

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Curso: 2020/21

**EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE HARINA DE ARROZ MODIFICADA
MEDIANTE TRATAMIENTOS CON ULTRASONIDOS SOBRE LAS PROPIEDADES
REOLÓGICAS DE LAS MASAS Y LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS PANES
SIN GLUTEN**



Alumna: Isabel Revuelta García

Tutora: Felicidad Ronda Balbás

Tutor: Antonio José Vela Corona

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

A Sergio, que estuvo repasando mis datos del Statgraphics a
pico y pala. Si eso no es amor, yo ya no sé.

A Antonio, al que espero que canonicen después de esto. Lo
que me has aguantado no tiene nombre.

A mis padres, por unos genes que no me han provocado
ninguna alergia alimentaria. Vivir sin gluten es un infierno. Muy
bien recombinado, mamá.

Índice

Índice	
Resumen	1
Abstract	1
Introducción	2
Objetivos	5
Materiales y métodos	5
Materiales	5
Métodos	6
Tratamiento por US	6
Formulación y elaboración de los panes y masas	6
Caracterización de la reología de las masas	8
Ensayos frecuencia y deformación	8
Ensayos de deformación progresiva (creep) y de recuperación progresiva (recovery)	9
Caracterización de los panes	10
Fotografías	10
Peso	10
Volumen	10
Color	10
Textura	11
Evolución de la dureza con el tiempo	11
Análisis estadístico de los resultados	11
Resultados y discusión	11
Caracterización de las masas: Reología	11
Barrido de frecuencias	12
Ensayos Creep/Recovery: Ensayos de deformación y relajación progresiva	15
Caracterización de los panes	18
Peso y Volumen	20
Color	21
Textura: ensayo TPA	22
Evolución de la dureza con el tiempo de almacenamiento	24
Conclusiones	25
Agradecimientos	26
Bibliografía	27

1. Resumen

La celiacía es un trastorno genético cuya incidencia está aumentando en las últimas décadas. Para las personas con esta intolerancia alimentaria encontrar productos con buena calidad nutricional y organoléptica es un factor esencial de su calidad de vida. No obstante, el gluten es esencial en la textura del pan; la ausencia de esta red proteica afecta muy negativamente a la calidad y textura del mismo. En este trabajo se estudió el efecto que la incorporación de harina de arroz modificada mediante tratamientos con ultrasonidos tiene en el desarrollo de panes sin gluten. Se realizó una sustitución del 30% de la harina nativa indicada en la receta por harina tratada con ultrasonidos, a tiempos de 2', 5', 10' y 20'. Se estudiaron las propiedades reológicas de masas a tres hidrataciones diferentes, 80%, 85% y 90%, y panes formulados al 80% de hidratación. No todos los tiempos de tratamiento proporcionaron mejoras significativas, pero se pudo observar una mejora general en el comportamiento reológico de las masas y el aspecto y textura de los panes tratados a US-5 y US-10. Los ensayos reológicos realizados mostraron un aumento en la consistencia de las masas, presentando mejores resultados para tiempos moderados de tratamiento que para altos. Asimismo, el volumen de los panes se vio incrementado significativamente al utilizar harinas tratadas con US respecto a los elaborados con harina nativa.

Abstract

Celiac disease is a genetic disorder whose incidence has been increasing in recent decades. For people with this food intolerance, finding products with good nutritional and organoleptic quality is an essential factor in their quality of life. However, gluten is essential in the texture of the bread; the absence of this protein network has a very negative effect on its quality and texture. The present study was centered on the effect that the incorporation of rice flour modified by ultrasound treatments has on the development of gluten-free breads. All breads were made substituting 30% of the native flour indicated in the recipe for flour ultrasound-treated, at times of 2', 5', 10' and 20'. Doughs of three different hydrations, 80%, 85% and 90%, and breads formulated at 80% hydration were studied. Not all treatment times provided significant improvements, but a general improvement in the rheological behavior of the doughs and the appearance and texture of the breads treated at US-5 and US-10 could be observed. The rheological tests carried out showed an increase in the consistency of the dough, presenting better results for moderate treatment times than for

high ones. Likewise, the volume of the breads was significantly increased when using flours treated with US.

2. Introducción

El mercado de productos sin gluten se ha visto incrementado considerablemente en los últimos años, influenciado por un aumento en la población diagnosticada con celiaquía. La celiaquía es un trastorno genético que afecta en torno al dos por ciento de la población, para el cual no existe una cura y es necesario llevar una estricta dieta libre de gluten. La enfermedad celíaca es una enteropatía crónica de carácter autoinmune, desencadenada por una intolerancia a las proteínas del gluten. Esto provoca inflamación del intestino delgado lo cual conduce a la malabsorción de ciertos nutrientes (Rodrigo and Peña, 2013) . Es significativo también en este incremento de potenciales clientes de productos sin gluten la aparición de una tendencia nutricional orientada a escoger dietas libres de gluten, no ya por razones médicas sino por considerarlas más saludables (Lebwohl and Rubio-Tapia, 2021; Witczak et al., 2016). El constante aumento de consumidores implica la creación de un nuevo nicho de mercado, de interés para la industria alimentaria, que ha tenido que diversificarse para adaptarse al uso de cereales sin gluten (O'Neill, 2010).

Los cereales son una fuente de alimento básico a nivel mundial, de los cuales el trigo es el que más impacto tiene en la nutrición humana, siendo el tercero mayor cultivado y producido tras el maíz y el arroz. Prácticamente en todas las culturas encontramos que el pan es un elemento esencial de la dieta (Collado-Fernández, 2003). La casi omnipresencia en los recetarios tradicionales de trigo o cereales con gluten - incluyendo cebada, centeno, avena y trigos ancestrales- es una de las dificultades más evidentes a la hora de producir sustitutos celíacos, puesto que se intenta emular sus texturas y sabores pero eliminando el componente estructural principal, la red proteica del gluten. El gluten representa el porcentaje mayoritario de las proteínas del trigo, entre el 80% y 90%, y es el responsable, tras la humectación de la masa, del establecimiento de una red viscoelástica (constituida por gluteninas - aportan elasticidad- y gliadinas - aportan viscosidad-) en las masas y posteriormente de la esponjosidad del pan y masas horneadas. Las harinas sin gluten presentan dificultades para funcionar como sustitutos del trigo, y sus características intrínsecas hacen complicado emplearlas con éxito en la industria alimentaria. Esto repercute muchas veces en una mayor dificultad para encontrar alimentos libres de gluten que posean una aceptable relación calidad-precio, una buena calidad nutricional y

organoléptica, y una vida útil aceptable. La ausencia de la red de gluten en el pan perjudica a la elasticidad de la masa y a su capacidad de retener gas – a la postre, a la textura y palatabilidad del pan, que en ausencia de gluten queda ácido y apelmazado-. Los cereales sin gluten generan panes con texturas pobres, desagradables de masticar y con baja aceptación por parte del consumidor. Mientras que hasta el momento la industria panadera se centraba en generar sustitutos del pan tradicional aptos para celíacos, buscando imitar la funcionalidad del gluten, actualmente trata además que dichos sustitutos presenten también un aspecto y sabor optimizado, buscando hacerlos similares a sus homólogos con gluten. La necesidad de añadir compuestos hidrocoloides como HPMC (hidroxi propil metil celulosa) para reemplazar la acción del gluten y generar esponjosidad, afecta negativamente al precio de los productos generando en ocasiones problemas de alveolado y perjudicando las propiedades organolépticas del producto (Witczak et al., 2016). La industria orienta su necesidad de desarrollar miméticos del gluten desde aproximaciones muy variadas: adición de betaglucanos (Pérez Quirce et al., 2018), sustituciones por nuevas harinas y el uso de técnicas enfocadas en modificaciones de las propiedades fisicoquímicas de las harinas para que se adapten mejor a aplicaciones concretas. Entre ellas se puede mencionar las modificaciones genéticas, mecánicas, físicas, químicas y enzimáticas, quedando comprobado que alteran sus cualidades fisicoquímicas (Zheng et al., 2013).

Acerca de los tratamientos mencionados, hay que tener en cuenta la deriva sociocultural de las preferencias alimentarias. La inclusión de organismos genéticamente modificados (OGMs), a pesar de ser inocua, presenta rechazo por parte de determinados círculos de consumidores cada vez más en boga. La aplicación de modificaciones químicas tampoco es bien aceptada, y la legislación vigente obliga a indicar la presencia de dichas modificaciones en la etiqueta. De la mano del actual rechazo generalizado al uso de químicos en productos alimenticios, la tendencia actual es la de preferir productos de “etiqueta limpia”, que son aquellos con un número mínimo de ingredientes, de fácil reconocimiento y considerados como saludables (Radeloff and Beck, 2016); paralelamente a priorizar procesos de fabricación enmarcados en “química y tecnología verde”, con un bajo impacto en el ecosistema (Kardos and Luche, 2001). Por tanto, aunque está bien estudiada la posibilidad de modificar almidones y harinas química, genética y enzimáticamente (Ellis et al., 1998; Hoover, 2010), las modificaciones físicas de los almidones y harinas se perfilan como el mejor método para producir sustitutos de productos con gluten (Zia-Ud-Din et al., 2017). Las modificaciones por medio de tratamientos por ultrasonidos (US) son un ejemplo de métodos para realizar modificaciones físicas de almidones y harinas.

Definimos los ultrasonidos como ondas mecánicas longitudinales cuya frecuencia supera los 20 kHz, que supera el límite de audición del ser humano. Para tratar harinas y almidones se emplearán equipos generadores de ultrasonido, cuya pieza principal es un transductor, que es un dispositivo que recibe energía eléctrica, la transforma y emite ondas de ultrasonidos. Existen transductores disponibles en una amplia gama de tamaños y frecuencias; y de la misma manera el diámetro de la sonda del generador de ultrasonidos permite controlar las condiciones del tratamiento. La modificación física de harinas y almidones mediante la aplicación de US depende de factores del tratamiento tales como la frecuencia de aplicación, potencia aplicada, amplitud de onda, tiempo, temperatura de tratamiento, y de factores relacionados a la muestra tratada, como su especie botánica (Cui and Zhu, 2020; Yang et al., 2019). Otro concepto a tener en cuenta en el diseño de tratamientos con US es la transmisión acústica, la fuerza física del sonido que debido a un gradiente de presión es capaz de desplazar iones y moléculas pequeñas. Cuando los US se propagan por cualquier medio, se producen varios fenómenos de cavitación acústica (Kardos and Luche, 2001). Uno de ellos consiste en la continua formación, expansión y colapso implosivo de microburbujas que generan corrientes que impactan en la superficie de la muestra tratada y generan daño a las partículas, y consecuentemente, modifican sus propiedades físicas (Laborde et al., 1998; Tervo et al., 2006); otros son la agitación, vibración, presión, fuerzas de cizallamiento, compresión y rarefacción, flujo acústico y formación de radicales libres. En el caso de las modificaciones físicas de harinas y almidones a través de US, la cavitación sucede a través del medio líquido -agua destilada- que es empleado para suspender la muestra a tratar. Estudios previos han demostrado que los tratamientos US reducen el tamaño de partícula, y que causan cambios en la estructura interna de los gránulos de almidón de manera que las propiedades tecnofuncionales quedan alteradas (Vela Corona et al., 2021; Zhu, 2015). Los tratamientos US suelen ir asociados con fenómenos de annealing debido al incremento de temperatura que deriva de la cavitación, siempre que la temperatura del tratamiento no esté controlada. Se conoce como anillamiento a un método que permite modificar físicamente harinas y almidones, cuando estos se encuentran en exceso de agua y son sometidos a una temperatura elevada (siempre por debajo de su temperatura de gelatinización) (Zavareze and Dias, 2011). En la bibliografía disponible se encuentran muchos estudios sobre modificaciones físicas realizados en almidones, tanto por US como por annealing; sin embargo los estudios realizados sobre harinas son más escasos, y se centran en la caracterización de las harinas modificadas. Estudios realizados sobre harinas de quinoa (Zhu and Li, 2019), arroz (Vela Corona et al., 2021) y teff (Pérez Yágüez, 2020) han demostrado el efecto que los

tratamientos de US tienen sobre harinas sin gluten. En los tratamientos realizados en harina de arroz a diferentes tiempos y concentraciones se pudo observar que los tratamientos generaron cambios significativos en el tamaño de partícula, propiedades funcionales, propiedades térmicas, propiedades de empastado y reología de geles hechos con harinas ultrasonificadas (Vela Corona et al., 2021).

Como continuación en esta línea de investigación, y en respuesta a la búsqueda de nuevas tecnologías que permitan la mejora de productos alimenticios sin gluten, se planteó como objetivo del presente trabajo de investigación la utilización de harina de arroz modificada mediante US bajo diferentes tiempos de tratamiento en la elaboración de panes, y determinar el impacto que dicha harina modificada tiene sobre la reología de las masas formadas y la calidad de los panes obtenidos.

3. Objetivos

El objetivo del presente trabajo fue estudiar los efectos que la incorporación de harina tratada con US a diferentes tiempos (2, 5, 10 y 20 minutos) tenía sobre el comportamiento reológico de las masas y las propiedades físicas de los panes sin gluten elaborados con harina de arroz. La harina de arroz tratada se añadió a la fórmula en sustitución de un 30% de la harina de arroz nativa. Se realizaron ensayos de reología fundamental de las masas y para evaluar la calidad de los panes se realizó la determinación de su volumen específico, pérdida de peso, color de la miga y la corteza, y propiedades de textura de la miga.

4. Materiales y métodos

4.1. Materiales

La harina de arroz (*Oryza sativa* var. *indica*) utilizada para la elaboración de las masas y los panes fue facilitada por la empresa Herba Ricemills SL (Algemesí, Valencia, España). Tuvo la siguiente composición: 13,17% de humedad, 6,89% de proteínas, 2,5% de fibra y 0,69% de grasa. Se emplearon otros ingredientes obtenidos en el mercado local: sal, azúcar (Azucarera Ebro), aceite de girasol (Coosur Premium) y agua procedente de la red local. También se utilizó hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) K4M suministrado por Dow Chemical (Midland, EEUU) y levadura marca European (Estambul, Turquía) suministrada por la

empresa Distribuciones Palenzuela (Palencia, España). El agua destilada utilizada para el tratamiento de US se obtuvo con el equipo Milli RO de Millipore (Madrid, España).

4.2. Métodos

Tratamiento por US

El tratamiento de las harinas se llevó a cabo empleando el equipo de ultrasonidos Hielscher UP400St (Hielscher Ultrasonics, Alemania) equipado con una sonda de titanio S24d22D de 22 mm de diámetro. El tratamiento se aplicó a una frecuencia constante de 24 kHz con un pulso del 80% (80% encendido y 20% apagado por cada segundo de tratamiento), durante 2, 5, 10 ó 20 minutos dependiendo de la muestra, a una temperatura constante de 20 °C sobre una dispersión acuosa de 400 g con una concentración de harina del 25% (m/m) (100 gramos de harina de arroz en peso seco y 300 gramos de agua destilada). Para el mantenimiento de la temperatura, la dispersión se mantuvo en constante agitación dentro de un vaso encamisado por donde circulaba agua procedente de un baño termostático marca LAUDA, modelo RA12 (Lauda-Königshofen, Alemania). La temperatura de la dispersión durante el tratamiento se registró con un termómetro testo 735-2 (Barcelona, España).

Formulación y elaboración de los panes y masas

La fórmula empleada para la elaboración de los panes consistió en una base de harina de arroz (100% de harina de arroz nativa para el control y mezcla de 70% nativa y 30% tratada en las formulaciones con harina tratada con US), y los siguientes ingredientes expresados como porcentaje en base a 100% de harina: aceite de girasol (6%), azúcar (5%), levadura (3%), HPMC (2%), sal (1,8%) y agua (80%). La Tabla 1 muestra las condiciones de tratamiento en las panificaciones estudiadas, así como su identificación. Para la elaboración de las masas utilizadas en los ensayos reológicos se utilizó la misma fórmula bajo tres niveles diferentes de hidratación, 80%, 85% y 90%, y no se utilizó levadura.

Para la preparación de los panes y las masas, los ingredientes sólidos (harina, azúcar, sal, HPMC) fueron pesados con una balanza Satorius TEG 101, y fueron mezclados durante 10 minutos en un bote mezclador para asegurar una correcta homogeneización. Una vez mezclados fueron traspasados al bol de mezcla de la amasadora Kitchen-aid Profesional

KPM5 (St. Joseph, Michigan, USA), y se mezclaron a velocidad 2 durante 2 min, añadiendo el agua junto con la levadura previamente hidratada (la levadura fue empleada únicamente para la elaboración de los panes, pero no para los ensayos reológicos de las masas); seguido de 10 min adicionales de mezcla a velocidad 2. La temperatura del agua empleada se determinó siguiendo la fórmula: $T^{\circ}\text{agua} = 56 - T^{\circ}\text{harina} - T^{\circ}\text{obrador}$. El agua procedente del medio de dispersión de la harina donde se había aplicado el tratamiento de US se añadió también a la mezcla en esta etapa. Esta cantidad de agua aportada se tuvo en cuenta en el cálculo de la cantidad de agua a añadir para conseguir la hidratación deseada en la masa. En la Tabla 1 se muestran las condiciones del estudio de panificación, que se realizó con masa al 80% de hidratación.

Tabla 1. Condiciones de tratamiento utilizados en el estudio de panificación.

	Tiempo de tratamiento	Sustitución (%)
Pan Control	0	--
Pan US-2	2	30
Pan US-5	5	30
Pan US-10	10	30
Pan US-20	20	30

Después de esto, se homogeneizó la mezcla manualmente, especialmente insistiendo en despegar la masa de las paredes del bol. A continuación, se continuó mezclando durante 4 min a velocidad 4, despegando la masa de las paredes durante el proceso para asegurar una correcta homogenización de los ingredientes. Seguidamente se añadió el aceite de girasol en la mezcla y se continuó batiendo otros 4 min a la misma velocidad. Para hacer los panes se utilizaron moldes de aluminio de 125x75x40mm que se llenaron con 160g de masa y se introdujeron en la fermentadora Sveba Dahlen (Fristad, Sweden), programada a una temperatura de 28°C y 80% de humedad relativa, durante 50 minutos. A continuación, los panes se introdujeron en el horno eléctrico giratorio marca Sveba Dahlen (Fristad, Sweden), a una temperatura de 170°C durante 20 min, con adición de vapor de agua durante los 12 primeros segundos. Al finalizar el horneado se dejaron enfriar durante 60 min, a temperatura ambiente, antes de proceder al desmoldado y a realizar las mediciones del pan tierno (día 0). De cada formulación se realizaron mediciones sobre dos panes, y un tercer pan se almacenó a 4°C para evaluar la evolución de su textura transcurridos 7 días de su elaboración.

Caracterización de la reología de las masas

4.2.1.1. Ensayos frecuencia y deformación

Las propiedades reológicas se estudiaron sobre masas de pan obtenidas con la receta estándar de panificación descrita en el epígrafe anterior aunque en este caso se aplicaron 3 niveles de hidratación diferentes (80, 85 y 90%) al objeto de poder determinar la hidratación más adecuada. Las masas se elaboraron tanto con harina de arroz 100% nativa como con las mezclas de ésta con harina tratada en la relación en peso 70/30. Las harinas tratadas fueron las mismas ya descritas en apartados anteriores y utilizadas en la elaboración del pan. La determinación de las propiedades reológicas se llevó a cabo utilizando un reómetro Kinexus Pro+, modelo KNX 2210 (Malvern Instruments Ltd, Malvern, Reino Unido), con una geometría de placas paralelas de 40 mm con superficie serrada y de acero inoxidable, con una separación entre placas de 1 mm. Se realizaron ensayos de barrido de esfuerzos, barrido de frecuencias y ensayos de deformación y recuperación progresivas (o *creep-recovery*). Cada muestra se analizó por triplicado.

El barrido de deformación se realizó en un rango entre el 0,001 y 200% a una frecuencia constante de 1 Hz, precedido de un tiempo de reposo de 300 s para permitir la relajación de las masas, a una temperatura constante de 25°C controlada con el módulo Peltier KNX 2002 C25P (Malvern Instruments Ltd, Malvern, Reino Unido). Estos ensayos se realizan con el objetivo de determinar el esfuerzo máximo (T_{max}) que las masas son capaces de soportar antes de perder su estructura, para así determinar la zona viscoelástica lineal (LVR), en la que las masas pueden recuperarse después de aplicar una deformación.

El barrido de frecuencias fue realizado en el intervalo de 10 hasta 1 Hz a un esfuerzo constante de 10 Pa. Los valores obtenidos para los módulos viscoso (G'') y elástico (G'), así como la tangente del ángulo de desfase ($\tan\delta$) en el barrido de frecuencias, se ajustaron a una ecuación potencial (Ronda et al., 2017), como se muestra en las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned}G'(\omega) &= G'_1 \cdot \omega^a \\G''(\omega) &= G''_1 \cdot \omega^b \\ \tan(\delta) &= \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)} = \left(\frac{G''}{G'}\right)_1 \cdot \omega^{(b-a)} = \tan(\delta)_1 \cdot \omega^c\end{aligned}$$

Los coeficientes G'_1 , G''_1 y $(\tan\delta)_1$ representan los módulos de elasticidad, viscosidad y la tangente de pérdida respectivamente a la frecuencia de 1 Hz. Los exponentes a, b y c son

constantes experimentales que cuantifican el grado de dependencia de estos módulos y de la tangente de pérdida con la variación de frecuencia.

4.2.1.2. Ensayos de deformación progresiva (*creep*) y de recuperación progresiva (*recovery*)

Para los ensayos de deformación progresiva se aplicó a las masas un esfuerzo constante de 50 Pa (valor fuera de la LVR) durante un periodo de 60 segundos. Después se retiró la fuerza para estudiar la recuperación progresiva de la masa. Los datos obtenidos en estos ensayos se describen en términos de capacitancia elástica o *compliance*, J (1/Pa), que se define como la deformación lograda dividida entre esfuerzo aplicado (mantenido constante durante el ensayo de *creep*).

$$J = \gamma/\tau_0$$

Donde γ es la deformación lograda y τ_0 es el esfuerzo constante aplicado (50 Pa).

Los datos experimentales se ajustaron al Modelo de Burgers de 4 parámetros en términos de capacitancia mecánica (Lazaridou et al., 2007; Van Bockstaele et al., 2011).

Para la zona de deformación progresiva o *creep* la ecuación empleada fue:

$$J_c(t) = J_0 + J_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_1}\right) \right) + \left(\frac{t}{\mu_0} \right)$$

J_c es la capacitancia elástica en el ensayo de deformación progresiva, J_0 es la capacitancia instantánea, J_1 es la capacitancia elástica retardada, λ_1 es el tiempo de retardo y μ_0 es la viscosidad en estado estacionario. En la fase de recuperación (*recovery*) se utilizó una ecuación similar. En este caso el modelo de Burgers viene dado por la siguiente expresión:

$$J_r(t) = J_{r0} + J_{r1} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_1}\right) \right)$$

Donde J_r es la capacitancia en el ensayo de recuperación, J_{r0} es la capacitancia correspondiente a la recuperación elástica instantánea, J_{r1} corresponde a la recuperación elástica retardada y λ_1 es el tiempo de retardo. El porcentaje de recuperación de las masas se calculó como el cociente entre el valor de J estabilizado al final de la fase de recuperación, y el valor máximo de J en la fase de deformación progresiva.

Caracterización de los panes

4.2.1.3.Fotografías

Se tomaron fotografías del pan para tener constancia de su aspecto visual. Se tomaron fotos laterales, de la cara superior y de dos rebanadas. Para ello se utilizó una cámara PowerShot SX410 IS (Canon, Japón). Las fotografías se realizaron con iluminación artificial de luz blanca sobre fondo negro.

4.2.1.4.Peso

El peso de los panes se determinó utilizando una balanza COBOS (Barcelona, España). La pérdida de peso de cada pan se obtuvo calculando la diferencia de peso de los panes elaborados con respecto al peso de la masa que se introdujo en los moldes antes de someterlos al proceso de fermentación y horneado (160g).

4.2.1.5.Volumen

El volumen de los panes se determinó utilizando el medidor de volumen Bread Volume Tester JMTY (Hangzhou, China) que emplea el método de desplazamiento de semillas 10-05.01 de la AACC. Se determinó dos veces el volumen de dos panes por cada elaboración realizada, en el día 0. El equipo se calibró con un patrón de 500 mL diariamente. El volumen específico se determinó mediante la división del volumen de cada pieza de pan (en mililitros) entre su masa (en gramos), previamente determinada.

4.2.1.6.Color

Se analizó el color, tanto de la corteza como de la miga, de los diferentes panes con un colorímetro PCE-CSM 2 de PCE Instruments (PCE Ibérica SL, Tobarra, Albacete) y con el software 3nh Color Quality Controller System CQCS3. El color de la corteza fue medido en cinco puntos diferentes de dos panes de cada formulación. El color de la miga se midió en 2 rebanadas de cada pan por ambos lados, midiendo dos panes de cada elaboración. Las mediciones se obtuvieron en coordenadas del espacio de color CIE L^* a^* b^* con el observador patrón 2° y el iluminante D65, donde L^* mide la luminosidad y a^* y b^* la cromaticidad. A partir de estos valores se obtuvieron el tono (h^*) y la saturación (C^*).

4.2.1.7. Textura

La textura de la miga se evaluó con un texturómetro universal TA-XT2 (Stable Micro Systems, Godalming, UK) provisto con el software "Texture Expert". Se utilizó una sonda cilíndrica de aluminio de 20mm de diámetro (SMS P20), con un área de contacto de 316,16 mm². El ensayo llevado a cabo fue de doble compresión "Texture Profile Analysis" (TPA) sobre rebanadas de pan de 20mm de espesor, para penetrar un 50% de profundidad a una velocidad de 1 mm/s, con un tiempo de espera de 30 s entre la primera y la segunda compresión. Los parámetros que se determinaron fueron dureza, elasticidad, cohesividad, masticabilidad y resiliencia a partir del gráfico TPA. Este ensayo se hizo por duplicado.

4.2.1.8. Evolución de la dureza con el tiempo

Una vez enfriados y pesados los panes, los destinados al estudio del envejecimiento se introdujeron en bolsas de polietileno de 22x35 cm, que se cerraron herméticamente y se conservaron en el frigorífico a una temperatura de 4°C. Después de una semana, fueron sacados del frigorífico y dejados durante una hora a temperatura ambiente antes de realizar la medición de textura en dos rebanadas de cada elaboración, siguiendo el proceso indicado en el apartado 4.2.1.7.

Análisis estadístico de los resultados

Los datos se analizaron utilizando el programa estadístico Statgraphics Centurion XVII (StatPoint Technologies Inc, Warrenton, USA). Se realizó un análisis de varianza ANOVA y la prueba Fisher LSD para describir las diferencias significativas entre las medias a un nivel de significancia de $p < 0,05$.

5. Resultados y discusión

5.1. Caracterización de las masas: Reología

Con el objeto de estudiar el efecto que los distintos tiempos de tratamiento y los diferentes niveles de hidratación tienen en la masa de pan, se procedió a la realización de ensayos reológicos fundamentales. Estudios previos han demostrado una buena correlación entre dichas propiedades reológicas y los parámetros de calidad del pan (Demirkesen et al., 2010; Dobraszczyk and Morgenstern, 2003; Mancebo et al., 2015; Martínez and Gómez, 2017). Se estudió la masa control preparada con un 100% de harina de arroz nativa, y masas

elaboradas con un 70% de harina de arroz nativa y un 30% de harina de arroz tratada con US (durante 2, 5, 10 o 20 minutos), al 80, 85 y 90 % de hidratación. La Tabla 2 resume los parámetros reológicos obtenidos con las masas de pan.

5.1.1. Barrido de frecuencias

Los coeficientes G'_1 y G''_1 representan, respectivamente, el módulo elástico y el módulo viscoso a una frecuencia de 1 Hz. Los exponentes a y b cuantifican la variación de los módulos dinámicos frente a la frecuencia.

Tabla 2: Resultados de los barridos de frecuencias y deformación de las masas estudiadas.

Hidratación (%)	Tratamiento US (min)	G'_1 (Pa)	a	G''_1 (Pa)	b	$\tan(\delta)_1$	c	τ_{max} (Pa)	Cross over (Pa)
80	0	6831a	0.249ab	3036b	0.248bc	0.44a	-0.001ab	18a	161a
	2	7937b	0.236ab	3499c	0.228a	0.43a	-0.015a	26b	284c
	5	8378b	0.262b	3104b	0.256c	0.43a	-0.005ab	21ab	178ab
	10	8124b	0.228a	3625c	0.227a	0.40a	0.001b	25ab	262bc
	20	6325a	0.227a	2625a	0.232ab	0.42a	0.005b	20ab	218abc
	Error estándar	411	0,009	123	0,006	0,02	0,005	3	33
Análisis de varianza y significancia (p-valor)		**	*	***	**	ns	ns	ns	*
85	0	3601a	0.273a	1817a	0.280c	0.50a	0.006ab	9a	90a
	2	4663bc	0.263a	2130bc	0.278c	0.46a	0.015b	13ab	140ab
	5	5033c	0.254a	2342c	0.255ab	0.47a	0.001ab	15b	170b
	10	4687bc	0.249a	2131bc	0.243a	0.46a	-0.006a	15b	172b
	20	4210ab	0.259a	2017ab	0.265bc	0.48a	0.006ab	10a	112ab
	Error estándar	235	0,009	93	0,007	0,02	0,006	1	23
Análisis de varianza y significancia (p-valor)		**	ns	**	**	ns	ns	*	ns
90	0	2273a	0.27a	1171a	0.28a	0.52a	0.008c	7a	70a
	2	3186b	0.27a	1580bc	0.27a	0.49a	0.003b	9ab	96a
	5	3479b	0.26a	1659c	0.27a	0.48a	0.007c	10b	119a
	10	3091b	0.27a	1498bc	0.26a	0.49a	-0.002a	11b	132a
	20	2893b	0.26a	1387b	0.27a	0.49a	0.015d	9ab	94a
	Error estándar	223	0,01	78	0,01	0,02	0,002	1	26
Análisis de varianza y significancia (p-valor)		**	ns	**	ns	ns	***	ns	ns

G'_1 , G''_1 y $\tan(\delta)_1$ son los coeficientes obtenidos del ajuste al modelo de la ley de la potencia y representan el modelos elástico, viscoso y la tangente de pérdida, respectivamente, a una frecuencia de 1Hz. Los exponentes a, b y c cuantifican la dependencia de los módulos y la tangente de pérdida a la frecuencia de oscilación. τ_{max} representa la deformación máxima soportada por la masa antes de romperse, y el cross over representa el punto de cruce del módulo elástico y viscoso ($G'=G''$).

Las diferentes letras indican diferencias significativas (p-valor<0.05) para la variable estudiada en cada tipo de harina. Análisis de varianza y significancia: *** p<0.001. ** p<0.01. * p<0.05. ns: no significativo.

Los resultados demostraron que el tratamiento de la harina mediante US cambió significativamente las propiedades reológicas de las masas, con un efecto que fue dependiente del tiempo de tratamiento. En general, con independencia de la hidratación de las masas, el módulo elástico (G'_1) aumentó con el tiempo de tratamiento, alcanzando un máximo a los 5 min. La figura muestra una representación de los módulos elásticos (G'_1) a una frecuencia de 1 Hz para las diferentes hidrataciones. En las masas elaboradas con harina tratada durante tiempos más largos el módulo elástico comenzó a disminuir, de forma que los valores más bajos se obtuvieron en las masas elaboradas con harina sonicada durante 20 min, si bien su valor nunca llegó a ser significativamente inferior al de la masa control (ver Figura 1). Los valores máximos de G'_1 determinados para las masas elaboradas con harinas tratadas durante 5 min se vieron favorecidos por un mayor nivel de hidratación de la masa, ya que representaron un incremento del 23%, 40% y 53% respecto a la masa control, para las hidrataciones del 80, 85 y 90%, respectivamente. En los tres niveles de hidratación estudiados no se encontraron diferencias significativas entre los módulos elásticos de las masas de pan elaboradas con harinas modificadas mediante los tres tratamientos centrales (2, 5 y 10 min). Dichos resultados indican que la sustitución del 30% de la harina nativa por harina tratada por US durante tiempos tan cortos como 2-5 min, aumenta de manera importante la consistencia de las masas. Sin embargo, la aplicación de tratamientos más largos no produce aumentos adicionales sino que el efecto se ve perjudicado (con menores consistencias) respecto al de tratamientos más cortos.

Los barridos de frecuencias mostraron que todos los valores determinados para el módulo elástico (G'_1) fueron mayores a los determinados para el módulo viscoso (G''_1), en todos los casos (todas las hidrataciones y todos los tiempos de tratamiento). Esto sugiere un comportamiento elástico característico de las masas sin gluten (Hager et al., 2011; Lazaridou et al., 2007; Ronda et al., 2017). El valor G'_1 se relaciona habitualmente con la consistencia de la masa, y se puede observar cómo es mayor a menor % de hidratación. En relación al módulo viscoso (G''_1) se puede observar un comportamiento similar al determinado para el módulo elástico. En el caso de la masa de hidratación 80%, se determinó que no hay diferencias significativas entre el control y la masa con harina tratada durante 5', siendo el único valor que se sale de la tendencia de incremento de los módulos determinado para dicho tiempo. El efecto del nivel de hidratación en la consistencia de las masas fue evidente, obteniendo valores mayores de G'_1 y G''_1 en las masas elaboradas con una hidratación menor, indicativo de masas con una mayor consistencia.

Todos los valores de la tangente ($\tan(\delta)_1 = G''_1 / G'_1$) obtenidos en las masas elaboradas con

harinas tratadas con US mostraron un ligero descenso respecto a su masa control, sin embargo, dichas diferencias no fueron significativas. Valores menores de $\tan(\delta)_1$ reflejan un comportamiento más elástico en la masa. Todos los valores determinados fueron menores a 1, como consecuencia de que el módulo elástico siempre fue mayor que el viscoso. Este tipo de resultados se han encontrado, de manera coherente con los resultados obtenidos, en estudios sobre masas de trigo (Angioloni and Collar, 2011; Dobraszczyk and Morgenstern, 2003; Edwards et al., 2003) y arroz (Gujral et al., 2003; Lazaridou et al., 2007).

El grado de dependencia del módulo elástico con la variación de la frecuencia (exponente a), no mostró variaciones significativas en ninguna de las hidrataciones, lo que indica que la dependencia de los módulos elásticos de las masas respecto a la frecuencia no se vio alterada por la incorporación de harina tratada con US. El grado de dependencia del módulo viscoso con la variación de la frecuencia (exponente b) mostró un ligero descenso en las harinas con harina tratada, de las cuales fueron significativamente diferentes las masas elaboradas con harina tratada durante 2 min y 10 min a una hidratación del 80%, al igual que 5 min y 10 min para la hidratación del 85%. No presentó variaciones significativas en el caso de la hidratación 90%.

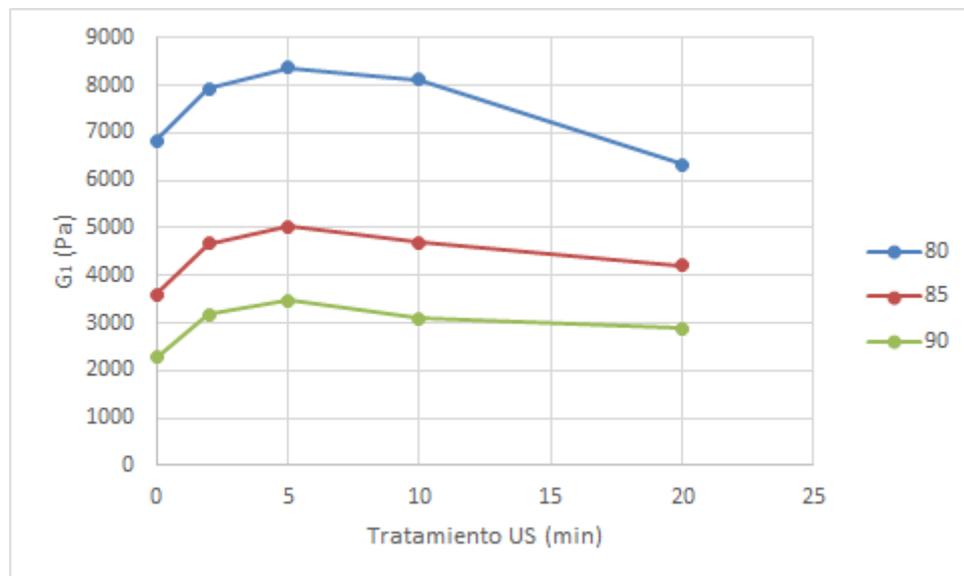


Figura 1. Representación de los módulos elásticos (G'_1) a una frecuencia de 1 Hz para las masas estudiadas.

En el caso del grado de dependencia de la tangente de pérdida con la variación de la frecuencia (exponente c) no se determinaron diferencias significativas entre las masas con una hidratación del 80 y 85%, mientras que en 90% únicamente 5 min no fue significativamente diferente al control.

5.1.2. Ensayos Creep/Recovery: Ensayos de deformación y relajación progresiva

Las masas estudiadas en los ensayos de deformación/relajación progresiva (creep/recovery) presentan un comportamiento típico viscoelástico. Dicho comportamiento combina el comportamiento de un fluido viscoso con el de un sólido elástico. La Tabla 3 presenta los parámetros de ajuste de las curvas de creep/recovery al modelo de Burgers. El comportamiento de estas masas es similar al obtenido para masas de harina de trigo (Rouillé et al., 2005), de harina de arroz (Sivaramakrishnan et al., 2004) y otras masas sin gluten (Lazaridou et al., 2007). La representación de la capacitancia elástica (J) frente al tiempo (t), informa de la deformación que experimenta la masa y cómo se recupera una vez que cesa la aplicación del esfuerzo.

Tabla 3. Parámetros determinados en ensayos de deformación y recuperación progresiva.

Hidratación (%)	Tratamiento US (min)	J_{0c} (10^{-4} Pa $^{-1}$)	J_{1c} (10^{-3} Pa $^{-1}$)	λ_c (s)	μ_c (10^2 Pa·s)	J_{0r} (10^{-4} Pa $^{-1}$)	J_{1r} (10^{-3} Pa $^{-1}$)	λ_r (s)	Recuperación (%)
80	0	2.5b	1.7b	10.2b	25.2a	5.7c	1.15bc	22.9b	37.2a
	2	2.8b	1.8b	9.7a	26.3a	5.5bc	1.27c	22.2ab	43.5c
	5	2.1a	1.0a	10.6c	44.3c	3.8a	0.71a	24.1c	42.5c
	10	2.0a	1.1a	10.2b	45.1c	3.4a	0.63a	24.2c	42.1c
	20	4.3c	1.9b	16.9d	37.3b	4.9b	1.00b	21.6a	39.4b
	Error estándar	0,1	0,1	0,2	1,5	0,3	0,07	0,3	0,9
Análisis de varianza y significancia (p-valor)		***	***	***	***	***	***	***	***
85	0	6.4c	5.1c	7.5a	4.5a	9.9c	2.45b	22.1a	22.7a
	2	3.6a	2.8ab	9.5bc	13.3c	7.1a	1.62a	25d	31.8b
	5	3.4a	2.7ab	8.5b	11.6c	7.1a	1.70a	23.7c	30.1b
	10	3.6a	2.4a	9.7c	18.1d	7.8b	1.72a	22.6ab	41.8c
	20	4.4b	3.2b	9.6c	8.3b	8.2b	1.66a	23.1bc	23.4a
	Error estándar	0,2	0,2	0,4	0,8	0,2	0,05	0,3	1,6
Análisis de varianza y significancia (p-valor)		***	***	**	***	***	***	***	***
90	0	7.3c	5.8c	7.7b	3.2a	13.2d	3.15d	20.6b	18.3b
	2	5.5a	4.1a	8.6c	5.9b	10.7b	2.42b	23.4d	24.3c
	5	4.9a	3.6a	9.3c	7.1c	9.7a	2.41b	22.3c	28.6d
	10	9.5d	4.4ab	13d	7.7c	11.2bc	3.01c	21.7c	33.7e
	20	6.7b	5.0b	5.9a	2.7a	11.6c	2.20a	19.2a	12.8a
	Error estándar	0,00002	0,3	0,3	0,4	0,2	0,04	0,3	1,3
Análisis de varianza y significancia (p-valor)		***	***	***	***	***	***	***	***

J_0 : capacitancia instantánea; J_1 : capacitancia elástica retardada; λ : tiempo de retardo; μ : viscosidad estacionaria. Los subíndices "c" hacen referencia a valores determinados para ensayos de deformación progresiva ("creep") y los subíndices "r" corresponden a valores determinados para ensayos de recuperación progresiva ("recovery"). Las diferentes letras indican diferencias significativas (p -valor <0.05) para la variable estudiada en cada tipo de harina. Análisis de varianza y significancia: *** $p<0.001$. ** $p<0.01$. * $p<0.05$. ns: no significativo.

Existe una fuerte correlación entre los parámetros de capacitancia elástica en la fase de deformación y los equivalentes en la fase de relajación ya que los ensayos se llevaron a

cabo en la LVR.

En el ensayo de deformación progresiva, se puede observar que la capacitancia elástica instantánea (J_0) de las masas con harina tratada con US mostraron variaciones significativas ($p < 0,05$) respecto a su masa control, con la única excepción del tratamiento de 2 min en la hidratación más baja (80%). En general se observó una tendencia a la disminución de J_0 (y por lo tanto de la deformación por unidad de esfuerzo) en las harinas tratadas, obteniéndose los valores más bajos con las harinas tratadas durante 5 min. Dicha disminución de la capacitancia elástica instantánea indica que las masas se deforman menos ante la aplicación de un esfuerzo, en concordancia con el aumento del módulo elástico determinado para los tiempos cortos, discutido previamente. Las masas elaboradas con harinas sonicadas durante 20 min, en general e independientemente de la hidratación, presentaron valores de J_0 más altos que las elaboradas con harinas sometidas a tiempos de tratamiento más cortos.

Los resultados obtenidos para la capacitancia elástica retardada (J_1) muestran una tendencia similar a la discutida para J_0 . Se puede observar que el efecto que tiene la incorporación de la harina tratada con US no depende únicamente del tiempo de tratamiento sino también de la hidratación de la masa, por ejemplo, un tiempo de tratamiento de 2 minutos no resultó en diferencias significativas para la masa hidratada al 80%, pero sí lo hizo en el caso de la hidratación al 85 y 90%. Dado que los tratamientos con US fueron realizados siempre a la misma concentración de harina en suspensión (25% p/p), la disponibilidad de agua a la que las partículas ultrasonicadas tienen acceso repercute en el comportamiento general de la masa.

El tiempo de retardo (λ_1) presentó variaciones significativas en todos los tratamientos estudiados. En el caso de las masas con una hidratación del 80% se observó una ligera tendencia a aumentar, la cual es evidente en las masas con una hidratación al 85%. Las masas al 90% siguieron esa tendencia, a excepción del tratamiento más largo, el cual presentó un valor incluso menor al mostrado por la masa control. El máximo aumento determinado para cada nivel de hidratación representó un incremento del 66% (80% - 20'), 29% (85% - 10') y 69% (90% - 10'). Tiempos de retraso mayores son indicativos de una respuesta elástica más lenta (Ronda et al., 2013).

La viscosidad en estado estacionario (μ_0) se vio aumentada en las masas elaboradas con

harinas tratadas con US, con la única excepción de la masa al 90% con harina ultrasonicada durante 20'. El mayor aumento fue encontrado para los tratamientos de 10', los cuales presentaron un incremento del 79%, 302% y 141% respecto al valor mostrado por la masa control hidratada al 80, 85 y 90%, respectivamente. Dichos valores también son coherentes con el aumento de los módulos elástico y viscoso de las masas elaboradas con harina tratada, ya descritos anteriormente. Estudios previos realizados en relación a la modificación de harinas con US han demostrado una importante reducción del tamaño de las partículas de harina con los tratamientos, lo cual conlleva a un incremento de la capacidad de absorción de agua y en el poder de hinchamiento (Fernández Oraá, 2020). Estas características pueden ser las responsables de modificar la capacidad que tienen las masas de soportar una deformación progresiva. Se puede concluir que en base a los resultados obtenidos que el efecto de la incorporación de harina tratada con US es la disminución de J_0 y J_1 , así como el aumento de λ_1 y μ_0 , y que el tiempo de tratamiento es determinante en el perfil que vaya a mostrar la masa obtenida.

Los ensayos de recuperación progresiva (recovery) muestran la recuperación de la masa una vez retirado el esfuerzo que produjo su deformación. Los resultados obtenidos mostraron la misma tendencia en cuanto a la variación de J_0 , J_1 y λ_1 respecto al tiempo de tratamiento aplicado a la harina, que la mostrada en los ensayos de deformación progresiva. Existe una fuerte correlación entre los parámetros de capacitancia elástica en la fase de deformación y los equivalentes en la fase de relajación. Los porcentajes de recuperación mostrados por las masas variaron significativamente en todas las formulaciones que utilizaron harina tratada con US. En las tres hidrataciones estudiadas se observó un aumento en la capacidad de recuperación de las masas elaboradas con harinas tratadas 2, 5 y 10 minutos, y un descenso marcado para el tratamiento de 20 minutos, siendo incluso menor que en la harina control para la hidratación del 90%. El mayor incremento fue determinado para los 5 minutos de tratamiento en el caso de las masas al 80% de hidratación (un 14% mayor que el resultado mostrado por el control), mientras que para los dos niveles superiores de hidratación fue determinado en el tratamiento de 10 minutos, siendo en ambos casos un 84% mayor al valor obtenido en el control. Los resultados obtenidos en general en el estudio reológico indican que la estructura de las masas se ve fortalecida al utilizar harinas tratadas con US hasta un máximo de 10 minutos. En los tratamientos de 20 minutos los valores disminuyen y llegan a ser más similares a las del control, lo cual nos indica que el tratamiento ha sido prolongado excesivamente, puesto que estamos perdiendo las características deseables, una mayor consistencia de la masa (Mollakhalili et al., 2015).

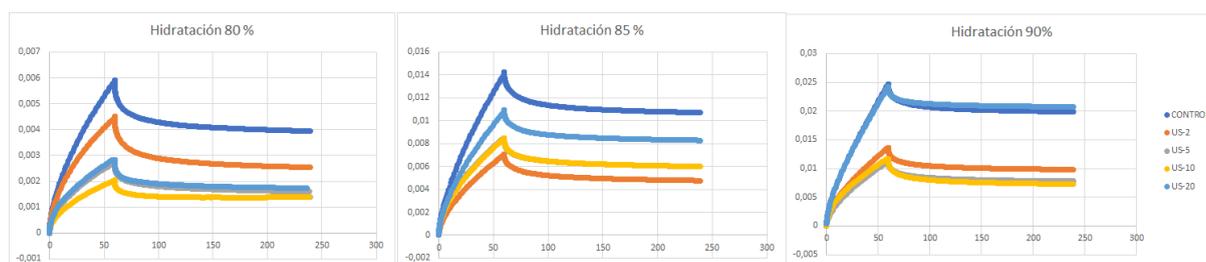


Figura 2. Representación de las curvas de creep-recovery en las tres hidrataciones distintas.

En la Figura 2 se puede observar claramente que los valores obtenidos para los ensayos de deformación y recuperación progresiva se vieron muy afectados por la adición de harina tratada y por el tiempo de su tratamiento. También se comprueba que dependieron de forma importante de la cantidad de agua utilizada en la formulación. Para la elaboración de panes se decidió trabajar con masas más rígidas y consistentes con el objetivo de que pudieran retener mejor el gas de fermentación y conducir a panes con un mejor desarrollo durante la fermentación y horneado y mayor volumen. Por lo tanto, se optó por trabajar con una hidratación del 80%.

5.2. Caracterización de los panes

Una vez analizadas las propiedades reológicas de las masas, se procedió a la realización de panes control (sin adición de harina sometida a tratamiento US) en las tres hidrataciones estudiadas (80%, 85%, 90%). Tal y como lo indican los valores obtenidos en los ensayos reológicos, las hidrataciones superiores produjeron unos panes inestables, de aspecto poco liso, crecimiento irregular, fácil desmigado y aparición de burbujas en el interior. Teniendo en cuenta que los tratamientos con US se realizan siempre en las mismas condiciones, esto demuestra que la disponibilidad de agua a las que las partículas de harina sonicadas tiene acceso, tiene consecuencias para el comportamiento de las masas y repercute en las propiedades físicas de los panes elaborados con ellas. Por esta razón se decidió continuar el estudio de panificación con una formulación de 80% de hidratación. La harina tratada se adicionó en sustitución del 30% de la cantidad total de harina, tal y como se ha descrito anteriormente. En la Figura 3 podemos ver un análisis fotográfico de los panes obtenidos, tanto de su vista superior y de perfil, como del corte frontal de una rebanada. La presencia de una regleta en todas las imágenes permite comparar los tamaños. Presentamos en las columnas los diferentes tratamientos de US. Como posteriormente se analizará en el apartado Color, un vistazo a la Figura 3 permite intuir el cambio de coloración de los panes,

haciendo el tono de US-20 de un amarillo menos apetecible y más apagado; esto se tratará más extensamente después. Asimismo la Figura 3 ofrece una visión en conjunto del aspecto de la forma de la rebanada, mostrando el tratamiento US-5 y US10 una superficie superior recta, sin las antiestéticas “orejas” relacionadas con una pérdida de volumen en el centro del pan durante la panificación.

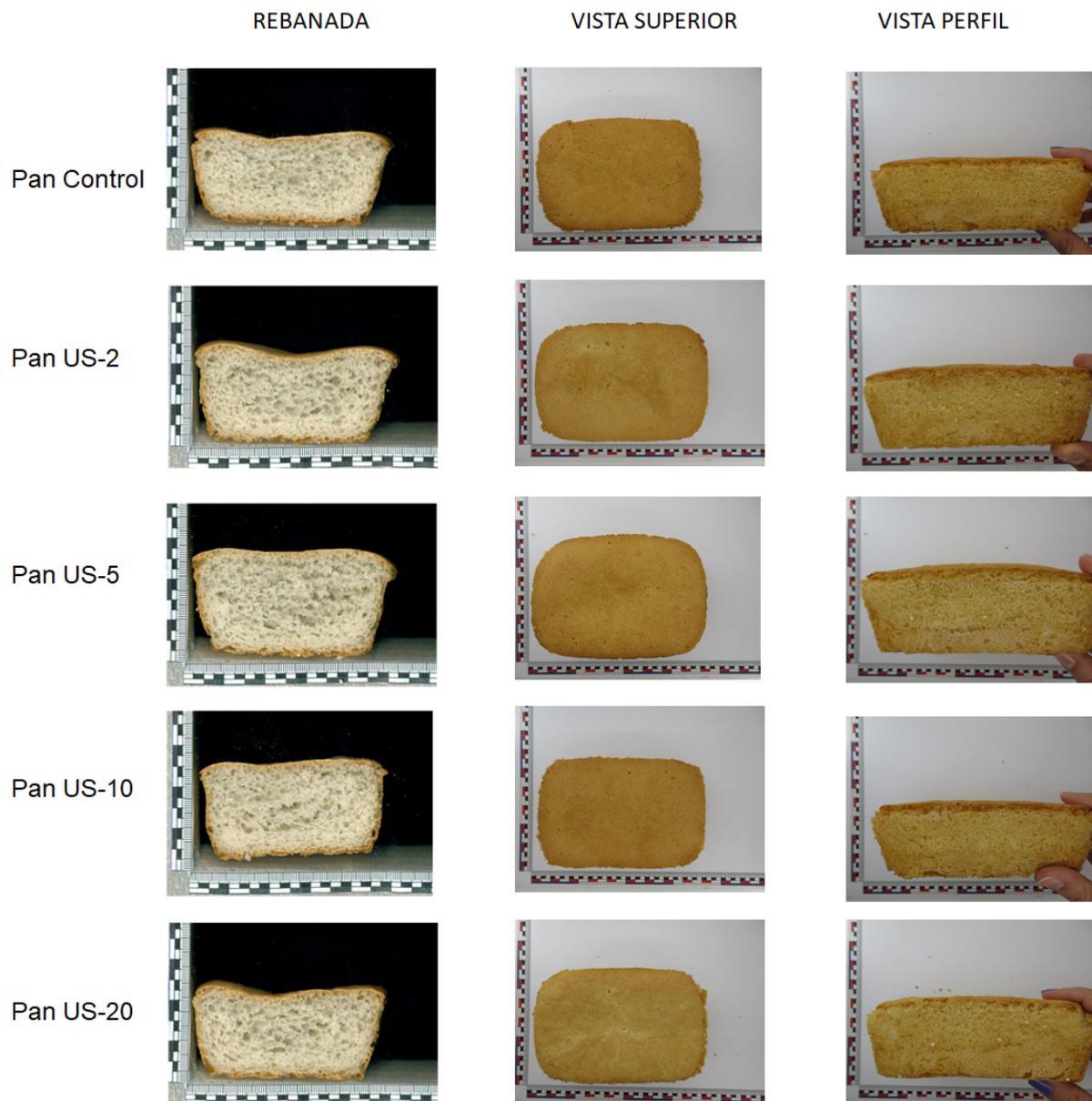


Figura 3. Fotografías de las panificaciones realizadas. Vistas de la rebanada, y apariencia de la cara superior y del lateral del pan.

Peso y Volumen

Tras finalizar las panificaciones se midió el volumen específico de los panes (valor del volumen relativo al peso). La Tabla 4 presenta la comparativa de datos de volumen específico (mg/mL) de cada uno de los panes tratados y la pérdida de peso porcentual de los mismos, relacionando el peso de la masa previa a la fermentación con el pan posteriormente extraído del horno. Únicamente se determinó un incremento significativo (p -valor <0.005) de volumen específico en el pan US-5; asimismo se obtuvo un ligero incremento de tamaño en US-2 y US-20 con respecto al control, pero no fue suficiente para ser considerado significativo. Esto se correlaciona con los datos obtenidos para la reología de masas, en las que el valor del tratamiento realizado durante 5 min fue, en todas las hidrataciones, el que presentó mayor incremento de G' . Estos resultados podrían deberse a que las partículas de menor tamaño obtenidas tras los tratamientos US (Boufi et al., 2018; Vela Corona et al., 2021) probablemente sirvan como un sustrato más fácilmente accesible para las levaduras, favoreciendo de esta manera el proceso de fermentación, ya que dicha reducción de tamaño de partícula suele ir asociada a un mayor contenido en almidón dañado (Lin et al., 2020; Mahasukhonthachat et al., 2010). Además, un menor tamaño de partícula se correlaciona con una mayor capacidad de absorción de agua, lo cual conduce a masas más consistentes. La mayor consistencia de las masas después de los tratamientos US también favoreció al mayor volumen observado, puesto que una mayor consistencia ayuda a retener el gas formado durante la fermentación y previene su colapso y pérdida de volumen durante la fermentación y horneado, dando lugar a un volumen mayor del pan (ver Figura 3) (Villanueva et al., 2019). La pérdida de peso de los panes es una forma de determinar el rendimiento de la elaboración, y se relaciona con la capacidad de los ingredientes utilizados de retener agua. Los resultados obtenidos (ver Tabla 4) mostraron que la pérdida de peso no se vio significativamente afectada por la incorporación de harina tratada con US, siendo el pan US-2 el único que mostró diferencias respecto al control, en concreto una pérdida de peso del 19.8%, 0.9% más pérdida que el control. Coherentemente con los resultados reológicos, el pan que mostró un incremento significativo de volumen fue US-5. Los parámetros de textura revelan que los panes con harina tratada presentan menor dureza, debido a su mayor volumen y menor densidad de miga, a la vez que conservan los valores de elasticidad. Se obtiene un pan con más volumen y esponjosidad, lo cual son cualidades apreciadas por el consumidor.

Tabla 4. Volumen específico y pérdida de peso porcentual producida tras la fermentación y el horneado de cada uno de los panes.

Muestra	Volumen Específico (mL/g)	Pérdida de peso (%)
Pan Control	3.0ab	18.9a
Pan US-2	3.16b	19.8b
Pan US-5	3.39c	19.0ab
Pan US-10	2.99a	18.4a
Pan US-20	3.07ab	18.6a
Error estándar	0,05	0,2
<i>Análisis de varianza y significancia (p-valor)</i>	**	*

Las diferentes letras indican diferencias significativas (p -valor <0.05) para la variable estudiada en cada tipo de harina. Análisis de varianza y significancia: *** $p<0.001$. ** $p<0.01$. * $p<0.05$. ns: no significativo.

Color

Se examinaron las propiedades de color, tanto de la corteza como de la miga, de los panes (ver Tabla 5). En la corteza se determinaron diferencias significativas de luminosidad (L^*) respecto al control únicamente para los panes US-2 y US-10, mientras que las coordenadas que componen la cromaticidad (a^* y b^*) fueron significativamente reducidas por la incorporación de harina tratada con US. En ambos parámetros se determinó una disminución para los tiempos límite evaluados (US-2 y US-20). Estudios previos indican que los ultrasonidos reducen a^* y b^* y aumentan la luminosidad cuando son aplicados en harinas (Pérez Yáguez, 2020; Zhang et al., 2005), lo que parece ser una tendencia consistente al utilizar dicha harina en el desarrollo de panes. El hecho de que las variaciones sean menos marcadas que las reportadas en harina podría explicarse por el hecho de que los panes únicamente contaron con un 30% de harina tratada, mientras que en las harinas el 100% de la muestra evaluada había pasado por un tratamiento US. El valor que analiza la cromaticidad, C^* , presentó la misma tendencia que b^* : el pan elaborado con harina US-2 presentó la máxima disminución del Chroma, seguido por los que contenían las harinas US-10 y US-20. En general, tras la adición de harina tratada con US, se ve una tendencia a disminuir el valor C^* y producir panes con una corteza ligeramente más apagada. La importancia de esto reside en que el aspecto visual del pan es un parámetro de aceptabilidad muy importante, el color de la corteza es una característica seleccionada por el consumidor para anticipar la crujencia y palatabilidad del pan. El tono (h) fue el parámetro que más cambió con la incorporación de harinas tratadas con US, mostrando un incremento significativo en todos los tratamientos, indicando colores más amarillentos y menos rojizos, alcanzando su máximo valor en el pan US-20.

Tabla 5. Parámetros de color obtenidos del análisis de corteza y miga de los panes.

Muestra	Corteza					Miga					
	L*	a*	b*	C*	h (grados)	L*	a*	b*	C*	h (grados)	
Pan Control	59.0a	15.9c	29.6c	33.9c	61.8a	62.2a	1.2b	7.4c	7.5c	81.0c	
Pan US-2	61.7b	13.8a	27.4a	30.8a	63.6c	64.6b	1.6c	6.2a	6.4a	74.7a	
Pan US-5	60.6ab	15.2b	29.4c	33.4c	63.0b	63.6ab	1.3b	6.4a	6.4a	77.9b	
Pan US-10	60.0ab	14.7b	28.7b	32.1b	62.8b	65.3b	1.1b	6.8b	7.0b	80.7c	
Pan US-20	61.3b	13.8a	28.5b	31.3ab	64.3d	63.9ab	0.7a	6.4a	6.4a	83.9d	
Error estándar		0,8	0,2	0,3	0,4	0,2	0,8	0,1	0,1	0,1	0,8
<i>Análisis de varianza y significancia (p-valor)</i>											
	<i>ns</i>	***	***	***	***	<i>ns</i>	***	***	***	***	***

Luminosidad (L*), cromaticidad (a*, b*), saturación (C*) y tono (h).

Las diferentes letras indican diferencias significativas (p -valor <0.05) para la variable estudiada en cada tipo de harina. Análisis de varianza y significancia: *** $p<0.001$. ** $p<0.01$. * $p<0.05$. ns: no significativo.

En el caso de la miga, la luminosidad, las coordenadas de cromaticidad (a*, b*) y la saturación mantuvieron la misma tendencia mostrada por la corteza al integrar harina tratada con US en la formulación. La saturación (C*) disminuyó al aplicar tratamientos US a las harinas, sin embargo, dicha disminución parece no depender del tiempo del tratamiento. Los resultados del tono de la miga, por su parte, mostraron una disminución para los tiempos de tratamiento de 2, 5 y 10 minutos, mientras que para 20 minutos presentó un aumento significativo. El mínimo valor obtenido se midió en el pan US-2, siendo un 8% menor que el del pan control.

Textura: ensayo TPA

La Tabla 6 muestra los datos obtenidos en el análisis de textura en rebanadas de los panes. Como se indicó en el apartado 4.2.1.7, las propiedades texturales de los panes se evaluaron mediante un ensayo TPA de doble compresión. La dureza de la miga (fuerza requerida para comprimir un alimento) disminuyó significativamente ($p<0.05$) en los panes elaborados con harinas tratadas durante tiempos cortos de US (2 y 5 min) respecto al pan control, mientras que en los panes elaborados con harinas de tratamientos más largos (10 y 20 min) esta disminución dejó de observarse. Este resultado se relaciona directamente con los cambios determinados en el volumen específico de los panes, ya que el volumen mayor determinado en los panes US-2 y US-5 indica un mayor volumen de aire retenido en la estructura y una menor densidad de la miga, lo que repercute en una pieza más blanda. La dureza mínima determinada (pan US-5) fue un 43% menor a la obtenida con el pan control.

La elasticidad (tasa a la que un material deformado es capaz de regresar a su condición inicial) de los panes se vio incrementada por tiempos largos de tratamiento US (10 y 20 minutos), mostrando valores significativamente mayores al del control. Los panes US-2 y US-5 no mostraron diferencias significativas respecto al control, sin embargo, el hecho de tener un volumen mayor y seguir manteniendo la misma elasticidad es una característica buscada en los panes sin gluten que cabe ser mencionada, puesto que en general los productos sin gluten pierden elasticidad en relación a sus homólogos de trigo (Houben et al., 2012; Wang et al., 2017).

La cohesividad se vio incrementada en todos los panes elaborados con harina tratada por US independientemente del tiempo de tratamiento, aunque únicamente fue significativo el incremento para tratamientos de 5 y 20 min.

La masticabilidad hace referencia a la energía necesaria para masticar un alimento, y fue determinada como el producto de la dureza, la cohesividad y la elasticidad. Los resultados mostraron que el pan US-20 fue el único que mostró un incremento significativo, llegando a ser un 53% mayor que el determinado para el pan Control.

La resiliencia hace referencia a la capacidad de recuperación instantánea que tiene la miga. Este parámetro se vio aumentado en todos los tratamientos con US, siendo 0.26 el mayor valor determinado (US-5 y US-20) frente a 0.20 determinado para el control.

Tabla 6. Datos de textura obtenidos del análisis de los panes con 30% sustitución de harina tratada con US a diferentes tiempos.

Muestra	Dureza (N)	Elasticidad	Cohesividad	Gomosidad
Pan Control	1.4b	0.87a	0.44a	0.61bc
Pan US-2	1.0a	0.88a	0.47ab	0.46ab
Pan US-5	0.8a	0.87a	0.49b	0.42a
Pan US-10	1.5b	0.92b	0.47ab	0.7cd
Pan US-20	1.8b	0.94b	0.49b	0.87d
Error estándar	0,1	0,01	0,01	0,06
<i>Análisis de varianza y significancia (p-valor)</i>				
	***	**	ns	***

Muestra	Masticabilidad (N)	Resiliencia	Dureza día 7 (N)
Pan Control	0.53ab	0.20a	5.4ab
Pan US-2	0.41a	0.23ab	5.0a
Pan US-5	0.36a	0.26b	5.0a
Pan US-10	0.64bc	0.23ab	8.0c
Pan US-20	0.81c	0.26b	6.9bc
Error estándar	0,06	0,01	0,5
<i>Análisis de varianza y significancia (p-valor)</i>			
	***	*	*

Las diferentes letras indican diferencias significativas (p -valor <0.05) para la variable estudiada en cada tipo de harina. Análisis de varianza y significancia: *** $p<0.001$. ** $p<0.01$. * $p<0.05$. ns: no significativo.

Evolución de la dureza con el tiempo de almacenamiento

De cada pan estudiado se guardó una pieza durante 7 días a una temperatura de 4°C para determinar cómo evoluciona su dureza durante el almacenamiento. La dureza de todos los panes aumentó con respecto a la determinada el día 0 (ver Tabla 6) debido al fenómeno de retrogradación del almidón y a la pérdida de agua de la miga por difusión hacia la corteza (Ronda and Roos, 2011). Los resultados mostraron que los panes US-2 y US-5 fueron más blandos que el control, siguiendo el mismo comportamiento que el observado en el pan fresco. Los tiempos superiores de tratamiento, por otra parte, mostraron un marcado incremento de la dureza, siendo un 48% (US-10) y 28% (US-20) mayor que el control. El hecho que estas dos elaboraciones no hayan mostrado diferencias significativas respecto al control el día 0 (en fresco) y hayan mostrado una dureza bastante mayor a éste el día 7 hace pensar que una mayor exposición a los ultrasonidos puede favorecer la retrogradación de la amilopectina. Por lo general la dureza de los panes sin gluten es superior a la de los panes con gluten debido a que su poca elasticidad limita la posibilidad de obtener migas esponjosas (Elgeti et al., 2014).

Conclusiones

Los estudios realizados bajo diferentes hidrataciones (80, 85 y 90%) y tiempos de tratamientos US (2, 5, 10 y 20 minutos) muestran resultados bastante homogéneos que permiten determinar una tendencia general. Las propiedades reológicas de las masas mostraron un incremento de la consistencia de las masas tras el empleo de harina tratada con US; estos datos son coherentes con los encontrados en la bibliografía, donde los análisis de harina de quinoa tratada por ultrasonidos muestran una modificación de sus propiedades funcionales (Zhu and Li, 2019). Se observó que la tendencia de los tratamientos a tiempos bajos de US-5 y US-10 es mejorar las propiedades reológicas de las masas (aumentar su consistencia) y posteriormente el aspecto y las propiedades físicas de los panes formulados con ellas. En las tres hidrataciones estudiadas el tratamiento US-5 mostró el máximo aumento del módulo elástico (G'_1) de las masas, representando un 23%, 40% y 53%, para las hidrataciones del 80, 85 y 90%, respectivamente. Los barridos de esfuerzos mostraron un incremento del esfuerzo máximo que las masas son capaces de soportar antes de la ruptura de su estructura en todos los tiempos de tratamientos US estudiados. Por lo tanto, permitieron obtener masas más estructuradas y con una estructura más estable. Se comprobó un descenso de la capacitancia elástica instantánea, retardada y máxima obtenidas en las masas elaboradas con harina modificada, al tiempo que un aumento de su viscosidad estacionaria y del tiempo de retardo, que confirman la contribución de las harinas tratadas por US a la creación de estructura, siendo el tratamiento de 5 min el que demostró nuevamente el mayor efecto. El tratamiento largo de 20 min fue el que ejerció menor efecto. También se observó un incremento en la capacidad de recuperación de la masa tras la aplicación de un esfuerzo que siguió la misma tendencia. Las tendencias generales fueron también constantes en las diferentes hidrataciones estudiadas. Esto indica que el aporte de harina ultrasonicada es capaz de modificar el componente elástico de la masa y que depende significativamente del tiempo al que las harinas han sido expuestas al tratamiento. Los resultados indicaron que tiempos menores a 10 minutos repercuten de manera positiva en la consistencia de la masa, mientras que tiempos más prolongados hace que sus características decaigan y se asemejen más al control. Las características de los panes siguieron una tendencia similar a la consistencia de las masas. En general, las masas más consistentes y estructuradas (mayores módulos elástico y viscoso) condujeron a los panes de mayor volumen y menor dureza llegando a obtener incrementos del 13% en el tamaño de los panes y una disminución del 42% en su dureza. El estudio del color de la corteza de los panes mostró que el uso de harina tratada dio lugar a panes con un aspecto más apagado, una cualidad negativa puesto que una

corteza dorada es mejor valorada por el consumidor. El estudio de vida útil hace pensar, aunque queda pendiente su confirmación, que el fenómeno de retrogradación se manifestó de manera menos pronunciada en los panes elaborados con harinas sometidas a tratamientos cortos, y por contra, aumentó significativamente en los tratamientos largos. Esto sugiere que dichos tratamientos más prolongados son capaces de alterar la estructura de la harina de manera distinta a los cortos, quizá dañando las cualidades físicas de los gránulos de almidón y consiguiendo el resultado opuesto al de interés.

En conclusión, los experimentos muestran una posibilidad de mejorar las propiedades físicas de panes sin gluten de harina de arroz mediante la incorporación de harinas modificadas mediante US. Se determinó que la mejora de las características de los panes no aumenta con el tiempo de tratamiento, sino que existen variaciones que sugieren que hay un valor óptimo a tiempos cortos de 5 y 10 min.

6. Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto PID2019-110809RB-I00 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y los Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (FEDER) y del proyecto financiado por la Junta de Castilla y León/FEDER (VA195P20).

Bibliografía

- Boufi, S., Bel Haaj, S., Magnin, A., Pignon, F., Impéror-Clerc, M., Mortha, G., 2018. Ultrasonic assisted production of starch nanoparticles: Structural characterization and mechanism of disintegration. *Ultrason. Sonochem.* 41, 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.09.033>
- Collado-Fernández, M., 2003. BREAD | Breadmaking Processes, in: Caballero, B. (Ed.), *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition)*. Academic Press, Oxford, pp. 627–634. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/00121-8>
- Cui, R., Zhu, F., 2020. Effect of ultrasound on structural and physicochemical properties of sweetpotato and wheat flours. *Ultrason. Sonochem.* 66, 105118. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105118>
- Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G., Sahin, S., 2010. Rheological properties of gluten-free bread formulations. *J. Food Eng.* 96, 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.08.004>
- Dobraszczyk, B.J., Morgenstern, M.P., 2003. Rheology and the breadmaking process. *J. Cereal Sci.* 38, 229–245. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(03\)00059-6](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00059-6)
- Elgeti, D., Nordlohne, S.D., Föste, M., Besl, M., Linden, M.H., Heinz, V., Jekle, M., Becker, T., 2014. Volume and texture improvement of gluten-free bread using quinoa white flour. *J. Cereal Sci.* 59, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.10.010>
- Ellis, R.P., Cochrane, M.P., Dale, M.F.B., Duffus, C.M., Lynn, A., Morrison, I.M., Prentice, R.D.M., Swanston, J.S., Tiller, S.A., 1998. Starch production and industrial use. *J. Sci. Food Agric.* 77, 289–311. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199807\)77:3<289::AID-JSFA38>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199807)77:3<289::AID-JSFA38>3.0.CO;2-D)
- Hager, A.-S., Ryan, L.A.M., Schwab, C., Gänzle, M.G., O'Doherty, J.V., Arendt, E.K., 2011. Influence of the soluble fibres inulin and oat β -glucan on quality of dough and bread. *Eur. Food Res. Technol.* 232, 405–413. <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1409-1>
- Hoover, R., 2010. The impact of heat-moisture treatment on molecular structures and properties of starches isolated from different botanical sources. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 50, 835–847. <https://doi.org/10.1080/10408390903001735>
- Houben, A., Höchstötter, A., Becker, T., 2012. Possibilities to increase the quality in gluten-free bread production: An overview. *Eur. Food Res. Technol.* 235, 195–208. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1720-0>
- Kardos, N., Luche, J.-L., 2001. Sonochemistry of carbohydrate compounds. *Carbohydr. Res.* 332, 115–131. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(01\)00081-7](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(01)00081-7)
- Laborde, J.-L., Bouyer, C., Caltagirone, J.-P., Gérard, A., 1998. Acoustic bubble cavitation at low frequencies. *Ultrasonics, Ultrasonics International* 1997 36, 589–594. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(97\)00105-4](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(97)00105-4)
- Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., Biliaderis, C.G., 2007. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *J. Food Eng.* 79, 1033–1047. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.032>
- Lebwohl, B., Rubio-Tapia, A., 2021. Epidemiology, Presentation, and Diagnosis of Celiac Disease. *Gastroenterology* 160, 63–75. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2020.06.098>
- Lin, S., Gao, J., Jin, X., Wang, Y., Dong, Z., Ying, J., Zhou, W., 2020. Whole-wheat flour particle size influences dough properties, bread structure and in vitro starch digestibility. *Food Funct.* 11, 3610–3620. <https://doi.org/10.1039/c9fo02587a>
- Mahasukhonthachat, K., Sopade, P.A., Gidley, M.J., 2010. Kinetics of starch digestion in sorghum as affected by particle size. *J. Food Eng.* 96, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.06.051>
- Mancebo, C.M., San Miguel, M.Á., Martínez, M.M., Gómez, M., 2015. Optimisation of

- rheological properties of gluten-free doughs with HPMC, psyllium and different levels of water. *J. Cereal Sci.* 61, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.10.005>
- Martínez, M.M., Gómez, M., 2017. Rheological and microstructural evolution of the most common gluten-free flours and starches during bread fermentation and baking. *J. Food Eng.* 197, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.11.008>
- Mollakhalili, N., Mohammadifar, mohammad amin, Feizollahi, E., 2015. Gluten-Free Bread Quality: A Review of the Improving Factors. *J. Food Qual. Hazards Control* 2015, 81–85.
- O'Neill, 2010. Gluten-Free Foods: Trends, Challenges, and Solutions. *Cereal Foods World*. <https://doi.org/10.1094/CFW-55-5-0220>
- Pérez Quirce, S., Caballero Calvo, P.A., Vela Corona, A.J., Villanueva Barrero, M., Ronda Balbás, M.F., 2018. Impact of yeast and fungi (1-3)(1-6)- β -glucan concentrates on viscoelastic behavior and bread making performance of gluten-free rice-based doughs. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.004>
- Pérez Yágüez, F., 2020. Estudio de la modificación física de harinas de teff mediante tratamientos hidrotérmicos y de ultrasonidos.
- Radeloff, M.A., Beck, R.H.F., 2016. “Clean label” – Starches and their functional diversity. *Sugar Ind.* 209–215. <https://doi.org/10.36961/si17334>
- Rodrigo, L., Peña, A.S. (Eds.), 2013. Enfermedad celíaca y sensibilidad al gluten no celíaca, 1st ed. OmniaScience. <https://doi.org/10.3926/oms.16>
- Ronda, F., Pérez-Quirce, S., Angioloni, A., Collar, C., 2013. Impact of viscous dietary fibres on the viscoelastic behaviour of gluten-free formulated rice doughs: A fundamental and empirical rheological approach. *Food Hydrocoll.* 32, 252–262. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.01.014>
- Ronda, F., Pérez-Quirce, S., Villanueva, M., 2017. Rheological Properties of Gluten-Free Bread Doughs: Relationship With Bread Quality, in: *Advances in Food Rheology and Its Applications*. Elsevier, pp. 297–334. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100431-9.00012-7>
- Ronda, F., Roos, Y.H., 2011. Staling of fresh and frozen gluten-free bread. *J. Cereal Sci.* 53, 340–346. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.02.004>
- Rouillé, J., Della Valle, G., Lefebvre, J., Sliwinski, E., vanVliet, T., 2005. Shear and extensional properties of bread doughs affected by their minor components. *J. Cereal Sci.* 42, 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2004.12.008>
- Sivaramakrishnan, H.P., Senge, B., Chattopadhyay, P.K., 2004. Rheological properties of rice dough for making rice bread. *J. Food Eng.* 62, 37–45. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00169-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00169-9)
- Tervo, J., Mettin, R., Lauterhorn, W., 2006. Bubble cluster dynamics in acoustic cavitation. undefined.
- Vela Corona, A.J., Villanueva Barrero, M., García Solaesa, Á., Ronda Balbás, M.F., 2021. Impact of high-intensity ultrasound waves on structural, functional, thermal and rheological properties of rice flour and its biopolymers structural features. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106480>
- Villanueva, M., Harasym, J., Muñoz, J.M., Ronda, F., 2019. Rice flour physically modified by microwave radiation improves viscoelastic behavior of doughs and its bread-making performance. *Food Hydrocoll.* 90, 472–481. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.12.048>
- Wang, K., Lu, F., Li, Z., Zhao, L., Han, C., 2017. Recent developments in gluten-free bread baking approaches: a review. *Food Sci. Technol.* 37, 1–9. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.01417>
- Witczak, M., Ziobro, R., Juszczak, L., Korus, J., 2016. Starch and starch derivatives in gluten-free systems – A review. *J. Cereal Sci., Functionality of Cereal Based*

- Non-gluten Dough Systems 67, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.07.007>
- Yang, Q.-Y., Lu, X.-X., Chen, Y.-Z., Luo, Z.-G., Xiao, Z.-G., 2019. Fine structure, crystalline and physicochemical properties of waxy corn starch treated by ultrasound irradiation. *Ultrason. Sonochem.* 51, 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.001>
- Zavareze, E. da R., Dias, A.R.G., 2011. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review. *Carbohydr. Polym.* 83, 317–328. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.064>
- Zhang, Z., Feng, H., Niu, Y., Eckhoff, S.R., 2005. Starch Recovery from Degermed Corn Flour and Hominy Feed Using Power Ultrasound. *Cereal Chem.* 82, 447–449. <https://doi.org/10.1094/CC-82-0447>
- 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, 621–627. <https://doi.org/10.1002/star.201200197>
- Zhu, F., 2015. Impact of ultrasound on structure, physicochemical properties, modifications, and applications of starch. *Trends Food Sci. Technol.* 43, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.12.008>
- Zhu, F., Li, H., 2019. Modification of quinoa flour functionality using ultrasound. *Ultrason. Sonochem.* 52, 305–310. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.11.027>