2014). Los hidrocoloides son polímeros solubles en agua que se caracterizan por imitar las propiedades viscoelásticas del gluten, mejorando la capacidad de retención de gas y de agua de la masa debido a su carácter hidrofílico. A su vez, evitan la retrogradación del almidón y aportan volumen y suavidad a la miga (Casper & Atwell, 2014; Gallagher, 2009). Entre los hidrocoloides más empleados destacan hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC), metilcelulosa, goma xantana, goma guar y alginato sódico (Badiu et al., 2014).

Además de la adición de nuevos ingredientes, existe una tendencia creciente hacia la modificación física de las harinas mediante el empleo de técnicas de procesado innovadoras con el objetivo de que estas presenten una funcionalidad y composición nutricional mejorada (Gómez & Martínez, 2016; Vallons et al., 2011). Tecnologías como las altas presiones hidrostáticas, microondas o los ultrasonidos, entre otras, son soluciones no convencionales a la hora de mejorar las características reológicas de las masas sin gluten. Esta revisión aborda diversas opciones tecnológicas con el fin de discutir su posible aplicación y conseguir productos sin gluten con una textura y aceptabilidad óptimas.

MODIFICACIÓN FÍSICA DE HARINAS Y ALMIDONES SIN GLUTEN

Numerosos estudios avalan el enorme interés a la hora de emplear técnicas de procesado alternativas e innovadoras para modificar físicamente harinas y almidones sin gluten y mejorar su funcionalidad en aplicaciones posteriores. La estrategia más común para mejorar la calidad de los productos sin gluten es modificar las propiedades del almidón y su estructura molecular ya que es el principal ingrediente de las materias sin gluten, influyendo directamente en los procesos de gelatinización y retrogradación (Padalino, Conte & Del Nobile, 2016).

TRATAMIENTO HIDROTÉRMICO (HMT)

El tratamiento térmico de sistemas de almidón en agua tiene como resultado el hinchamiento de los gránulos, de este modo, se produce un incremento en el volumen y cambian las propiedades mecánicas de los mismos. Si dicho tratamiento tiene lugar a bajo contenido en humedad se denomina hidrotérmico (HMT) y tiene como resultado diversos cambios en la estructura cristalina de los gránulos, en su morfología y en la susceptibilidad química y enzimática (Witczak et al., 2016; Zia-ud-Din, Xiong & Fei, 2015).

En este tipo de procesos, las harinas de cereal o gránulos de almidón con bajo contenido en humedad, normalmente inferior al 35%, son sometidos a calentamiento a elevada temperatura (84 - 120°C) durante un periodo de tiempo específico (15 minutos – 16

horas) sin fomentar la gelatinización completa del almidón (Fathi, Aalami, Kashaninejad & Sadeghi Mahoonak, 2016; Gómez & Martínez, 2016).

Se considera una de las estrategias a la hora de mejorar la calidad de los productos horneados sin gluten puesto que no destruye la estructura de los gránulos de almidón, sino que altera su cristalinidad, la capacidad de retención de agua, viscosidad y comportamiento de gelatinización. Cabe destacar que a diferencia de lo que ocurre con los almidones, el proceso en harinas es sencillo y de bajo coste (Fathi et al., 2016).

El tratamiento HMT se fundamenta en controlar la movilidad molecular a altas temperaturas mediante la limitación del contenido en agua. Se promueve la interacción de las cadenas poliméricas al romper la estructura cristalina y disociar la estructura de doble hélice en la región amorfa (Zavareze & Dias, 2011).

Las condiciones seleccionadas en los parámetros de proceso pueden ser muy variadas entre unos estudios y otros. Algunos de los parámetros más relevantes son el origen botánico de la muestra, contenido en amilosa y amilopectina, longitud de las cadenas de amilopectina, contenido en humedad, temperatura, duración del tratamiento, fuente de calentamiento y proceso de enfriamiento. Humedad y temperatura, son los más estudiados (Zhongquan et al., 2015).

A la hora de llevar a cabo este tratamiento, las muestras de harina o almidón son pesadas en recipientes de vidrio. En todos los casos, es necesario aumentar el contenido en humedad hasta valores de entre el 20 y el 35% normalmente. Para ello, de manera generaliza para todos los estudios, pequeñas cantidades de agua destilada son adicionadas al recipiente con agitación continua hasta alcanzar el valor deseado. De manera previa al calentamiento, los recipientes se sellan y se mantienen a 4°C entre 24 – 72 horas en función de las condiciones seleccionadas con el fin de equilibrar el contenido de humedad. Tras el tratamiento HMT en horno de aire caliente, las muestras se secan a temperaturas de entre 40 y 50°C durante toda la noche hasta peso constante.

Diversas investigaciones han estudiado el efecto que ocasionaba el tratamiento de forma simultánea en harinas y almidones del mismo origen botánico con el objetivo de determinar si existía alguna diferencia en función de si se trataba de harina y almidón de sorgo (Sun, Han, Wang & Xiong, 2014), harina y almidón de arroz (Puncha-arnon & Uttapap, 2013) y harina y almidón de trigo sarraceno (Xiao, Liu, Wei, Shen & Wang, 2017). La harina de sorgo, en concreto, contiene gránulos de almidón y componentes no almidonados que incluyen polisacáridos, lípidos y proteínas, de modo que las interacciones entre ambos componentes de la harina durante el proceso son posiblemente diferentes de las que tienen lugar en el almidón (Sun et al., 2014). Las condiciones de proceso seleccionadas fueron similares con relación a la humedad de las muestras, tiempo y temperatura. Si bien es cierto, en el caso del estudio llevado a cabo por Puncha-arnon y Uttapap (2013) y Xiao et al. (2017), el tiempo de tratamiento fue superior llegando a las 16 horas.

Influencia de HMT en la solubilidad

En base a los distintos estudios, los autores observaron una reducción en la solubilidad y en el poder de hinchamiento. Esto es debido a que, durante el tratamiento, la

reorganización de las cadenas moleculares, la formación de dobles hélices de amilopectina y/o la formación de complejos amilosa-lípidos origina una estructura rígida más estable en el interior de los gránulos que contribuye a incrementar el contenido de amilosa insoluble y a disminuir la proporción soluble e impide el aumento de volumen de los mismos (Sun et al., 2014).

Influencia de HMT en las propiedades de empastado y en la viscosidad

El tratamiento promueve un incremento en la temperatura de empastado (temperatura a la que los gránulos de almidón comienzan a hincharse y gelatinizar debido a la absorción de agua), de manera proporcional al contenido de humedad correspondiente. Así mismo, la reducción en la viscosidad que tiene lugar se debe a la baja capacidad de hinchamiento, debido a que como se ha mencionado anteriormente, la cantidad de amilosa disponible para alcanzar el medio e incrementar la viscosidad es baja (Sun et al., 2014). A pesar de que la reorganización estructural y las asociaciones entre cadenas conlleva resultados similares, si que es preciso destacar que, en el caso de la harina de arroz en concreto, los valores de viscosidad alcanzados fueron muy bajos y casi nulos en aquellas muestras con un 30% de humedad. De acuerdo con Punched-arnon y Uttapap (2013), las diferencias encontradas entre al almidón y la harina pueden ser debido a la desnaturalización que tiene lugar en las proteínas durante el tratamiento térmico, siendo el segundo componente mayoritario en la harina. Las interacciones entre las proteínas desnaturalizadas y los gránulos de almidón dan lugar a una asociación de la red proteica con la superficie del gránulo, lo cual retarda el hinchamiento en la harina y en consecuencia hace que la viscosidad sea mucho más baja que en el almidón tratado en las mismas condiciones. Del mismo modo, Sun et al. (2014), también atribuyen estas diferencias en la viscosidad al contenido en amilosa, proteínas y lípidos entre la harina y el almidón de sorgo. La amilosa actúa como diluyente y como inhibidor del incremento de volumen, especialmente en presencia de lípidos como ocurre en la harina, los cuales forman con la propia amilosa complejos insolubles durante el hinchamiento y la gelatinización (Sun et al., 2014). Resultados que discrepan con los mencionados son los observados por Collar (2017). En este caso, muestras de harina de trigo sarraceno y sorgo incrementaron su viscosidad tras condiciones de tratamiento medias (contenido de humedad del 15% y tiempo de calentamiento de 60 minutos). Este hecho se cree que puede ser debido al incremento de la hidrofobicidad de prolaminas y glutelinas en condiciones HMT de baja humedad y tiempo en harinas sin gluten con alto contenido proteico (Collar, 2017).

Influencia de HMT en la temperatura de gelatinización

El tratamiento influye en la temperatura de gelatinización, aumentando su valor a medida que se incrementa el contenido en humedad de las diferentes materias seleccionadas a estudio (Punched-arnon & Uttapap, 2013; Sun et al., 2014; Xiao et al., 2017). En concreto, en el almidón de sorgo, las moléculas de amilosa interaccionaban más libremente con las cadenas de amilopectina presentes en las regiones cristalinas, lo cual reducía la movilidad de estas incrementando la temperatura necesaria a alcanzar para que tuviera lugar la gelatinización. La formación de complejos amilosa-amilosa y amilosa-lípidos en el gránulo de almidón también contribuía a este aumento (Sun et al., 2014). Cabe destacar que el mayor contenido proteico presente en harina frente al almidón hace que la temperatura sea superior a igual contenido en humedad (Xiao et al., 2017).

Influencia de HMT en la textura del gel

El mayor entrecruzamiento de las cadenas de almidón formando una red más sólida da lugar a una mayor dureza de los geles formados a partir de las muestras tratadas (Sun et al., 2014). No se obtuvo el mismo resultado, sin embargo, en los estudios llevados a cabo por Punched-arnon y Uttapap (2013) y por Xiao et al. (2017). La dureza de los geles formados era menor después del tratamiento a consecuencia de un menor hinchamiento de los gránulos por la desnaturalización proteica y la formación de complejos amilosa-lípidos.

Aplicaciones de harinas y almidones tratados con HMT

Actualmente, las harinas y almidones sometidos a este tratamiento presentan importantes aplicaciones en la industria alimentaria debido fundamentalmente a que adquieren una estabilidad térmica mejorada y su retrogradación se ve disminuida. Gracias a las propiedades conseguidas y al hecho de que las muestras sean más estables a calentamientos continuados, esta tecnología puede ser muy efectiva en el desarrollo de productos como noodles, sopas o pastas, donde altos rangos de temperatura son requeridos (Xiao et al., 2017). Así mismo, tiene lugar una modificación física que concuerda con la demanda actual social hacia alimentos naturales y es de elevado interés a la hora de desarrollar productos de bajo índice glicémico y sin gluten. Permite a su vez, modificar la funcionalidad de ambas materias a bajo coste, sin producir residuos químicos y de una forma medioambientalmente segura (Zavareze & Dias, 2011).

No sólo los cambios físicos obtenidos en harinas y almidones tras el tratamiento deben ser positivos, sino que también deben ser de aplicación en el desarrollo de productos sin gluten con ciertas garantías de éxito en el mercado. Para comprobar si dicha funcionalidad es real y estimar su grado de aceptabilidad global por parte de los consumidores se han llevado a cabo distintos estudios del efecto de un tratamiento HMT en harina de mijo y posterior incorporación en bizcocho (Fathi et al., 2016), en harina de arroz y pastel de arroz (Kim, Oh & Chung, 2017) y en almidón de amaranto y noodles (Chandla, Saxena & Singh, 2017). En todos los casos, los tiempos de tratamiento seleccionados se vieron muy reducidos, situándose entre las 2 y 3 horas. Los resultados obtenidos en los distintos estudios difieren entre sí, siendo difícil su comparación al no tratarse de harinas y almidones del mismo origen botánico y tener una aplicación en productos diferentes.

En cuanto a las propiedades fisicoquímicas del bizcocho, la total sustitución de harina no tratada por harina tratada indicaba un mayor volumen y viscosidad en la masa. Así mismo, con el incremento en humedad y temperatura, así como en porcentaje de harina incorporada en la formulación, se conseguía una mayor consistencia debido a una mayor retención de agua, hinchamiento, gelatinización del almidón y desnaturalización proteica. Las muestras tratadas con una humedad del 20 y del 30%, a temperaturas de 120 y de 100°C, respectivamente, mejoraban el volumen del producto; sin embargo, harinas con un 30% de humedad tratadas a máxima temperatura provocaban el descenso de volumen en la masa. El incremento en la viscosidad favorece la incorporación de aire en la masa durante el batido, reduciendo la velocidad de

movimiento de las burbujas de aire y ayudando a la retención de aire durante el horneado. Sin embargo, esta reducción en volumen de los bizcochos que contenían harina con un 30% de humedad tratada a 120°C podía ser debido a una excesiva viscosidad que impide la expansión en el horno. Todo ello indica que el efecto de la temperatura en el volumen del bizcocho es dependiente del contenido en humedad de la muestra. Por otro lado, la dureza del bizcocho que incluye harina tratada también se redujo con respecto a la muestra control, no obstante, bizcochos elaborados con harina que presentaba la máxima humedad y con calentamiento a la mayor temperatura daba lugar a productos con la mayor dureza. De este modo, harinas tratadas en la formulación del bizcocho refuerzan la estructura e incrementan la cantidad de burbujas de aire (Fathi et al., 2016). Del mismo modo, noodles elaborados con almidón de amaranto tratado también mejoraban sus propiedades texturales al influir la capacidad de absorción de agua en el volumen de expansión y en el peso. La mayor capacidad de retención de agua en el almidón tratado era debido a una mayor asociación entre las moléculas de amilosa y amilopectina (Chandla et al., 2017).

No se obtuvieron resultados tan positivos en el producto tradicional coreano. Los valores bajos de elasticidad y cohesividad indicaban que el pastel de arroz presentaba una débil estructura a la hora de resistir a la masticación, lo cual puede ser debido a la retrogradación retardada. Sin embargo, si que se apreció una reducción en la dureza consecuencia de las reorganizaciones en la red estructural de la harina durante el tratamiento (Kim et al., 2017).

La técnica de procesado HMT puede llegar a modificar el color de los productos, siendo este uno de los atributos más importantes en la aceptabilidad por parte de los consumidores. Tanto en el bizcocho como en el pastel de arroz se observó un incremento del componente rojo y amarillo debido a las reacciones de Maillard y de caramelización durante el calentamiento. La harina con HMT disminuye la luminosidad e incrementa el componente rojo de la miga del bizcocho, sin embargo, no afecta significativamente al valor b (componente amarilla). Lo mismo ocurre en la corteza. Las reacciones de Maillard entre los grupos amino y los azúcares reductores en el almidón y la caramelización tienen lugar en la corteza durante el horneado, lo que da lugar a sustancias coloreadas que lo oscurecen, sin embargo, el color de la miga sólo se ve afectado por los ingredientes presentes en la formulación (Fathi et al., 2016). Con relación a la evaluación sensorial por el panel de cata de consumidores, tanto el bizcocho como los noodles obtuvieron puntuaciones altas. En el caso del bizcocho, se dieron puntuaciones superiores a 5 a excepción de aquel que contenía harina tratada a 120°C y 30% de humedad debido a su estructura densa, bajo volumen y color oscuro (Fathi et al., 2016). Los noodles elaborados a partir de almidón tratado fueron mejor valorados en parámetros de color, aroma y sabor en comparación a los obtenidos a partir de almidón nativo de amaranto y almidón de maíz. Sin embargo, los noodles elaborados a partir de almidón de maíz fueron calificados con puntuaciones más altas en términos de apariencia con los productos que se encuentran hoy en día en el mercado. Los resultados obtenidos por Chandla et al. (2017) indican por tanto que la modificación del almidón con un tratamiento HMT permite que el producto pueda ser competitivo a nivel industrial frente a otros tipos de almidones no tratados. A diferencia de lo que sucedía en los productos anteriores, la aceptabilidad global del pastel de arroz que contenía harina tratada disminuía ligeramente resultado del flavor y del color oscuro frente a las muestras control (Kim et al., 2017).

Otra de las aplicaciones del tratamiento puede ser el incremento en el contenido de compuestos bioactivos en harinas, lo que afectaría positivamente a la calidad nutricional de los productos. Beta y Hwang (2018), en concreto, evaluaron cómo afectaba a la capacidad antioxidante y al contenido en compuestos fenólicos y carotenoides en harina de maíz. Las muestras fueron calentadas en un horno de aire caliente a 100°C durante 30, 60 y 180 minutos. Se observó una reducción significativa en los niveles de carotenoides. Sin embargo, los compuestos fenólicos, a pesar de que disminuían durante los primeros 60 minutos de calentamiento, incrementaban su contenido tras 180 minutos. El ácido ferúlico fue el compuesto fenólico más abundante y estable (Beta & Hwang, 2018).

Aunque son necesarios más estudios a la hora de evaluar la funcionalidad del tratamiento y su aplicación en la industria, la mejora de la estabilidad térmica y la reducción de la retrogradación son algunos de los resultados prometedores que aportaría un tratamiento a alta temperatura y baja humedad en harinas y almidones sin gluten (Tabla 1.)

TRATAMIENTO CON MICROONDAS

Las microondas son ondas electromagnéticas en un rango de frecuencia de 300 a 300000 MHz. Las moléculas polares absorben la energía de las microondas y se orientan con relación al campo eléctrico. La rapidez del cambio de su orientación genera calor por fricción molecular resultando en un calentamiento a través de la muestra, más rápido que el calentamiento convencional (Román, Martínez, Rosell & Gómez, 2015). Esta tecnología ha sido ampliamente usada con el fin de inactivar enzimas como la lipasa y la lipooxigenasa en algunos productos agrícolas y se caracteriza por ser efectiva a la hora de extender la vida útil de salvado de arroz y harina de trigo. En concreto, la irradiación por microondas causa un desplazamiento en los rangos de gelatinización hacia temperaturas más altas y una caída en la viscosidad y cristalinidad debida a las reorganizaciones estructurales (Yang et al., 2017). La duración de la exposición a las ondas, el contenido en humedad inicial del grano, así como la temperatura final de este controla la inactivación de dichas enzimas y la eficacia del tratamiento. Otros de los aspectos positivos de dicha tecnología son el bajo coste operacional y control durante el calentamiento ya que se trata de un proceso continuo que permite que grandes cantidades de producto sean procesadas en un corto periodo de tiempo sin que queden residuos químicos que puedan causar efectos nocivos en la población (Yadav, Anand, Kaur & Singh, 2012).

En cuanto al procedimiento a seguir, las muestras de harina o almidón se introducen en un homogeneizador, en el cual se va añadiendo pequeñas cantidades de agua con el fin de ajustar el contenido de humedad al valor definido, siempre teniendo en cuenta la humedad inicial de las muestras. Tras un periodo de espera de 24 horas a temperatura ambiente y posterior precalentamiento del microondas, se lleva a cabo el tratamiento en las condiciones de proceso seleccionadas en función del estudio. Las muestras tratadas son almacenadas en recipientes de plástico herméticos a 4°C hasta que se lleven a cabo los análisis oportunos.

Tabla 1. Influencia del tratamiento hidrotérmico (HMT) en la funcionalidad de harinas y almidones sin gluten

| MATERIAL | CONDICIONES HMT | | | OBSERVACIONES | MODIFICACIONES | REF. |
|----------------------------|--------------------|-------------|----------|--|---|------------------------------|
| | HUMEDAD | TEMP. | TIEMPO | | | |
| Harina de sorgo | 20 / 25% | 100°C | 10 horas | Disminuye el contenido de amilosa soluble e incrementa el contenido de amilosa insoluble Formación de complejos amilosa-amilosa y amilosa-lípidos | Reducción en la solubilidad y en el poder de hinchamiento del almidón Reducción de la viscosidad Mayor dureza de los geles Aumento de la temperatura de gelatinización | (Sun et al., 2014) |
| Almidón de sorgo | | | | | | |
| Harina de arroz | 20 / 25 / 30% | 100°C | 16 horas | Reorganización estructural y asociación entre las cadenas de amilosa y amilopectina Desnaturalización proteica | Reducción de la viscosidad (valores inferiores en harina de arroz) Menor dureza en los geles Aumento de la temperatura de gelatinización a mayor contenido en humedad | (Puncharnon & Uttapap, 2013) |
| Almidón de arroz | | | | | | |
| Harina de trigo sarraceno | 20 / 25 / 30 / 35% | 110°C | 16 horas | Incremento de movilidad de las cadenas y estructuras helicoidales Asociación de las regiones cristalinas Desnaturalización proteica y formación de complejos amilosa-lípidos Proyección de uso en noodles y sopas | Aumento de la temperatura de gelatinización (mayor en harina por contenido proteico) Menor dureza Estable frente a calentamiento continuo | (Xiao et al., 2017) |
| Almidón de trigo sarraceno | | | | | | |
| Harina de mijo | 20 / 30% | 100 / 120°C | 3 horas | Aplicación en bizcocho Se favorece la incorporación de aire Menor luminosidad (disminuye L*) y aumento componente roja y amarilla Aceptabilidad global superior a 5 | Mayor volumen y viscosidad (bizcocho) Mayor consistencia a mayor humedad y temperatura (bizcocho) Estructura densa y bajo volumen en bizcocho con harina con 30% de humedad tratada a 120°C | (Fathi et al., 2016) |

Tabla 1. Influencia del tratamiento hidrotérmico (HMT) en la funcionalidad de harinas y almidones sin gluten (continuación)

| MATERIAL | CONDICIONES HMT | | | OBSERVACIONES | MODIFICACIONES | REF. |
|---------------------------|-----------------|-------------|----------------------|--|--|------------------------|
| | HUMEDAD | TEMP. | TIEMPO | | | |
| Harina de arroz | 20% | 100 / 110°C | 1 / 2 horas | Aplicación en pastel de arroz coreano Reorganización estructural Disminución de la luminosidad (disminuye L*) y aumento componente roja y amarilla en harina y pastel Menor aceptabilidad global | Reducción de la viscosidad (harina) Reducción en la dureza (pastel) Baja elasticidad y cohesividad Mayor estabilidad al calentamiento Retrogradación retardada | (Kim et al., 2017) |
| Almidón de amaranto | 28% | 110°C | 150 minutos | Aplicación en noodles Asociación entre cadenas de amilosa y amilopectina Puntuaciones altas en parámetros de color, aroma y sabor | Aumento capacidad de retención de agua y temperatura de pico (harina) Aumento de volumen y peso (noodles) | (Chandla et al., 2017) |
| Harina de maíz | 20% | 100°C | 30, 60 y 180 minutos | Ácido ferúlico como compuesto más abundante y estable | Incremento en el contenido de compuestos fenólicos a mayor tiempo de tratamiento (180 minutos) | (Beta & Hwang, 2018) |
| Harina de trigo sarraceno | 15 / 25 / 35% | 120°C | 1 / 3 / 5 horas | Incremento de la hidrofobicidad de prolaminas y glutelinas en condiciones HMT de baja humedad y tiempo en harinas sin gluten con alto contenido proteico | Incremento de la viscosidad | (Collar, 2017) |
| Harina de sorgo | | | | | | |

Cabe destacar que a diferencia de los almidones, las harinas presentan un valor nutricional elevado y el proceso de extracción es más económico y de bajo impacto medioambiental (Román et al., 2015). Diversos autores han estudiado el efecto de las ondas microondas en harina de arroz (Pérez-Quirce, Ronda, Lazaridou & Biliaderis, 2017; Villanueva, Harasym, Muñoz & Ronda, 2018), harina de mijo (Yadav et al., 2012), harina de maíz (Román et al., 2015) y almidón de maíz tipo waxy (Yang et al., 2017).

Influencia del tratamiento microondas en las propiedades de empastado y viscosidad

En los distintos estudios se observó cómo las asociaciones entre cadenas y los cambios en la cristalinidad a consecuencia de la ruptura de los gránulos de almidón que ocasiona el tratamiento aumentan la temperatura de empastado y disminuyen la viscosidad. La temperatura incrementa a medida que aumenta el tiempo de tratamiento, lo que indica que las harinas o los almidones tratados presentan mayor dificultad para absorber agua y empezar el hinchamiento. La alta cristalinidad y rigidez de los gránulos de almidón impide la absorción de agua. De hecho, el incremento de la cristalinidad promueve un retraso en el comienzo de la gelatinización (Román et al., 2015). En el estudio en harina de maíz, sin embargo, no se observó rotura de los gránulos de almidón, lo que indica que la gelatinización no es completa. Esto es debido a que la temperatura alcanzada o el tiempo de tratamiento no es suficiente, de modo que a tiempos bajos de tratamiento, tiene lugar un incremento en la viscosidad, mientras que tiempos más prolongados dan lugar al efecto contrario (Román et al., 2015). Como se puede observar en la Tabla 2., la potencia seleccionada por Román et al. (2015) es de 400 W, inferior a la que se emplea en el resto de estudios, siendo la razón de que la temperatura alcanzada no fuera la suficiente para modificar la funcionalidad de la harina. De acuerdo con Villanueva et al. (2018), los mayores cambios en la harina de arroz tienen lugar en los dos últimos minutos de tratamiento cuando la humedad de la muestra se encuentra por debajo del 10% y la temperatura ronda los 150°C. Yadav et al. (2012), establece como combinación más óptima a la hora de conseguir adecuadas propiedades reológicas 80 segundos de exposición con un contenido de humedad de la harina de mijo del 18%. Otros fenómenos que se ven afectados por el tratamiento son el breakdown/estabilidad (diferencia entre el pico de viscosidad y la viscosidad de caída) y el setback/retrogradación (diferencia entre la viscosidad final y la viscosidad de caída), la reducción en los mismos conlleva que las harinas sean más estables al calentamiento y haya una menor retrogradación de la amilosa. El incremento de las interacciones reduce la salida de la amilosa explicando estos resultados (Villanueva et al., 2018). Es importante destacar que los cambios físicos observados en los distintos estudios suceden en un período de tiempo más corto que en un tratamiento convencional HMT.

Influencia del tratamiento microondas en la temperatura de gelatinización

Las ondas microondas ocasionan un incremento en la temperatura de gelatinización, a medida que aumenta el tiempo de tratamiento, como consecuencia de la formación de complejos amilosa-amilosa y amilosa-lípidos y de cadenas de amilopectina de doble hélice que aumentan la temperatura requerida para llegar a la disociación (Villanueva et al., 2018; Yang et al., 2017).

Aplicaciones de harinas y almidones tratados con microondas

La harina de arroz es una de las más empleadas en la producción sin gluten, sin embargo, las propiedades funcionales son insuficientes para crear productos de elevada calidad. Por ello, tanto las tecnologías innovadoras de las que se ha hablado como la irradiación por microondas son adecuadas a la hora de conseguir estructuras más estables. En el estudio llevado a cabo por Pérez-Quirce et al. (2017), diferentes muestras de harina de arroz se sometieron a un tratamiento microondas de 900 W y posteriormente se emplearon en la elaboración de pan. Se observó como el tratamiento térmico afecta a la funcionalidad del almidón, dando lugar a harinas más estables durante calentamiento y agitación continua. Los panes elaborados con harina tratada con la mayor intensidad presentaban un 7% más de volumen. Así mismo, la elevada viscosidad de la masa permite una mejor retención del gas. Se observó como el tratamiento afectaba a los parámetros de color, de modo que los valores de h y C^* incrementaban a mayor tiempo de tratamiento, obteniendo un pan más amarillento y luminoso que el pan control. Es posible que algunas de las enzimas responsables del desarrollo del color, como las α -amilasas, sean parcialmente inactivadas (Pérez-Quirce et al., 2017).

ALTAS PRESIONES HIDROSTÁTICAS (HPP)

La tecnología de las altas presiones hidrostáticas actúa en la mayor parte de componentes alimentarios como agua, proteínas y almidón, modificando las propiedades funcionales de proteínas e inactivando enzimas responsables del acortamiento de la vida útil de los productos (Cappa et al., 2016a). Cabe destacar que la presión es isostática y homogénea en cada uno de los puntos de la muestra, de modo que el tiempo de procesado no es dependiente del tamaño del producto (Cappa et al., 2016b).

En los materiales de base almidón, las altas presiones hidrostáticas tienen la capacidad de crear nuevas estructuras y texturas al alterar la estructura de biopolímeros como las proteínas y el almidón y promover la formación de una red proteica. Se produce una completa gelatinización del almidón y una desnaturalización proteica a medida que se incrementa la fuerza mecánica, mejorando la funcionalidad y aumentando las propiedades viscoelásticas, siempre en función del sustrato y del número de grupos sulfhidrilo libres. El incremento de la elasticidad promueve una mejor retención del gas, y, en consecuencia, un mejor volumen. Otros beneficios posibles de la pre-gelatinización del almidón son la retención de humedad y el incremento de la vida útil de la masa horneada. Cabe destacar que la sensibilidad de la estructura proteica al tratamiento se debe fundamentalmente a las débiles interacciones electrostáticas e hidrofóbicas y a las reacciones de intercambio entre los grupos tiol y sulfhidrilo (Naqash et al., 2017; Singh & Aastha, 2014; Vallons et al., 2011).

Las altas presiones ocasionan que el gránulo de almidón incremente su tamaño y gelatinice sin perder la integridad, lo que si ocurre normalmente durante un tratamiento térmico. En general, el grado de hinchamiento depende fundamentalmente de la presión

Tabla 2. Influencia de la irradiación por microondas en la funcionalidad de harinas y almidones sin gluten

| MATERIAL | CONDICIONES MICROONDAS | | | OBSERVACIONES | MODIFICACIONES | REFERENCIA |
|----------------------|------------------------|------------|---|---|---|-----------------------------|
| | POTENCIA | FRECUENCIA | TIEMPO | | | |
| Harina de arroz | 900 W | 2,5 GHz | 0 – 4 minutos (ciclos de intervalo de 20 s) | Aplicación en pan Mayor estabilidad al calentamiento Pan más luminoso, amarillo y vivo que pan control (menor intensidad de reacciones de Maillard) Inactivación parcial de α -amilasa | Incremento de volumen en pan (+7%) Incremento de la viscosidad Mayor retención de gas durante la fermentación | (Pérez-Quirce et al., 2017) |
| Harina de arroz | 900 W | 2,5 GHz | 2 / 4 / 6 / 8 / 12 / 16 minutos (ciclos de 20 s de exposición y 40 s de descanso) | Asociación entre cadenas Formación de complejos amilosa-amilosa y amilosa-lípidos Se disminuye la salida de amilosa Efecto en menor tiempo con respecto a tratamiento convencional HMT | Incremento de la temperatura de gelatinización y de empastado Disminución de la viscosidad Mayor estabilidad al calentamiento Menor retrogradación | (Villanueva et al., 2018) |
| Harina de mijo | 900 W | 2450 MHz | 40 - 100 segundos | Descenso en la actividad lipásica Estudio de vida útil aceptable durante treinta días en condiciones ambientales | Descenso en la viscosidad por ruptura de los gránulos de almidón | (Yadav et al., 2012) |
| Harina de maíz | 400 W | --- | 0,5 / 1 / 2 / 4 minutos | Gelatinización incompleta por insuficiente temperatura o tiempo de tratamiento | A bajos tiempos, incremento en la viscosidad. A tiempo prolongados, efecto contrario. | (Román et al., 2015) |
| Almidón de maíz waxy | 1600 W | 2450 MHz | 5 / 10 / 20 minutos | Formación de cadenas de amilopectina Aplicación en masas panarias afectadas por la retrogradación | Incremento de la temperatura de gelatinización y empastado Disminución de la viscosidad Menor efecto de la retrogradación | (Yang et al., 2017) |

aplicada, tiempo de tratamiento, temperatura, concentración y tipo de muestra (suspensiones acuosas de harina y almidón de distintos orígenes botánicos) (Singh & Aastha, 2014).

En este caso, el procedimiento a seguir es similar también para los distintos estudios y sólo varían las condiciones de proceso. En primer lugar, la muestra seleccionada se mezcla con agua con el fin de obtener un contenido de humedad final determinado (ver Tabla 3.). Las suspensiones de almidón/harina – agua son envasadas a vacío en bolsas de polietileno. Es importante asegurarse de que se ha realizado un sellado correcto para prevenir el contacto entre el fluido de presurización y la suspensión. A la hora de llevar a cabo el tratamiento, de manera generalizada la presión se incrementa con una tasa de 300 MPa/minuto y la temperatura de la vasija se controla termostáticamente a lo largo de todo el tratamiento, a temperaturas fijas de 20°C.

Diversos autores han estudiado el efecto de las altas presiones en harina de sorgo (Vallons, Ryan, Koehler & Arendt, 2010), harina de arroz (Cappa et al., 2016a; Cappa et al., 2016b), harina de arroz tipo waxy (Cappa et al., 2016b), harina de arroz blanco, trigo sarraceno y teff (Vallons et al., 2011), harina de avena (Hüttner, Dal Bello, Poutanen & Arendt, 2010), harina de patata dulce (Carballo, Mu, Zhang & Ji, 2018) y almidón de maíz (Cappa et al., 2016a; Cappa et al., 2016b) (Tabla 3.).

Influencia de HPP en las propiedades reológicas de las masas

La aplicación de altas presiones en un rango de entre 100 y 600 MPa en suspensiones de harina y almidón genera en las masas mayor fuerza y elasticidad debido al hinchamiento y a la salida de la amilosa, lo cual está relacionado a su vez con una mayor viscosidad en la suspensión. La gelatinización de los gránulos de almidón es, por tanto, el principal responsable del incremento de fuerza en la masa (Vallons et al., 2010). De acuerdo con Vallons et al. (2010), a presiones de 200 MPa, las masas obtenidas a partir de suspensiones de harina de sorgo tratadas presentan baja consistencia debido a la despolimerización de los enlaces disulfuro, mientras que a 600 MPa, se obtienen masas más fuertes por la gelatinización del almidón. A pesar de que es difícil comparar los resultados obtenidos en los distintos estudios por tratarse de muestras distintas, las masas obtenidas a partir de harina de arroz y teff presentan mayor suavidad. Dichos gránulos en las suspensiones quedan estabilizados, adquiriendo una mayor resistencia a la ruptura bajo un tratamiento térmico (Vallons et al., 2011). Mención especial requiere la harina de avena, la cual está ganando posiciones en este mercado de productos en particular por ser una buena fuente de fibra soluble viscosa que contribuye a la bajada del colesterol. En este caso, el tratamiento también mejora la funcionalidad de la harina, en parte debido a la pregelatinización del almidón que ocasiona un incremento en la elasticidad de la masa. Signo de una mayor estabilidad es también el incremento en el porcentaje de recuperación tras la deformación (Hüttner et al., 2010). En base a todo ello, son numerosas las muestras que se ven afectadas positivamente por las altas presiones incrementando la fuerza y elasticidad, lo cual sería de enorme aplicación a la hora de mejorar la retención de gas, y en consecuencia el volumen y la textura de un producto tan demandado en el mercado como es el pan. Si bien es cierto, al igual que ocurre en la harina de sorgo, los cambios observados en las propiedades reológicas de las masas obtenidas a partir de harina de avena son significativos a presiones

superiores a los 350 MPa. Seleccionar, por tanto, presiones de aplicación óptimas permite desarrollar masas panarias con una calidad global mejorada.

Aplicaciones de harinas y almidones tratados con HPP

Una vez se conoce que el tratamiento ejerce una modificación beneficiosa en las masas obtenidas a partir de suspensiones de harinas y almidones tratados, es importante confirmar que la misma tendencia sucede en el producto donde vaya a ser adicionado. La aplicación en pan ha sido estudiada por varios autores, a partir de almidón de maíz y harina de arroz (Cappa et al., 2016a) y a partir de harina de patata dulce, harina caracterizada por ser fuente de fibra dietética, minerales, vitaminas y compuestos bioactivos como ácidos fenólicos y antocianinas, originaria de Centroamérica (Carballo et al., 2018). En ambos casos, la mejor capacidad de captación de agua, y en consecuencia, la buena consistencia de las masas dio como resultado panes elaborados caracterizados por una óptima fermentación, elevado volumen y una buena suavidad de la miga. Así mismo, las cinéticas de dureza obtenidas son menores debido a las modificaciones por la presión. Estudios de vida útil y tras 72 horas de almacenamiento en los panes elaborados con almidón de maíz y harina de arroz dieron como resultado bajas actividades de agua debido a la alta capacidad de retención de agua y baja dureza, lo que permitió confirmar las hipótesis realizadas en el estudio previo (Cappa et al., 2016a).

ULTRASONIDOS

Durante el tratamiento con ultrasonidos los efectos son principalmente mecánicos, físicos y químicos. El efecto conservador de los ultrasonidos está asociado a los fenómenos de cavitación gaseosa, debidos a la generación y evolución de microburbujas en un medio líquido sometido a ciclos alternos de compresión y descompresión. El resultado es la formación ininterrumpida de microburbujas que se expanden en la alternancia de los ciclos de presión y al alcanzar un tamaño crítico implosionan o colapsan violentamente (Lohani & Muthukumarappan, 2017). En concreto, la mayor parte de las aplicaciones de ultrasonidos en sistemas de base almidón tienen lugar en un sistema bifásico líquido-sólido con agua como medio de transmisión. La energía acústica de los ultrasonidos no puede ser absorbida por las moléculas y por ello es transformada a través del fenómeno de la cavitación. La explosión de las burbujas genera fuerzas de cizalla, cuya energía incrementa drásticamente la temperatura y modifica las condiciones físicas y químicas al romper las cadenas de los polímeros. Además, se generan radicales libres, radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) y radical hidrógeno ($\cdot\text{H}$) por la disociación de las moléculas de agua. El efecto de los ultrasonidos depende de diversos factores como son la potencia y frecuencia de los ultrasonidos, temperatura, tiempo de tratamiento y propiedades de la harina o almidón, especialmente concentración y origen botánico (Sujka & Jamroz, 2013; Zhu, 2015).

La técnica requiere un ajuste del contenido de humedad de las distintas muestras. Para ello, se adiciona la cantidad adecuada de agua destilada en función de las condiciones de humedad seleccionadas y se lleva a cabo una homogeneización. Posteriormente, la

Tabla 3. Influencia de las altas presiones hidrostáticas (HPP) en la funcionalidad de harinas y almidones sin gluten

| MATERIAL | CONDICIONES HPP | | | | OBSERVACIONES | MODIFICACIONES | REF. |
|---------------------------|--|---------------------------------|-----------|----------------|---|---|-------------------------|
| | MUESTRA | PRESIÓN | TEMP. | TIEMPO | | | |
| Harina de sorgo | Suspensiones harina - agua (40 g/100g) | 200 / 300 / 400 / 500 / 600 MPa | 20°C | 10 minutos | A presiones de 200 MPa tiene lugar la despolimerización de los enlaces disulfuro. Gelatinización del almidón a presiones de 600 MPa | Incremento de la fuerza y de la elasticidad a presiones superiores a 300 MPa Incremento de la viscosidad | (Vallons et al., 2010) |
| Harina de arroz | Suspensiones harina/almidón - agua (40 g/100g) | 400 / 600 MPa | 20 / 40°C | 5 / 10 minutos | Posibles efectos beneficiosos en estudios de vida útil de pan | Incremento de la viscosidad La harina de arroz tipo waxy se ve menos afectada por el tratamiento debido a menor contenido en amilosa | (Cappa et al., 2016b) |
| Harina de arroz waxy | | | | | | | |
| Almidón de maíz | | | | | | | |
| Harina de arroz | Suspensiones harina/almidón - agua (1:0,5) | 600 MPa | 40°C | 5 minutos | Aplicación en pan Óptima fermentación Resultados óptimos en estudios de vida útil | Óptima capacidad de retención de agua y buena consistencia de la masa Elevado volumen y buena suavidad en miga Incremento de la elasticidad | (Cappa et al., 2016a) |
| Almidón de maíz | | | | | | | |
| Harina de trigo sarraceno | Suspensiones harina - agua (40 g/100g) | 200 / 400 / 600 MPa | 20°C | 10 minutos | Polimerización proteica por las reacciones de intercambio entre los grupos tiol y sulfhidrilo Mayor estabilidad al tratamiento térmico | Incremento en la elasticidad Incremento de la suavidad de la masa | (Vallons et al., 2011) |
| Harina de arroz blanco | | | | | | | |
| Harina de teff | | | | | | | |
| Harina de avena | Suspensiones harina - agua (1:0,95) | 200 / 300 / 350 / 400 / 500 MPa | 20°C | 10 minutos | Gelatinización del almidón A presiones de 350 MPa, la componente elástica es predominante | Incremento de la viscosidad Incremento de la elasticidad Aumenta el porcentaje de recuperación tras la deformación | (Hüttner et al., 2010) |
| Harina de patata dulce | Suspensiones harina - agua (1:4) | 100 / 200 / 300 / 400 MPa | 25°C | 20 minutos | Aplicación en pan Descenso en la luminosidad (harina y pan) | Incremento de la elasticidad Incremento de volumen a 400 MPa Disminución de la dureza y gomosidad a 400 MPa | (Carballo et al., 2018) |

suspensión se introduce en un vaso de precipitados con el fin de ser tratada. En algunos de los estudios, las muestras se someten a una centrifugación y secado en una sala a temperatura ambiente durante 24 horas hasta que se lleven a cabo los correspondientes análisis.

A la hora de estudiar el efecto de los ultrasonidos se han seleccionado harina de sorgo (Lohani & Muthukumarappan, 2017; Sullivan, Pangloli & Dia, 2018), almidón de maíz (Herceg et al., 2010; Jambrak et al., 2010; Luo et al., 2008; Sujka & Jamroz, 2013), almidón de arroz (Sujka & Jamroz, 2013), almidón de patata (Sujka & Jamroz, 2013) y almidón de patata dulce (Zheng et al., 2013). Sin embargo, no se han encontrado estudios acerca de cómo la modificación de las propiedades funcionales de las harinas y almidones tras el tratamiento puede ser de aplicación en el desarrollo de productos sin gluten (Tabla 4.).

Influencia de los ultrasonidos en la solubilidad

De acuerdo con diversos autores, se ha observado que los ultrasonidos incrementan el poder de hinchamiento en las distintas matrices estudiadas, fenómeno asociado con la capacidad de absorción de agua y la solubilización. Son los daños físicos y químicos que tienen lugar en el gránulo por las fuerzas cavitacionales, y en consecuencia, la reorganización estructural de la amilosa y la amilopectina, los que genera una mayor permeabilidad en el gránulo durante la etapa de calentamiento y favorecen la entrada de agua y la consecuente hidratación (Jambrak et al., 2010). Las moléculas de agua se unen por enlaces hidrógeno a los grupos hidroxilo libres de amilosa y amilopectina (Sujka & Jamroz, 2013). Cabe destacar que la región amorfa de los gránulos de almidón, es dañada en mayor medida tras el tratamiento (Luo et al., 2008; Zheng et al., 2013). Los cambios en las propiedades de hinchamiento y solubilización están influenciados por el tipo y composición de almidón. Así mismo, el poder de hinchamiento aumenta a medida que lo hace la intensidad y el tiempo de tratamiento (Zhu, 2015).

Influencia de los ultrasonidos en las propiedades de empastado y viscosidad

En base a distintos estudios, se ha comprobado que un tratamiento de esta magnitud es capaz de reducir la viscosidad de una solución de base almidón. Esto es debido a la degradación de los gránulos como consecuencia del ataque de los radicales $\cdot\text{OH}$ generados por la escisión de las moléculas de agua y por los efectos mecánicos tras el tratamiento. Sin embargo, la temperatura de empastado no se ve afectada por los ultrasonidos (Jambrak et al., 2010; Luo et al., 2008).

Influencia de los ultrasonidos en la temperatura de gelatinización

El tratamiento con ultrasonidos no ocasiona una tendencia clara en los resultados obtenidos con respecto a la temperatura de gelatinización. Varios estudios han demostrado que los ultrasonidos incrementan la temperatura de gelatinización, no tienen mucha influencia o incluso la llegan a disminuir. Esta discrepancia en los resultados hallados puede ser debida a las diferentes condiciones experimentales empleadas y a la composición y tipo de muestra (Zhu, 2015). De acuerdo con Herceg et al. (2010), la temperatura de gelatinización disminuía debido a un incremento de la

actividad mecánica en la región amorfa del gránulo de almidón, mientras que la región cristalina se veía debilitada. Por el contrario, este parámetro aumentaba en almidón de patata tratado, indicando un estado más tardío del hinchamiento del gránulo durante el calentamiento (Zheng et al., 2013).

Influencia de los ultrasonidos en el contenido proteico y actividad antioxidante

Los ultrasonidos pueden llegar a mejorar la actividad antioxidante y la composición en determinados nutrientes de las muestras tratadas. Lohani y Muthukumarappan (2017) observaron que el contenido fenólico total y la actividad antioxidante de harina de sorgo tratada era un 41 y 42,4%, respectivamente, mayor que la harina de sorgo control, debido a la liberación de los enlaces fenólicos de la matriz proteica de almidón. Los ácidos salicílico y ferúlico fueron los más abundantes en las muestras sometidas a ultrasonidos (Lohani & Muthukumarappan, 2017). Un estudio similar fue el realizado por Sullivan et al. (2018), también en harina de sorgo. En este caso, el tratamiento incrementaba el contenido en proteína soluble de las muestras tratadas y en consecuencia la digestibilidad de la harina mejoraba al verse alterada la estructura secundaria de la kafirina, proteína más abundante en el sorgo (Sullivan et al., 2018).

PULSOS ELÉCTRICOS DE ALTO VOLTAJE

Los pulsos eléctricos de alto voltaje (PEAV) son una tecnología de procesamiento no térmica que se caracteriza por la aplicación de campos eléctricos de alto voltaje (10-50 kV/cm), de forma intermitente y durante periodos de tiempo del orden de microsegundos (2-20 μ s) a muestras situadas entre dos electrodos. Cuando se aplica un campo eléctrico se produce una diferencia de potencial entre ambos lados de la membrana (potencial transmembrana) y en el momento en que esta diferencia de potencial alcanza un valor crítico determinado, que varía en función del tipo de célula, se origina la formación irreversible de poros en la membrana celular (electroporación) y en consecuencia la pérdida de su integridad, incremento de la permeabilidad y finalmente destrucción de la célula afectada. Este fenómeno está influenciado por el contenido en agua de la muestra seguido de la intensidad del campo eléctrico y del tiempo de tratamiento (Lohani, U. C., & Muthukumarappan, 2016).

En este caso, de nuevo se debe llevar a cabo la preparación de suspensiones. Para ello, a las diferentes muestras de harina o almidón se le adiciona la cantidad correspondiente de agua destilada. Se debe adicionar también suficiente cantidad de KCl con el fin de ajustar la conductividad eléctrica. Las suspensiones se homogenizan y se aplica el tratamiento. Finalmente, las muestras se enfrían a temperatura ambiente y posteriormente se someten a secado en un horno a 40°C durante 24 horas hasta llevar a cabo los correspondientes análisis.

Cabe destacar que en la actualidad se han realizado pocas investigaciones con relación al efecto de los pulsos eléctricos de alto voltaje en materiales de base almidón. Algunas de las materias a estudio han sido harina de sorgo (Lohani & Muthukumarappan, 2016), almidón de patata (Han, Zeng, Yu, Zhang & Chen, 2009a) y almidón de maíz (Han, Zeng, Zhang & Yu, 2009b).

Tabla 4. Influencia de los ultrasonidos en la funcionalidad de harinas y almidones sin gluten

| MATERIAL | CONDICIONES ULTRASONIDOS | | OBSERVACIONES | MODIFICACIONES | REFERENCIA |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|--|----------------------------------|
| | POTENCIA | TIEMPO | | | |
| Almidón de maíz | 100 / 300 / 400 W | 15 / 30 minutos | Ruptura de la región cristalina del gránulo Mayor capacidad de absorción de agua | No hay variación en la temperatura de gelatinización Aumenta el poder de hinchamiento y la solubilidad | (Jambrak et al., 2010) |
| Almidón de maíz | 100 W | 30 minutos | Reorganización estructural de la amilosa y la amilopectina Mayor daño mecánico en la región amorfa Degradación del gránulo por ataque de ·OH | Aumenta el poder de hinchamiento y la solubilidad Disminuye la viscosidad La temperatura de empastado no varía | (Luo et al., 2008) |
| Almidón de maíz tipo waxy | | | | | |
| Almidón de maíz | 100 / 300 / 400 W | 15 / 30 minutos | Mayor permeabilidad del gránulo Mayor daño mecánico en la región amorfa | Disminuye la temperatura de gelatinización Aumenta el poder de hinchamiento y la solubilidad | (HerCeg, et al., 2010) |
| Almidón de maíz | 170 W | 30 minutos | Las moléculas de agua se unen por enlaces hidrógeno a los grupos hidroxilo libres de amilosa y amilopectina | Aumenta el poder de hinchamiento y la solubilidad Disminuye la viscosidad | (Sujka & Jamroz, 2013) |
| Almidón de arroz | | | | | |
| Almidón de patata | | | | | |
| Almidón de patata dulce | 720 W | 10 / 20 / 30 / 45 / 60 minutos | Mayor daño mecánico en la región amorfa | Aumenta el poder de hinchamiento y la solubilidad Disminuye la viscosidad Aumenta la temperatura de gelatinización | (Zheng et al., 2013) |
| Harina de sorgo | 20 / 25 / 30 W/cm ² | 120 / 180 / 240 segundos | Liberación de los enlaces fenólicos de la matriz proteica Predominan ácido salicílico y ácido ferúlico | Incremento del contenido fenólico total (+41%) Incremento de la actividad antioxidante (+42,4%) | (Lohani & Muthukumarappan, 2017) |
| Harina de sorgo | 750 W | 5 / 10 minutos | Alteración de la estructura secundaria de la kafirina | Incremento del contenido en proteína soluble Mejora en la digestibilidad | (Sullivan et al., 2018) |

Tras el tratamiento de pulsos eléctricos, la parte exterior del gránulo queda dañada, lo que ocasiona que el interior pueda absorber agua más eficazmente y aumente el poder de hinchamiento (Han et al., 2009b).

De acuerdo con Han et al. (2009a, 2009b), el pico de viscosidad disminuye a medida que se incrementa la fuerza del campo eléctrico. La muestra es más sensible al fenómeno de la gelatinización debido a la reorganización y destrucción molecular tras el tratamiento.

Los resultados obtenidos por diversos autores indican que la temperatura de gelatinización disminuye debido a la pérdida de la estructura cristalina por la alta intensidad del tratamiento. Las moléculas de agua pueden reaccionar con mayor facilidad, disminuyendo la temperatura necesaria para que tenga lugar el proceso (Han et al., 2009b).

El sorgo contiene compuestos fenólicos en forma de ácidos fenólicos y flavonoides. En los últimos años, se han aplicado tecnologías no térmicas con el fin de extraer estos compuestos bioactivos e incrementar las propiedades nutricionales y funcionales de los alimentos. Los resultados obtenidos por Lohani y Muthukumarappan (2016) demostraban que el tratamiento generaba un mayor colapso celular en la harina de sorgo y en consecuencia una liberación de los compuestos fenólicos.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Debido a la alta incidencia de la enfermedad celiaca y de otras alergias relacionadas con el gluten, es necesario que la industria alimentaria aumente el número de estrategias con el fin de desarrollar productos sin gluten de elevada calidad. Los diferentes estudios tratados ponen de manifiesto la modificación física de harinas y almidones sin gluten a través de diferentes técnicas de procesado. Estos tratamientos, no sólo permiten mejorar la estabilidad térmica e incrementar la vida útil de las materias, sino que también influyen en otras propiedades de gran importancia a la hora de desarrollar productos que sean valorados por el consumidor. Sin embargo y a pesar del esfuerzo por parte de la industria, estos todavía se alejan de lo que el consumidor está demandando y necesitan una mejora en comparación con los productos elaborados a base de trigo. Por ello, el empleo de estas técnicas como solución no convencional es importante a la hora de obtener productos de calidad y mejorar las condiciones de vida de la población celiaca y de todos aquellos que por razones dietéticas o culturales se decanten por este tipo de productos.

Las propiedades que se ven afectadas en mayor medida por los tratamientos son el poder de hinchamiento y solubilidad, viscosidad y temperatura de gelatinización, variaciones que influyen de manera positiva en la textura del producto. Si bien es cierto, se deben tener en cuenta las siguientes limitaciones a la hora de discutir los resultados obtenidos en los distintos estudios:

- El diferente origen botánico de harinas y almidones dificulta la comparación de los resultados. Se trata de matrices con distinto contenido en amilosa y amilopectina.

- Seleccionar unas condiciones de proceso u otras es importante en la obtención de resultados significativos. Como ya se ha visto, condiciones de presión por encima de los 300 MPa ejercen un efecto positivo en las características viscoelásticas de las masas en cuanto a viscosidad y elasticidad. No ocurría lo propio cuando la presión seleccionada era inferior a 300 MPa.

Los resultados obtenidos en la mejora de la funcionalidad de harinas y almidones son prometedores y además muchos de ellos han sido aplicados posteriormente en productos demandados a nivel comercial como pueden ser pan o bizcocho con evaluaciones sensoriales positivas. Los tratamientos permiten que estas masas mejoren la retención de gas y las características viscoelásticas. Sin embargo, es necesario un mayor número de estudios acerca del empleo de estas materias tratadas en productos de interés comercial y de la valoración de los mismos por paneles de cata de consumidores. Es importante conocer la aceptabilidad y la opinión de los consumidores con el fin de adaptar las formulaciones, así como llevar a cabo una optimización de los parámetros con el fin de mejorar la expansión y retención de gas en la masa. Así mismo, se requiere apoyo por parte de la industria a la hora de estudiar la accesibilidad de estas tecnologías alternativas en términos de costes económicos y aporte de valor.

Así mismo, siempre se debe tener en cuenta la salud de los consumidores, por lo que optimizar las condiciones de proceso en el caso de los ultrasonidos a la hora de reducir los efectos negativos de la formación de radicales libres es fundamental.

Los cambios observados a nivel fisicoquímico, morfológico, térmico y reológico en el almidón como componente principal son importantes a la hora de entender la eficacia de los procesos a nivel industrial. Por otro lado, y como perspectiva futura, es conveniente llevar a cabo estudios en los que la modificación funcional tenga lugar a partir de la combinación de diferentes tratamientos. La combinación de ultrasonidos con tratamiento hidrotérmico asistido con microondas o de microondas con altas presiones hidrostáticas permitiría obtener propiedades mejoradas y desarrollar nuevas aplicaciones, siempre destacando que se trata de tecnologías medioambientalmente seguras.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto AGL2015-63849-C2-2-R financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y los Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (MINECO /FEDER), de los proyectos de la Junta de Castilla y León/FEDER (Ref: VA072P17) y (VA165G18) y del proyecto de la Comisión Europea, Marie Skłodowska-Curie H2020-MSCA-IF-2015-EF (Ref: 706102).

BIBLIOGRAFÍA

Badiu, E., Aprodu, I., & Banu, I. (2014). Trends in the development of gluten-free bakery products. *Food Technology*, 38(1), 21–36.

- Beta, T., & Hwang, T. (2018). Influence of heat and moisture treatment on carotenoids, phenolic content, and antioxidant capacity of orange maize flour. *Food Chemistry*, 246, 58–64.
- Bustamante, M. Á., Fernández-gil, M. P., Churrua, I., Miranda, J., Lasa, A., Navarro, V., & Simón, E. (2017). Evolution of Gluten Content in Cereal-Based Gluten-Free Products : An Overview from 1998 to 2016. *Nutrients*, 9(1), 21.
- Cappa, C., Barbosa-cánovas, G. V, Lucisano, M., & Mariotti, M. (2016a). Effect of high pressure processing on the baking aptitude of corn starch and rice flour. *LWT - Food Science and Technology*, 73, 20–27.
- Cappa, C., Lucisano, M., Barbosa-Cánovas, G. V., & Mariotti, M. (2016b). Physical and structural changes induced by high pressure on corn starch, rice flour and waxy rice flour. *Food Research International*, 85, 95–103.
- Carballo Pérez, I., Mu, T. H., Zhang, M., & Ji, L. L. (2018). Effect of high hydrostatic pressure to sweet potato flour on dough properties and characteristics of sweet potato-wheat bread. *Journal of Food Science & Technology*, 53(4), 1087–1094.
- Casper, J. L. & Atwell, W. A. (2014). *Gluten - Free Baked Products* (AACC Inter). Estados Unidos.
- Chandla, N. K., Saxena, D. C., & Singh, S. (2017). Processing and evaluation of heat moisture treated (HMT) amaranth starch noodles; an inclusive comparison with corn starch noodles. *Journal of Cereal Science*, 75, 306–313.
- Collar, C. (2017). Significance of heat-moisture treatment conditions on the pasting and gelling behaviour of various starch-rich cereal and pseudocereal flours. *Food Science and Technology International*, 23(7), 623–636.
- Zavareze, E., & Dias, A. R. G. (2011). Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches : A review. *Carbohydrate Polymers*, 83(2), 317–328.
- Europea, C. Reglamento de ejecución (UE) N° 828/2014 de la Comisión de 30 de julio de 2014 relativo a los requisitos para la transmisión de información a los consumidores sobre la ausencia o la presencia reducida de gluten en los alimentos (2014).
- Fathi, B., Aalami, M., Kashaninejad, M., & Sadeghi Mahoonak, A. (2016). Utilization of Heat-Moisture Treated Proso Millet Flour in Production of Gluten-Free Pound Cake. *Journal of Food Quality*, 39(6), 611–619.
- Gallagher, E. (2009). *Gluten-Free Food Science and Technology* (Wiley-Blac). Singapur.
- Gao, Y., Janes, M. E., Chaiya, B., Brennan, M. A., & Brennan, C. S. (2018). Gluten-free bakery and pasta products : prevalence and quality improvement. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(1), 19–32.
- Gómez, M., & Martínez, M. M. (2016). Changing flour functionality through physical treatments for the production of gluten-free baking goods. *Journal of Cereal Science*, 67, 68–74.
- Han, Z., Zeng, X. A., Yu, S. J., Zhang, B. S., & Chen, X. D. (2009a). Effects of pulsed

- electric fields (PEF) treatment on physicochemical properties of potato starch. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 10(4), 481–485.
- Han, Z., Zeng, X. A., Zhang, B. S., & Yu, S. J. (2009b). Effects of pulsed electric fields (PEF) treatment on the properties of corn starch. *Journal of Food Engineering*, 93(3), 318–323.
- Herceg, I. L., Jambrak, A. R., Šubarić, D., Brnčić, M., Brnčić, S. R., Badanjak, M., ... & Herceg, Z. (2010). Texture and Pasting Properties of Ultrasonically Treated Corn Starch. *Czech Journal of Food Science*, 28(2), 83–89.
- Hüttner, E. K., Dal Bello, F., Poutanen, K., & Arendt, E. K. (2010). Fundamental evaluation of the impact of high hydrostatic pressure on oat batters. *Journal of Cereal Science*, 49(3), 363–370.
- Jambrak, A. R., Herceg, Z., Šubarić, D., Babić, J., Brnčić, M., Brnčić, S. R., ... & Gelo, J. (2010). Ultrasound effect on physical properties of corn starch. *Carbohydrate Polymers*, 79(1), 91–100.
- Kim, M. J., Oh, S. G., & Chung, H. J. (2017). Impact of heat-moisture treatment applied to brown rice flour on the quality and digestibility characteristics of Korean rice cake. *Food Science and Biotechnology*, 1–8.
- Lohani, U. C., & Muthukumarappan, K. (2016). Application of the pulsed electric field to release bound phenolics in sorghum flour and apple pomace. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 35, 29–35.
- Lohani, U. C., & Muthukumarappan, K. (2017). Modeling of Continuous Ultrasonication to Improve Total Phenolic Content and Antioxidant Activity in Sorghum Flour: A Comparison between Response Surface Methodology and Artificial Neural Network. *International Journal of Food Engineering*, 13(4).
- Luo, Z., Fu, X., He, X., Luo, F., Gao, Q., & Yu, S. (2008). Effect of Ultrasonic Treatment on the Physicochemical Properties of Maize Starches Differing in Amylose Content. *Starch-Stärke*, 60(11), 646–653.
- Naqash, F., Gani, A., Gani, A., & Masoodi, F. A. (2017). Gluten-free baking : Combating the challenges - A review. *Trends in Food Science & Technology*, 66, 98–107.
- O'Shea, N., Arendt, E., & Gallagher, E. (2014). State of the Art in Gluten-Free Research. *Journal of Food Science*, 79(6), 1067–1076.
- Padalino, L., Conte, A., & Del Nobile, M. A. (2016). Overview on the general approaches to improve gluten-free pasta and bread. *Foods*, 5(4), 87.
- Pérez-Quirce, S., Ronda, F., Lazaridou, A., & Biliaderis, C. G. (2017). Effect of microwave radiation pre-treatment of rice flour on gluten- free breadmaking and molecular size of β -glucans in the fortified breads. *Food and Bioprocess Technology*, 10(8), 1412–1421.
- Prakash, S., Shalini, P., & Arya, S. (2017). Nutritional , functional , phytochemical and structural characterization of gluten-free flours. *Journal of Food Measurement and 1. Prakash S, Shalini P, Arya S. Nutritional , Functional , Phytochemical and Structural Characterization of Gluten-Free Flours. J Food Meas Charact.*

2017;11(3):1284–94. *Characterization*, 11(3), 1284–1294.

- Puncha-arnon, S., & Uttapap, D. (2013). Rice starch vs. rice flour : Differences in their properties when modified by heat – moisture treatment. *Carbohydrate Polymers*, 91(1), 85–91.
- Rocchetti, G., Chiodelli, G., Giuberti, G., Masoero, F., Trevisan, M., & Lucini, L. (2017). Evaluation of phenolic profile and antioxidant capacity in gluten-free flours. *Food Chemistry*, 228, 367–373.
- Román, L., Martínez, M. M., Rosell, C. M., & Gómez, M. (2015). Effect of microwave treatment on physicochemical properties of maize flour. *Food and Bioprocess Technology*, 8(6), 1330–1335.
- Schoenlechner, R. (2017). Pseudocereals in Gluten-Free Products. In *Pseudocereals: chemistry and technology* (Wiley Blac, pp. 193–216). Oxford.
- Singh, N., & Aastha, D. (2014). Alternative Approaches Towards Gluten-Free Dough Development : Recent Trends. *Food Engineering Reviews*, 6(3), 89–104.
- Sujka, M., & Jamroz, J. (2013). Ultrasound-treated starch : SEM and TEM imaging , and functional behaviour. *Food Hydrocolloids*, 31(2), 413–419.
- Sullivan, A. C., Pangloli, P., & Dia, V. P. (2018). Impact of ultrasonication on the physicochemical properties of sorghum kafirin and in vitro pepsin-pancreatin digestibility of sorghum gluten-like flour. *Food Chemistry*, 240, 1121–1130.
- Sun, Q., Han, Z., Wang, L., & Xiong, L. (2014). Physicochemical differences between sorghum starch and sorghum flour modified by heat-moisture treatment. *Food Chemistry*, 145, 756–764.
- Vallons, K. J., Ryan, L. A., & Arendt, E. K. (2011). Promoting structure formation by high pressure in gluten-free flours. *LWT - Food Science and Technology*, 44(7), 1672–1680.
- Vallons, K. J., Ryan, L. A., Koehler, P., & Arendt, E. K. (2010). High pressure – treated sorghum flour as a functional ingredient in the production of sorghum bread. *European Food Research and Technology*, 231(5), 711–717.
- Villanueva, M., Harasym, J., Muñoz, J. M., & Ronda, F. (2018). Microwave absorption capacity of rice flour. Impact of the radiation on rice flour microstructure, thermal and viscometric properties. *Journal of Food Engineering*.
- Witczak, M., Ziobro, R., Juszczak, L., & Korus, J. (2016). Starch and starch derivatives in gluten-free systems – A review. *Journal of Cereal Science*, 67, 46–57.
- Xiao, Y., Liu, H., Wei, T., Shen, J., & Wang, M. (2017). Differences in physicochemical properties and in vitro digestibility between tartary buckwheat flour and starch modified by heat-moisture treatment. *LWT - Food Science and Technology*, 86, 285–292.
- Yadav, D. N., Anand, T., Kaur, J., & Singh, A. K. (2012). Improved Storage Stability of Pearl Millet Flour Through Microwave Treatment. *Agricultural Research*, 1(4), 399–404.

- Yang, Q., Qi, L., Luo, Z., Kong, X., Xiao, Z., Wang, P., & Peng, X. (2017). Effect of microwave irradiation on internal molecular structure and physical properties of waxy maize starch. *Food Hydrocolloids*, *69*, 473–482.
- Zheng, J., Li, Q., Hu, A., Yang, L., Lu, J., Zhang, X., & Lin, Q. (2013). Dual-frequency ultrasound effect on structure and properties of sweet potato starch. *Starch-Stärke*, *65*(7–8), 621–627.
- Zhongquan, S., Tianming, Y., Yue, Z., Xiaoting, Y., Xiangli, K., & Lianzhong, A. (2015). Effects of heat – moisture treatment reaction conditions on the physicochemical and structural properties of maize starch: Moisture and length of heating. *Food Chemistry*, *173*, 1125–1132.
- Zhu, F. (2015). Impact of ultrasound on structure, physicochemical properties, modifications, and applications of starch. *Trends in Food Science & Technology*, *43*(1), 1–17.
- Zia-ud-Din, Xiong, H., & Fei, P. (2015). Physical and Chemical Modification of Starches - A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *57*(12), 2691–2705.