



---

**Universidad de Valladolid**  
**Campus de Palencia**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS  
AGRARIAS**

**Máster en Calidad, Desarrollo e Innovación de los Alimentos**

Comparación entre métodos de tratamiento  
hidrotérmico aplicados a la modificación  
física de harina de arroz

Alumno: Sandra Rodríguez Alonso

Tutor/a: Felicidad Ronda Balbás

Cotutor/a: Marina Villanueva Barrero

Cotutor/a: Caleb Samir Calix Rivera

Mayo de 2022

## ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

1	INTRODUCCIÓN.....	2
2	OBJETIVOS .....	6
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
3.1	Preparación y acondicionamiento de las muestras nativas .....	6
3.2	Pretratamiento.....	7
3.3	Tratamiento con estufa (OV).....	7
3.4	Tratamiento con autoclave (AC) .....	7
3.5	Tratamiento por radiación microondas (MW) .....	8
3.6	Post-tratamiento .....	8
3.7	Propiedades funcionales de las harinas.....	8
3.8	Propiedades de empastado de las harinas .....	10
3.9	Comportamiento reológico de los geles .....	11
3.10	Análisis de color .....	11
3.11	Análisis estadístico .....	12
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	12
4.1	PROPIEDADES FUNCIONALES.....	13
4.2	PROPIEDADES DE EMPASTADO.....	17
4.3	COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LOS GELES .....	20
4.4	ANÁLISIS DE COLOR.....	24
5	CONCLUSIONES.....	27
6	AGRADECIMIENTOS.....	28
7	BIBLIOGRAFÍA.....	28

## RESUMEN

Los tratamientos hidrotérmicos (HMT) son métodos de modificación física que combinan calor y humedad, de manera que se modifican las propiedades de las harinas, pero sin destruir la estructura granular. El objetivo principal del presente trabajo fue comparar el efecto de diferentes métodos de tratamiento hidrotérmico (en estufa, en autoclave y por medio de microondas) aplicados sobre harina de arroz de humedad inicial 25%, sometida a distintos tiempos de tratamiento (15, 30, 60 y 90 minutos). Se comprobó que los tratamientos afectaron significativamente a las propiedades funcionales, de color, de empastado, y el comportamiento reológico de los geles obtenidos a partir de las harinas resultantes. Siendo su impacto dependiente del tipo de tratamiento aplicado y del tiempo de exposición.

De forma general, los valores de WAC y OAC aumentaron con el tiempo de tratamiento en estufa y autoclave, al igual que ocurrió para WSI. En cambio, WAI y SP disminuyeron con el incremento del tiempo de exposición. Las muestras tratadas en autoclave durante 90 min, fueron las que menor viscosidad de pico, retrogradación y viscosidad final presentaron y donde se observó un mayor incremento de la temperatura de empastado (+14°C), comparadas con la harina control. Sin embargo, a tiempos largos de tratamiento, 60 y 90 min, las muestras tratadas con microondas mostraron mayor estabilidad. La consistencia de los geles siempre aumentó al aplicar cualquiera de los métodos de tratamiento estudiados. A tiempos largos (60 y 90 min), los geles elaborados con harinas tratadas con microondas fueron los que mayores valores de  $G'_1$  y  $G''_1$  presentaron. Al aumentar el tiempo de tratamiento las muestras mostraron colores más oscuros y su evolución fue hacia tonos más rojizos.

## ABSTRACT

Hydrothermal treatments (HMT) are physical modification methods that combine heat and moisture in such a way that the properties of the flours are modified, but without destroying the granular structure. The main objective of the present work was to compare the effect of different hydrothermal treatment methods (oven, autoclave and microwave) applied on rice flour with an initial moisture content of 25%, subjected to different treatment times (15, 30, 60 and 90 minutes). It was found that the treatments significantly affected the functional properties, colour, pasting, and rheological behaviour of the gels obtained from the resulting flours. The impact on these properties was dependent on the type of treatment applied and the exposure time.

In general, WAC and OAC values increased with the time of oven and autoclave treatment, as was the case for WSI. On the other hand, WAI and SP decreased with increasing exposure time. Samples treated in autoclave for 90 min showed the lowest

peak viscosity, retrogradation and final viscosity and the highest increase in pasting temperature (+14°C), compared to the control flour. However, at longer treatment times, 60 and 90 min, the microwave-treated samples showed higher stability. The consistency of the gels always increased when applying any of the treatment methods studied. At longer times (60 and 90 min), the gels made with microwave-treated flours showed the highest G'1 and G''1 values. The samples showed darker colours and their evolution was towards more reddish hue.

## 1 INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa* L.) es un cereal esencial en la alimentación humana, ya que es consumido por más del 50% de la población mundial (Ministerio de agricultura pesca y alimentación, 2017). Su cultivo data de hace aproximadamente 10.000 años en el continente asiático, aunque en la actualidad se encuentra distribuido mundialmente. A España, llegó sobre el año 800 A.C. con la invasión de los musulmanes para tiempo más tarde expandirse por el resto de Europa (Ávila Marqués, 2021). Después del trigo, es el cereal con mayor superficie de cultivo del mundo (Acevedo et al., 2006). En la actualidad, aproximadamente el 90%, se produce y consume en Asia.

Es un cultivo herbáceo de ciclo vegetativo anual que se encuentra dentro de la división de *Angiospermae*, clase de las monocotiledóneas, orden *Poaceae*, familia de *Gramineae* y género de *Oryza*. Este último, está formado por más de 20 especies entre las que, principalmente, se destacan el arroz asiático u *Oryza sativa* L. y el arroz africano u *Oryza glaberrima* (Acevedo et al., 2006).

En relación con su morfología, está formado por diferentes tejidos con diversas funciones, composición y estructura, por lo que en función de dichas características, se distinguen las diferentes variedades de arroz. El grano o semilla de arroz está compuesto por la cáscara y por el fruto o cariósido. Por su parte, la cáscara constituye entre el 20-22% del grano y está formada por dos glumelas, la lema (inferior) y la pálea (superior), bajo estas, se encuentran tres capas celulares que dan lugar al pericarpio y tras dos capas posteriores se encuentra el endospermo que se divide, a su vez, en el tegumento y la aleurona. Cuando el grano de arroz ya se ha cosechado y descascarillado este se denomina arroz integral (cabe destacar que aún se conserva el pericarpio) (Olmos, 2007).

La harina de arroz es un subproducto obtenido a partir de dicho cereal que se obtiene tras una limpieza o lavado inicial cuyo objetivo es humedecer y ablandar el grano. Después, se pasa a la etapa de desgerminado o descascarillado cuyo fin es quitar el germen y la cáscara. A continuación, se realiza una segunda limpieza, seguida de una molienda o molturación para triturar el arroz. A este paso, le sigue un proceso de secado

y se finaliza con un refinado o tamizado para obtener partículas homogéneas, obteniendo de esta manera harinas de arroz de diferentes calidades (Reque Díaz, 2007).

Desde el punto de vista nutricional, la harina de arroz aporta alrededor de 350 Kcal/100 gramos, es decir, es de alto índice energético. Es rico en carbohidratos (80-90%) y en proteínas (5-8%). También contiene cenizas (1,4%) y tiene bajo porcentaje en grasas (1%). Además, es considerada fuente de vitaminas y minerales tales como la tiamina, riboflavina, hierro y calcio (Pincioli, 2010; Aguilera, 2014). Otras características de suma importancia que le aportan un valor añadido a la harina de arroz, son la ausencia de gluten siendo apto para las personas celiacas, es hipoalérgica, tiene una gran cantidad de hidratos de carbono de fácil digestión (Harinas Climent, s.f.), presenta sabor suave e insípido y bajo contenido en sodio (Sánchez et al., 2009).

Sin embargo, las propiedades funcionales de la harina de arroz, como sucede con la mayoría de las harinas sin gluten, son insuficientes. Es por ello la necesidad de llevar a cabo una modificación de estas harinas, haciendo que aumente su estabilidad y aportando de esta manera unas características adecuadas para su aplicación en la industria alimentaria. Para solventar dicho problema, se pueden llevar a cabo varias alternativas entre las que se destaca la adición de proteínas, fibra, enzimas, hidrocoloides, la aplicación de altas presiones, tratamientos hidrotérmicos, entre otros (Villanueva et al., 2018).

El almidón es un biopolímero de reserva energética propio de los vegetales que se encuentra dentro de unas estructuras conocidas como gránulos. A su vez, está formado por dos macromoléculas cuya relación influye de forma directa en las propiedades funcionales y estructurales del almidón y depende del origen de este (Iuga & Mironeasa, 2020). La amilosa supone entre el 20-30% del total del almidón. Desde un punto de vista bioquímico, es una macromolécula helicoidal compuesta por polímeros de D-glucosas unidas por enlaces glucosídicos de carácter lineal,  $\alpha$  (1,4). Además, se la relaciona con la región amorfa del grano (junto con una pequeña fracción de amilopectina). En el medio de estas moléculas helicoidales se distribuyen átomos de hidrógeno, aportando la propiedad hidrofílica de la molécula de almidón. Juega un papel importante en las propiedades de empastado y la retrogradación ya que tras la gelatinización es capaz de formar una pasta (Zavareze & Dias, 2011). En el caso de la amilopectina, forma la mayor parte de la fracción del almidón (70-80%). Al igual que la amilosa está compuesta por unidades de D-glucosas, pero con la diferencia de que las cadenas lineales  $\alpha$  (1,4), incluyen enlaces glucosídicos  $\alpha$  (1,6) cada 24-30 unidades de glucosas, aportando una estructura ramificada (Chakraborty et al., 2022). En este caso se le relaciona con la región cristalina.

Los tratamientos hidrotérmicos (*HMT-Heat Moisture Treatments*) son métodos de modificación física que combinan calor y humedad, de manera que se modifican las propiedades de las harinas pero sin destruir la estructura granular, ya que se basa en el control de la movilidad de las moléculas debido a una limitación de la cantidad de agua (Zavareze & Dias, 2011). En estos tratamientos la temperatura está por encima de la temperatura de gelatinización (normalmente, 90-120°C), el contenido de humedad es bajo (20-35%) y los tiempos pueden alcanzar hasta las 24 horas, aunque de generalmente oscilan entre 5 minutos y 16 horas (García Solaesa et al., 2021). Tienen como finalidad estabilizar el almidón mediante una modificación física, es decir, no suponen la adicción de productos químicos por lo que disminuyen el efecto nocivo en el organismo humano y reducen el impacto en el medio ambiente siendo una alternativa más sostenible. Dichas modificaciones se basan en una reorganización de las cadenas de amilosa y amilopectina lo que se traduce en modificaciones en las propiedades y características de las harinas o almidones tratados. Entre ellas, se destaca un aumento de la temperatura de transición y del rango de gelatinización, una disminución del hinchamiento y lixiviación de la amilosa, un aumento de la estabilidad térmica (Zavareze & Dias, 2011) y modificaciones en la cristalinidad, solubilidad, digestibilidad, en las propiedades térmicas, propiedades reológicas y propiedades de empastado (Iuga & Mironeasa, 2020; Zheng et al., 2020). Estos efectos van a depender de las variables críticas del proceso que son la temperatura alcanzada por la harina, el tiempo de dicho tratamiento y la humedad inicial de la harina, así como de otros factores como son el origen botánico de las materias primas, la relación entre amilosa/amilopectina y su composición (Iuga & Mironeasa, 2020).

Los tratamientos HMT pueden llevarse a cabo mediante diferentes sistemas de calentamiento. De forma convencional, el calentamiento con estufa u horno (OV) ha sido el más utilizado. Este método se basa en la aplicación de calor seco (García Solaesa et al., 2021) y frecuentemente requiere de tiempos de aplicación largos, llegando hasta 16-24h de tratamiento (Zhang et al., 2019). Estudios previos han demostrado cambios en el almidón. Estos cambios se tradujeron en modificaciones en las propiedades tecnológicas y en la digestibilidad del almidón, aumentando el almidón resistente en la harina de camote (Liao et al., 2019), harina de tapioca (Chaiwanichsiri, 2016) y en la harina de lycoris (Zhang et al., 2019). Las condiciones variaron en función del estudio, Liao et al. (2019) calentaron las muestras en un horno seco durante 1 hora a una temperatura de 105°C, Chaiwanichsiri et al. (2016) utilizaron tres temperaturas de tratamiento (95-110-125°C) durante 16 horas y Zhang et al. (2019) trataron la harina a una temperatura de 120°C durante 6 horas.

Los tratamientos con autoclave se basan en la combinación de alta presión y vapor con el fin de transferir el calor de una forma más rápida, lo que permite reducir los tiempos de aplicación del tratamiento. Max et al. (2017) estudiaron los efectos del tratamiento mediante autoclave (a unas condiciones de 121°C durante 30 y 60 minutos) en granos de arroz con cáscara con una humedad inicial de 13, 16 y 18% con el objetivo de observar modificaciones en las propiedades fisicoquímicas, en la digestibilidad y en la estructura. Estos autores reportaron una reducción del poder de hinchamiento, de la solubilidad y la cristalinidad del almidón. Ashwar et al. (2016) también observaron una reducción de la solubilidad y el poder de hinchamiento, así como una reducción de la viscosidad de pico y la temperatura de empastado en almidón de arroz tratado con autoclave a 121°C durante 30 minutos. Además, reportaron un aumento de la capacidad de absorción de agua y de aceite en los almidones tratados.

El tratamiento HMT asistido con microondas (MW) es una técnica innovadora que se basa en la aplicación de calor de manera uniforme y rápida (García Solaesa et al., 2021). Esta tecnología novedosa, consiste en la aplicación de ondas electromagnéticas con frecuencias bajas que oscilan en torno a 1-300 GHz durante un tiempo predeterminado, logrando que las moléculas de agua se ionicen fácilmente, ya que tienen un comportamiento polar, absorban de forma rápida la radiación y se orienten respecto al campo eléctrico generando un calentamiento uniforme en todo el volumen y a una velocidad superior a los tratamientos convencionales, por lo que se podría traducir en un ahorro de energía. La potencia a aplicar depende de las características dieléctricas de la harina de partida y de la cantidad de humedad inicial que presente la harina a tratar (Iuga & Mironeasa, 2020).

Estudios previos han demostrado que al igual que el HMT convencional, los MW afectan a las propiedades de empastado, la capacidad de retención de agua, capacidad de retención de aceite y propiedades reológicas (Zheng et al., 2020). Otro estudio que lo corrobora es el llevado a cabo por Villanueva et al. (2018b) en el que la harina de arroz fue tratada mediante radiación microondas a una potencia de 900W durante 2, 4, 6 y 8 minutos en ciclos de 20/40 (20 segundos de exposición y 40 segundos de reposo).

Hasta el día de hoy los estudios encontrados se basan en el uso de diferentes técnicas de tratamiento hidrotérmico para el tratamiento de legumbres y algunos cereales como el maíz, trigo y en algunos casos arroz. La mayoría de estos se centran en el estudio de la digestibilidad (Afolobi, et al., 2018; Ashwar et al., 2016), propiedades fisicoquímicas (Zhang et al., 2019; Chaiwanichsiri, 2016) y de empastado (García Solaesa et al, 2021; Villanueva et al, 2018a) pero bajo muy diferentes condiciones de tratamiento. Además, no se han encontrado estudios que comparen estas tres técnicas (estufa, autoclave y microondas) a diferentes tiempos de tratamiento. Tras una búsqueda bibliográfica,

únicamente se han encontrado estudios que comparen HMT convencional con microondas (Khurshida & Deka, 2022), HMT convencional con autoclave (Asranudin et al., 2021) y en pocas ocasiones la materia prima tratada es harina de arroz.

## 2 OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo es comparar el efecto de diferentes métodos de tratamiento hidrotérmico (en estufa, en autoclave y por medio de microondas) aplicados sobre harina de arroz de humedad inicial 25% sometida a distintos tiempos de tratamiento (15, 30, 60 y 90 minutos).

Este objetivo principal se puede desglosar en varios objetivos específicos:

- Evaluar el impacto del tiempo de tratamiento sobre las propiedades funcionales, el color y las propiedades de empastado de la harina de arroz resultante.
- Evaluar el impacto del tiempo de tratamiento sobre las propiedades reológicas de los geles elaborados con harina de arroz.
- Evaluar el impacto de los diferentes métodos de tratamiento hidrotérmico en las propiedades funcionales, el color y las propiedades de empastado de la harina de arroz.
- Evaluar el impacto de los diferentes métodos de tratamiento sobre las propiedades reológicas de los geles elaborados con harina de arroz tratada.
- Comparar y relacionar los diferentes métodos y condiciones de tratamiento sobre las propiedades estudiadas.

## 3 MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del presente trabajo se ha utilizado como materia prima harina de arroz de variedad índica, NPU, suministrada por Herba RiceMill (Tarragona, España). Según datos aportados por la empresa suministradora, esta harina posee un contenido de cenizas menor de 0,9 %, un contenido de proteína mayor de 6,5%, un contenido en grasa menor del 1% y posee menos de 10 ppm de gluten. Para los diferentes ensayos se utilizó aceite de girasol Koipe (Deoleo, Córdoba, España), agua destilada obtenida a partir del equipo MiloRo de la marca Milipore (Madrid, España) y agua del grifo.

### 3.1 Preparación y acondicionamiento de las muestras nativas

La humedad de las muestras se determinó con el método oficial AACC 44-19 (AACC, 2010a). Éste se basa en secar 2 gramos de muestra en una estufa de secado por convección (Binder ED56, Alemania) durante 1 hora a 130 °C. Pasado ese tiempo, se atemperaron las cápsulas y se pesaron. La humedad se calculó como la pérdida de peso con relación al peso inicial de la muestra.

Los diferentes tratamientos se aplicaron sobre harina de arroz con una humedad inicial del 25%. Para ello, una vez se determinó su humedad inicial, se pulverizó agua sobre la harina, mientras se mantenía en constante agitación con una amasadora de varillas Teddy AR005 (Broendby, Dinamarca), hasta que adquirió el porcentaje establecido. A continuación, se envasó en un recipiente hermético de polipropileno y se mantuvo refrigerado a una temperatura de  $4^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas para permitir el equilibrio de la humedad en toda la muestra. Posteriormente, se comprobó su humedad mediante el método AACC 44-19 (AACC, 2010a) y se envasó en bolsas de PA/PP, selladas con una termoselladora (PFS-200) que contenían 50-53 gramos de harina. Estas bolsas se almacenaron a una temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  hasta su uso.

### **3.2 Pretratamiento**

A partir de la harina de arroz nativa con una humedad del 25% se prepararon las diferentes muestras. Cada tratamiento (en estufa, en autoclave y en microondas) se realizó a cuatro tiempos diferentes (15, 30, 60 y 90 minutos) y por duplicado. El procedimiento inicial y final fue común para todas las muestras.  $50\pm 1$  gramos de harina de arroz humedecida al 25% se introdujeron en un frasco de vidrio de borosilicato de 250 ml de capacidad (Frasco ISO Simax, República Checa), que cierra herméticamente. En cada frasco se colocaron 2 indicadores puntuales de temperatura Testoterm® (Testo, Madrid, España) de  $110^{\circ}\text{C}$  y de  $121^{\circ}\text{C}$  situados en el centro de la muestra en ambas direcciones. Los frascos se pesaron antes y después de cada tratamiento con el fin de comprobar que no se produjeron pérdidas de humedad. Por cada tipo de tratamiento y tiempo, se trataron 150 g de harina de arroz, distribuida en tres frascos de 50 g. Cada tratamiento se realizó, al menos, por duplicado.

### **3.3 Tratamiento con estufa (OV)**

Uno de los tratamientos hidrotérmicos llevados a cabo en el estudio se basa en un tratamiento HMT convencional con estufa de secado por convección. Una vez preparadas las muestras se introdujeron los 3 frascos de vidrio en la parte central de una estufa BINDER ED56 (Tuttlingen, Alemania) y separados unos de otros. Estos se dejaron 15, 30, 60 y 90 minutos en función del ensayo que se estuviera realizando. Posteriormente, se dejaron enfriar hasta que la harina alcanzase una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

### **3.4 Tratamiento con autoclave (AC)**

Para llevar a cabo los tratamientos con autoclave, se utilizó una olla a presión WMF Perfect (Cantabria, España) de acero inoxidable y una placa de inducción Crafft CPLIF2000 (Cantabria, España). Se calentaron 800 ml de agua a máxima potencia (2000W) y se introdujo un soporte de acero para que los frascos no estuvieran en

contacto con la base de la olla. Cuando el agua comenzó a hervir, se colocaron los tres frascos que contenían 50 g de harina cada uno (humedecida al 25%), separados unos de otros y se cerró la olla. Cuando se alcanzó una presión interna de 1,9 bares se bajó la potencia de la placa a 400W y se mantuvo a esa potencia durante el tiempo de tratamiento establecido (15, 30, 60 o 90 min). Posteriormente se enfrió la olla con agua fría para despresurizarla y los frascos se dejaron atemperar hasta alcanzar una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

### 3.5 Tratamiento por radiación microondas (MW)

Estos tratamientos se llevaron a cabo en un microondas modelo SHARP R342INW (Sakai, Japón) con una potencia de 900W y frecuencia de 2450 MHz. En este caso, solo fue posible tratar un frasco de harina por tratamiento. Para asegurar la homogeneidad del tratamiento, el frasco hermético con 50 g de harina de arroz se mantuvo en constante movimiento mediante un eje rotatorio externo a una velocidad de 60-70 rpm. Las muestras se expusieron a una radiación del 100% de potencia aplicada en ciclos de conexión alterna (tiempo de exposición a la radiación (s) / tiempo de reposo (s)). Para realizar los tratamientos y conseguir que la temperatura se mantuviera constante a  $120^{\circ}\text{C}$ , los ciclos aplicados constaron de 4 fases: 1º ciclo de 20/50 durante 140 segundos, 2º ciclo de 20/100 durante 120s, 3º ciclo de 10/100 durante 770 segundos y 4º ciclo de 10/110 durante el resto del tiempo de cada tratamiento para alcanzar el tiempo final de 15, 30, 60 y 90 minutos. Una vez finalizado el tratamiento, el frasco se dejó atemperar hasta alcanzar una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

### 3.6 Post-tratamiento

Para mejorar la conservación de la harina, se colocó en una bandeja de plástico de manera uniforme y se introdujo en una incubadora Memmert ICP260 (Buechenbach, Alemania) a  $35^{\circ}\text{C}$  hasta alcanzar una humedad inferior al 13%. Tras este secado se comprobó la humedad mediante el método explicado en el apartado 3.1. Posteriormente, la harina obtenida se tamizó con una tamizadora de vibración electromagnética CISA RP200N (Barcelona, España) con un tamiz de tamaño de apertura menor a 250 micras durante 10 minutos, siendo molida la parte de la muestra con un tamaño de partícula superior en un mortero de vidrio, hasta que la totalidad de la muestra atravesó el tamiz.

### 3.7 Propiedades funcionales de las harinas

**Capacidad de absorción de agua (Water Absorption Capacity-WAC):** Esta propiedad mide la capacidad de la harina para absorber agua mediante la formación de una mezcla de agua destilada junto con harina y una centrifugación posterior. Para ello se pesó  $2,00 \pm 0,01$  gramos de la muestra a analizar, PM. Con la ayuda de un dosificador

automático acoplado a una botella de agua destilada se vertieron 20 ml. Después, se agitó con la ayuda de un vórtex (Velp Scientifica, Italia) a baja velocidad durante 30 segundos 3 veces dejando un tiempo de reposo entre cada vortex de 10 minutos. Posteriormente se centrifugó (Sorvall ST16R, ThermoFisher Scientific, Alemania) a 3000xg durante 30 minutos y se desechó el sobrenadante. Por último, se pesó el tubo (PT) y se calculó la capacidad de absorción de agua (expresado por materia seca de harina) mediante la siguiente fórmula, en la que H hace referencia a la humedad inicial de la muestra.

$$WAC (ms) = \frac{100 \times \left( \frac{PT - PR - PM}{PM} \right)}{100 - H}$$

**Capacidad de absorción de aceite (Oil Absorbtion Capacity -OAC):** Para determinar la capacidad de absorción de aceite, se siguió el mismo procedimiento que el empleado en la determinación de la Capacidad de absorción de agua, con la diferencia de que en vez de utilizar agua destilada se utilizó aceite de maíz de la marca Koipe. La capacidad de absorción de aceite se calculó mediante la siguiente fórmula, donde H hace referencia a la humedad inicial de la muestra.

$$OAC (ms) = \frac{100 \times \left( \frac{PT - PR - PM}{PM} \right)}{100 - H}$$

**Índice de absorción de agua (Water absorbtion index-WAI), Índice de solubilidad (Water solubility index-WSI) y poder de hinchamiento de la harina (Swelling power-SP):** Para este procedimiento, al igual que en los anteriores, se pesaron los tubos Falcón sin faldón (PR) y se añadieron 2,00 ± 0,01 gramos de la muestra a analizar, PM. Posteriormente, se añadieron 20 ml de agua destilada con un dosificador automático. Después, se agitaron con la ayuda de un vórtex (Velp científica, Italia) a baja velocidad durante 30 segundos y se llevaron a ebullición durante 15 minutos. Posteriormente se atemperaron con agua fría hasta que estas alcanzaron una temperatura inferior a 30°C. A continuación, se centrifugaron (Sorvall ST16R, ThermoFisher Scientific, Alemania) a 3000xg durante 10 minutos. En este caso, se vertió el sobrenadante en cápsulas de acero (previamente pesadas, PC) y se secaron en la estufa durante 24 horas a 110°C. Pasado ese tiempo, se pesaron las cápsulas (PSL) y se calcularon los diferentes parámetros a partir de las siguientes fórmulas:

$$WAI \left( \frac{\text{g gel}}{\text{g harina}} \right) = \frac{(PS - PR)}{PM}$$

$$WSI \left( \frac{\text{g sólido soluble}}{100\text{g harina}} \right) = \frac{(PSL - PC)}{PM}$$

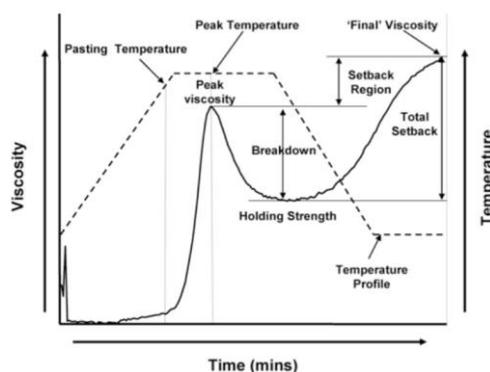
$$SP \left( \frac{\text{g gel}}{\text{g harina insoluble}} \right) = \frac{(PS - PR)}{PM - (PSL - PC)}$$

Al igual que en los anteriores parámetros, para expresar los datos en base materia seca, se dividieron los resultados obtenidos entre la materia seca de las diferentes muestras.

$$\text{WAI, WSI, SP (ms)} = \frac{\text{WAI, WSI, SP}}{100 - H}$$

### 3.8 Propiedades de empastado de las harinas

Las propiedades de empastado se determinaron mediante un ensayo de viscosidad con un equipo RVA4500- Rapid Visco Analyzser (Perten Instrument, España) controlado por el software Thermocline. Se utilizó el método Standard 2 que consta de un ensayo de 22 minutos de duración en la que una mezcla de harina de arroz y agua (ajustada en función de su humedad, al 14%) se somete a una variación controlada de temperatura y cizalla. Mientras la dispersión se mantiene en agitación a 160 rpm, el equipo estabiliza la temperatura en 50°C durante 1 minuto. A continuación, se realiza un aumento de temperatura desde 50°C hasta 95°C, a razón de 6°C/min. Al llegar a los 95°C, la temperatura se mantuvo durante 5 minutos y, a continuación, se redujo de nuevo hasta 50°C, a una velocidad de 6°C/min, donde se mantuvo durante 2 minutos más. Los parámetros que se obtuvieron en este ensayo fueron: temperatura de empastado o temperatura a la que los gránulos de almidón se comienzan a hinchar por la absorción del agua (*pasting temperature-PT*), viscosidad del pico o viscosidad máxima del gel (*peak viscosity-PV*), tiempo en el cual se alcanza la máxima viscosidad de pico (*peak time*), viscosidad mínima, de caída o aquella determinada al final del tiempo de calentamiento (*trough viscosity-TV*), la diferencia entre el pico de viscosidad (PV) y la viscosidad de caída (TV) es la que determina la estabilidad del gel (*breakdown-BV*), viscosidad final o la que se alcanza al final del ensayo (*final viscosity-FV*) y la retrogradación (*setback-SV*) que se define como la diferencia entre la viscosidad final (FV) y la viscosidad de caída (TV). Se realizaron duplicados por cada muestra.



**Figura 1:** Representación gráfica de los parámetros analíticos del RVA.

### 3.9 Comportamiento reológico de los geles

Los geles que se obtuvieron en el ensayo de empastado se utilizaron para estudiar su comportamiento reológico mediante un reómetro Kinexux Pro+ (modelo KNX2210, Malvern Instrumensts, Reino Unido). Estos ensayos se realizaron por duplicando, utilizando una geometría de placas paralelas, de superficie serrada de 40 mm, con una separación entre ambas placas de 1 mm.

El gel obtenido de la prueba de empastado se colocó entre las placas y se dejó un tiempo de reposo de 15 min a 25°C antes de comenzar la prueba. La temperatura se controló mediante un módulo Peltier KNX2002 C25P y un baño de recirculación KNX2002 de la misma casa comercial que el reómetro. Se realizó un barrido de deformación en el rango de 0,1-1000% de deformación a una frecuencia constante de 1Hz. Mediante este ensayo se estableció la región viscoelástica lineal (LVR) mediante la localización del esfuerzo máximo que es capaz de soportar el gel antes de romper su estructura ( $\tau_{max}$ ) y el valor de *crossover*, punto en el que se igualan los módulos elástico y viscoso ( $G' = G''$ ) y el valor de la tangente de pérdida  $(\tan\delta)_1$  es 1. Este punto indica el esfuerzo a partir del cual cambia el comportamiento del gel, pasando de ser más elástico que viscoso a ser más viscoso que elástico. A continuación del barrido de deformación, se realizó un barrido de frecuencias en el rango de 10-1 Hz a una deformación constante del 1% (dentro de la LVR). Las curvas obtenidas se ajustaron a ecuaciones potenciales según se describe en Ronda et al. (2014):

$$G'(\omega) = G'_1 \times \omega^a$$

$$G''(\omega) = G''_1 \times \omega^b$$

$$\text{Tan}(\delta)(\omega) = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)} = \left(\frac{G''}{G'}\right)_1 \times \omega^{b-a} = (\tan\delta)_1 \times \omega^c$$

A partir de estas ecuaciones se obtuvieron los valores del módulo elástico ( $G'_1$ ), módulo viscoso ( $G''_1$ ),  $(\tan\delta)_1$  a la frecuencia de 1Hz y los parámetros "a", "b", "c" (relacionados con el grado de dependencia de los módulos y la tangente con la frecuencia).

### 3.10 Análisis de color

Para evaluar el color de las harinas se utilizó el colorímetro PCE-CSM5 (PCE Instruments, España) y el software CQCS. La medición se llevó a cabo en el espacio CIELAB, con un observador estándar de 10° e iluminante patrón D65. Los parámetros que se obtuvieron fueron  $L^*$  (luminosidad),  $a^*$  (cromaticidad),  $b^*$  (cromaticidad) y  $(\Delta E^*)$  o diferencia de color. A partir de los valores de  $a^*$  y  $b^*$ , se calculó el tono (h) y la saturación ( $C^*$ ). Para cada muestra se tomaron 5 medidas.

$$C^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})}$$

$$h = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

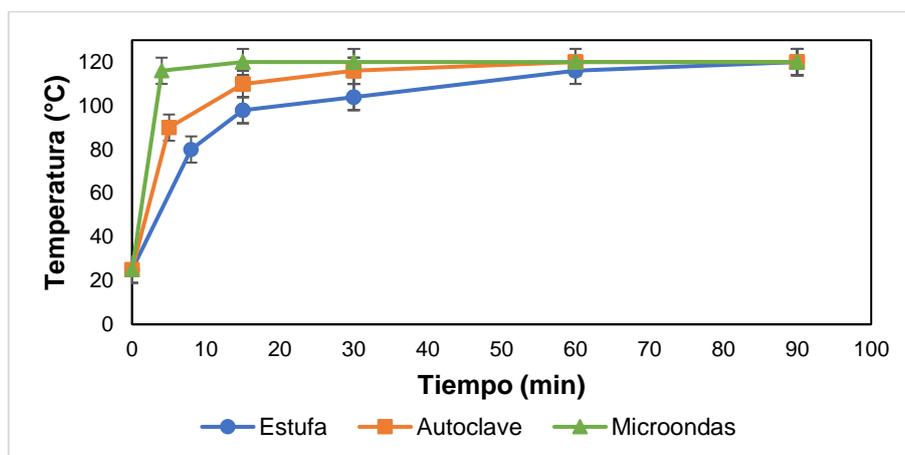
### 3.11 Análisis estadístico

Para dicho análisis se utilizó el software Statgrapichs Centruion XVII (Statponit Technologies Inc, Warrenton, EEUU). Los datos se han presentado como valores medios y han sido analizados mediante análisis de varianza (ANOVA) tanto simple como multifactorial, utilizando la prueba LSD de Fisher ( $p < 0,05$ ) para detectar diferencias significativas entre las muestras analizadas.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Evolución de la temperatura con el tiempo de tratamiento

La evolución de la temperatura de la harina de arroz humedecida al 25% durante el tratamiento en estufa, autoclave y microondas se muestra en la Figura 2. Como se puede observar en dicha Figura, la evolución de la temperatura de la harina fue diferente en función del tipo de tratamiento.



**Figura 2:** Gráfico de evolución de la temperatura en los diferentes métodos de tratamiento HMT estudiados.

Las harinas tratadas mediante microondas alcanzaron rápidamente (a los 4 minutos de tratamiento) la temperatura de  $120^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  y esta se mantuvo constante hasta los 90 minutos estudiados. Por el contrario, la evolución de la temperatura de las harinas en los tratamientos llevado a cabo con autoclave y estufa fue más lenta. A los 15 minutos de tratamiento, las harinas tratadas con autoclave ya alcanzaron una temperatura de  $116^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , mientras que en estufa se llegó a  $98^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Estas harinas no alcanzaron la temperatura de  $116^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta los 60 minutos de tratamiento. Como se puede

observar en la Figura 2, todas las harinas alcanzaron un periodo de temperatura prácticamente estable, donde el calor absorbido por la muestra fue igual al calor cedido por ella hacia el recipiente y de este hacia el entorno (Villanueva et al., 2018a). Este periodo fue más prolongado en los tratamientos con microondas, seguido de los tratamientos con autoclave y, por último, en los tratamientos en estufa.

## 4.2 PROPIEDADES FUNCIONALES

La Tabla 1 recoge los resultados obtenidos en los ensayos de propiedades funcionales tanto de la harina de arroz control como de las muestras tratadas. Como se observa en dicha tabla el tipo de tratamiento (F1) mostró únicamente un efecto significativo (p-valor<0,001) sobre la capacidad de absorción del agua, WAC. El tiempo de tratamiento (F2) y la interacción doble (tiempo\*tipo de tratamiento) mostraron un efecto significativo sobre todos los parámetros estudiados, con un nivel de significancia (p-valor) menor de 0,001 en la mayoría de ellos.

**Tabla 1:** Propiedades funcionales de las muestras de harina de arroz tratadas en estufa (OV), autoclave (AC) y microondas (MW).

Muestra	WAC (g/g ms)	OAC(g/g ms)	WAI(g/g ms)	WSI(g/100g ms)	SP(g/g ms)
<b>Control</b>	1,16 a	1,11 a	10,6 d	2,5 b	10,7 c
<b>OV15</b>	1,35 bA	1,32 bA	10,1 cB	1,9 aA	10,3 bB
<b>OV30</b>	1,55 cB	1,18 aA	9,9 cC	3,5 cA	10,2 bC
<b>OV60</b>	1,86 dB	1,33 bAB	8,1 bA	7,5 dA	8,6 aB
<b>OV90</b>	1,80 dB	1,29 bB	7,8 aC	7,1 dA	8,4 aB
<b>SE</b>	0,02	0,02	0,1	0,1	0,1
<b>Control</b>	1,16 a	1,11 a	10,61 e	2,5 a	10,73 e
<b>AC15</b>	1,54 bB	1,34 cA	9,38 dA	3,7 bB	9,69 dA
<b>AC30</b>	1,75 cC	1,22 bB	8,20 cA	6,6 cC	8,70 cA
<b>AC60</b>	1,95 dC	1,36 cB	7,86 bA	6,8 cA	8,36 bA
<b>AC90</b>	1,98 dC	1,36 cB	7,52 aB	7,2 dA	7,85 aA
<b>SE</b>	0,04	0,03	0,06	0,1	0,06
<b>Control</b>	1,16 a	1,11 a	10,6 e	2,5 a	10,73 e
<b>MW15</b>	1,31 bA	1,54 dB	9,7 dA	4,2 bC	10,06 dAB
<b>MW30</b>	1,33 bA	1,36 cC	8,6 cB	5,3 bcB	9,08 cB
<b>MW60</b>	1,33 bA	1,23 bA	8,0 bA	6,7 cdA	8,47 bAB
<b>MW90</b>	1,28 bA	1,17 abA	7,2 aA	7,0 dA	7,69 aA
<b>SE</b>	0,03	0,03	0,1	0,5	0,09
<b>Análisis de varianza y significancia (p-valores)</b>					
<b>(F1)</b>	***	ns	ns	ns	ns
<b>(F2)</b>	**	*	***	***	***
<b>(F1)x(F2)</b>	***	***	***	***	***

WAC: capacidad de absorción del agua, OAC: capacidad de absorción del aceite, WAI: índice de absorción del agua, WSI: índice de solubilidad del agua, SP: poder de hinchamiento, F1: tipo de tratamiento, F2: tiempo de tratamiento, SE: error estándar obtenido mediante el análisis estadístico ANOVA, ns: no significativo p-valor>0,05, \*: p-valor<0,05, \*\*: p-valor<0,01, \*\*\*: p-valor<0,001. Para un mismo tipo de tratamiento, los valores medios con letras minúsculas diferentes para un mismo parámetro indican diferencias significativas entre las medias (p<0,05). Las letras mayúsculas se utilizan para evaluar el efecto del tipo de tratamiento para un mismo tiempo de tratamiento; para cada parámetro, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre las medias (p<0,05). En el análisis de varianza y significancia se resalta en negrita los p-valores <0,05, los cuales indican diferencias significativas con un nivel de confianza >95%.

La capacidad de absorción de agua (WAC) es la capacidad que tiene la harina para absorber y retener el agua tras una centrifugación. Esta propiedad depende en mayor parte, de los hidratos de carbono y de las proteínas presentes en la harina (Guiñazú Fernández et al., 2020). Como se muestra en la Tabla 1, las muestras tratadas con diferentes métodos de tratamiento y a diferentes tiempos mostraron mayores valores de WAC que la harina control. En el tratamiento llevado a cabo mediante radiación microondas no se observaron diferencias significativas al variar el tiempo de tratamiento. Sin embargo, tanto en el tratamiento con estufa como en el de autoclave, se observó un aumento significativo de los valores de WAC, hasta los 60 min de tratamiento (60% y 68% más altos, respectivamente, que la harina control), sin observarse ningún cambio al aumentar el tiempo hasta los 90 min. Este aumento del WAC en las harinas tratadas puede deberse a la creación de enlaces de hidrógeno entre las regiones amorfas y cristalinas del almidón (García Solaesa et al., 2021).

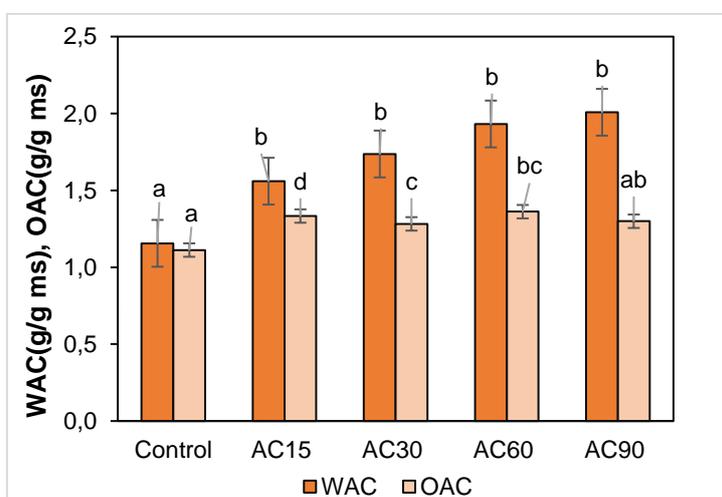
Comparando los diferentes métodos de tratamiento, los tratamientos con autoclave fueron los que mayores valores de WAC presentaron a todos los tiempos estudiados, seguido del tratamiento en estufa y del tratamiento con microondas. Sin embargo, a tiempos cortos de tratamiento (15 min) no se observaron diferencias significativas entre el tratamiento en estufa y el tratamiento con microondas. Estos resultados concuerdan con los reportados por Villanueva et al. (2018a) quienes observaron un aumento significativo del WAC para las harinas tratadas con microondas respecto a la harina nativa. Estos autores lo relacionaron con el elevado contenido en almidón dañado que se genera en los tratamientos MW, en los que se alcanzaron temperaturas altas durante tiempos prolongados.

La capacidad de absorción del aceite (OAC) es la capacidad que presentan las harinas para retener/absorber aceite tras una centrifugación. Todas las muestras presentaron mayor poder de retención de aceite que la harina control aunque no se observó una tendencia clara en los diferentes métodos de tratamiento. Las muestras tratadas con microondas mostraron menores valores de OAC a medida que aumentó el tiempo de exposición a la radiación. Esto puede deberse al aumento de la fracción amilosa-lípido, es decir, a la fracción hidrofóbica que se genera a altas temperaturas de manera que los fosfolípidos quedan retenidos en las cadenas de amilosa (Ashwar et al., 2016). Los tratamientos con estufa y con autoclave presentaron un punto de inflexión cuando el tiempo de exposición fue de 30 minutos, llegando en el caso de la estufa a valores similares a la muestra control.

Comparando los tres tratamientos, cabe destacar que el mayor valor obtenido (1,54 g/g ms) correspondió al tratamiento por microondas durante un tiempo de 15 minutos. Es decir, a tiempos de tratamientos cortos la radiación microondas tiene un mayor efecto

en la capacidad de absorción del aceite, mientras que a tiempos prolongados no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos de estufa y autoclave, como se puede observar en la Figura 3. Wang & Johnson (2001) quienes llevaron a cabo un estudio de tratamiento HMT en estufa en harina de soja, concluyeron que no se modificó la capacidad de absorción del aceite de las muestras tratadas. Por otro lado, García Pacheco et al. (2019) reportaron un aumento del OAC para harinas de frijol blanco tras un proceso de HMT convencional.

Tanto el WAC como el OAC siguieron la misma tendencia reportada por otros autores. Ashwar et al. (2016) observaron un aumento del WAC a medida que aumentaba el tiempo en autoclave y los valores de OAC fueron mayores en las muestras tratadas que la harina control.

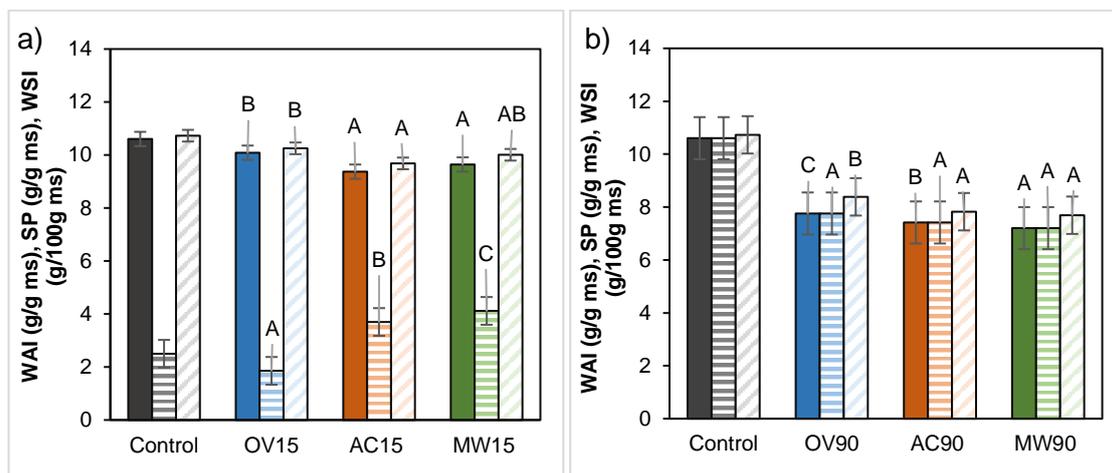


**Figura 3:** Capacidad de absorción de agua (WAC) y de aceite (OAC) de las muestras de harina de arroz nativa (control) y tratadas con autoclave (AC) a 15, 30, 60 y 90 minutos de tratamiento.

Como se puede observar en la Tabla 1 y en la Figura 4, los valores de WAI y SP disminuyeron con el tratamiento, y este descenso fue progresivo a medida que aumentó el tiempo de tratamiento para todos los métodos estudiados. Esto puede deberse a una reorganización del almidón y a la formación de cadenas y complejos amilosa-lípidos que impiden que el almidón se hinche (García Solaesa et al., 2021; Sun et al., 2014).

Comparando los diferentes tratamientos, los valores de WAI disminuyeron respecto a la harina control un 26% para la estufa, 29% para el autoclave y 32% para el microondas a tiempos de tratamiento de 90 min, siendo el microondas el que más efecto tuvo en las harinas tratadas. En el caso del SP (tomando como referencia los mismos valores) esta disminución fue 21%, 26% y 28% respectivamente, habiendo una clara diferencia en el caso del microondas. La mayor parte de la literatura sugiere que el parámetro SP se reduce en almidones tratados con HMT (García Solaesa et al., 2021). Almaiman et al. (2021) observaron también un descenso en el parámetro SP en granos de sorgo tratados con microondas. Lo asociaron a que durante los tratamientos se produjo una

desnaturalización de las proteínas debido a la temperatura alcanzada, lo que dio lugar también a la disminución de las propiedades emulsionantes. Sin embargo, en el presente trabajo, en el que se ha tratado harina de arroz, los resultados obtenidos en WSI indican un aumento. Lo mismo se concluyó en un estudio a partir de yuca a 50°C (Falade et al., 2019) y en un segundo estudio a base de arroz tratado por radiación microondas (García Solaesa et al., 2021).



**Figura 4:** Comparación del Índice de absorción de agua (WAI), Índice de solubilidad (WSI) y Poder de hinchamiento (SP) de las muestras tratadas en estufa (OV), autoclave (AC) y microondas (MW) durante 15 minutos (a) y 90 minutos (b) de tratamiento. Las barras de color sólido hacen referencia al parámetro WAI, las barras con trama horizontal hacen referencia al parámetro WSI y las barras con trama oblicua hacen referencia al parámetro SP.

El índice de solubilidad (WSI) de las muestras tratadas aumentó con el tiempo de tratamiento para todos los métodos estudiados, excepto para el tiempo más corto, 15 minutos, en estufa cuyo valor fue inferior (1,9 g/100 g ms) al obtenido por la harina nativa o control (2,5 g/100 g ms). Según García-Solaesa et al. (2021), el aumento de la solubilidad puede ser consecuencia de la desintegración de los gránulos de almidón, ya que los enlaces de hidrógeno se rompen, lo que debilita las interacciones amilosa/amilopectina y favorece las interacciones amilosa/agua. A tiempos cortos de tratamiento, el tratamiento por estufa fue el que menos efecto tuvo sobre este parámetro con unos valores de 1,9-3,5 g/100 g ms, sin embargo, se encontraron diferencias significativas entre los tres tratamientos cuando el tiempo fue de 60 o 90 minutos. Lo mismo se concluyó en un estudio elaborado por García Solaesa et al. (2021) en harina de arroz tratada con microondas.

Un estudio llevado a cabo por Afolobia et al. (2018), quienes evaluaron las diferencias en la harina de cachute sometida a tratamientos HMT asistidos por estufa y autoclave observaron que la harina tratada con estufa obtuvo los valores más bajos de SP y WSI comparado con autoclave. En este estudio únicamente se cumplió la tendencia del WSI.

### 4.3 PROPIEDADES DE EMPASTADO

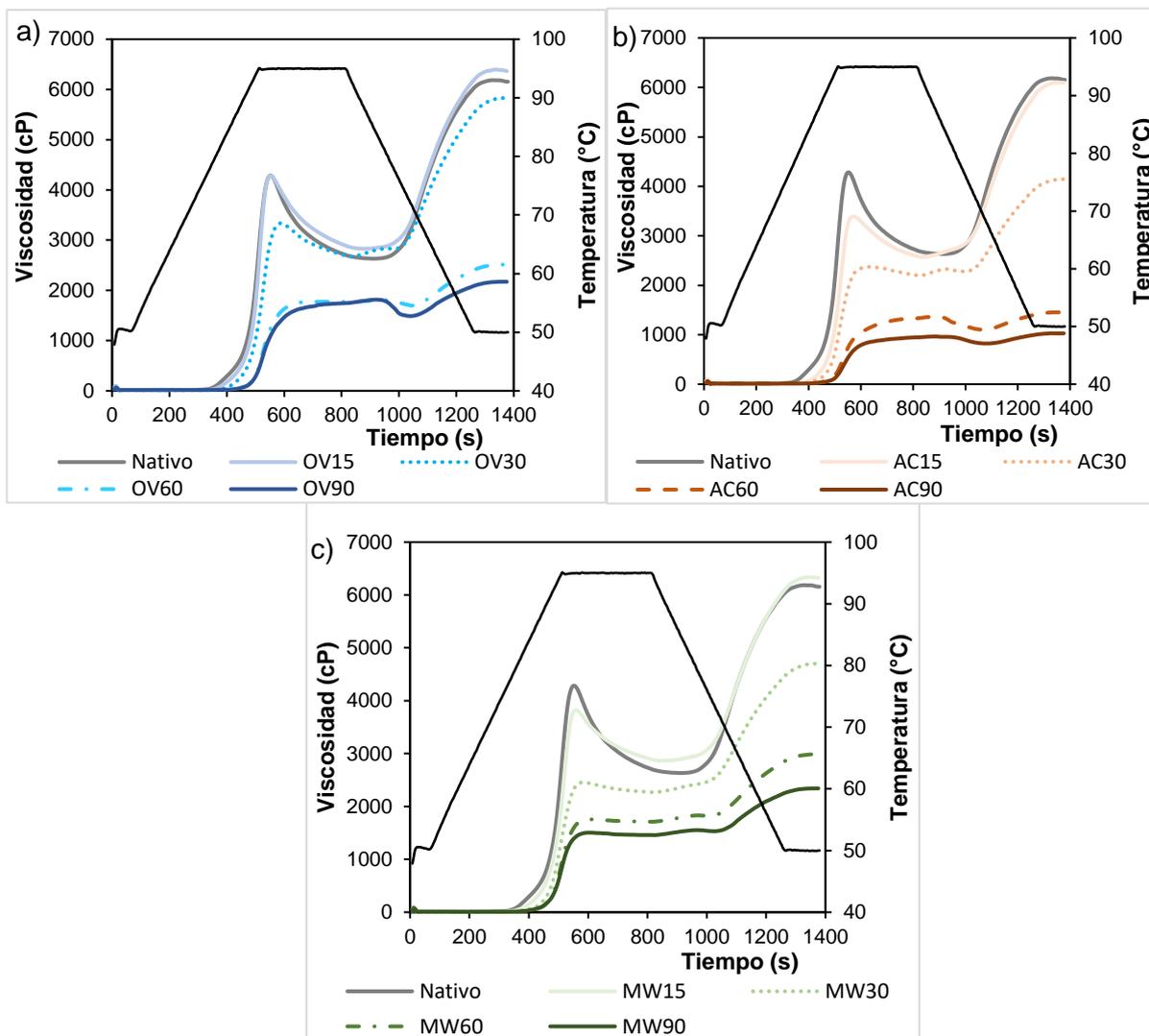
La Tabla 2 recoge los valores de las propiedades de empastado de la harina nativa y de las harinas tratadas en estufa, por autoclave y en microondas durante 15, 30, 60 y 90 min de tratamiento. En la Figura 5 se muestran los perfiles viscosimétricos de las harinas estudiadas. Como se puede observar en la Tabla 2, el tiempo de tratamiento (F2) y la interacción doble (tiempo\*tipo de tratamiento) (p-valor<0,001) mostraron un efecto significativo sobre todos los parámetros estudiados.

La temperatura de empastado (PT) aumentó significativamente, respecto al control, a medida que aumentó el tiempo de tratamiento, en los tres métodos estudiados. Con 60 min de tratamiento, el incremento en la temperatura de empastado fue de 11,2°C en el tratamiento con estufa, 12,8°C en el de autoclave y 9,1°C en microondas, respecto a la muestra control. Únicamente en los tratamientos con estufa y con autoclave, el aumentar el tiempo de tratamiento hasta 90 min, hizo que se incrementara de forma significativa la temperatura de empastado, alcanzando un valor de +14°C en autoclave. Una temperatura de empastado elevada se traduce como una mayor resistencia a la hinchazón y ruptura de los gránulos de almidón (García-Solaesa et al., 2021) lo que puede deberse a la aparición de interacciones amilosa-lípido, amilosa-amilopectina o amilosa-amilosa (Max et al., 2017). Comparando los tres tratamientos, los tratamientos con autoclave dieron lugar a temperaturas de empastado más altas, para todos los tiempos estudiados. La misma tendencia de aumento siguieron los valores del *Peak time*, observándose un retraso en la aparición del pico de viscosidad a medida que aumentó el tiempo de tratamiento.

Los demás parámetros evaluados en el RVA disminuyeron con el tiempo de tratamiento, a excepción del *breakdown*, el cual no siguió una tendencia uniforme. La viscosidad final y el *setback*, presentaron una disminución a tiempos largos de tratamiento. Los cambios en las propiedades de empastado del almidón tratado con HMT pueden deberse a las asociaciones de las cadenas en la región amorfa del gránulo así como a los cambios en la cristalinidad durante el tratamiento hidrotérmico (Zavareze & Dias, 2011).

La viscosidad máxima (PV) está relacionada con la propiedad funcional SP ya que el grado de lixiviación de la amilosa influye en la viscosidad máxima alcanzada (Ashwar et al., 2016). Comparando los tres tipos de tratamientos, el asistido con autoclave fue el que obtuvo valores de viscosidad de pico más bajos, siendo un 36% menores que los valores obtenidos con los tratamientos en estufa y autoclave a un tiempo de 90 minutos. El efecto más marcado en los valores de *Trough viscosity* se observó a un tiempo de 90 minutos en autoclave, el cual disminuyó un 68% respecto a la harina control. Cabe destacar que se observó un comportamiento similar en las harinas tratadas en estufa y

microondas con valores de *Trough viscosity* a 90 min un 47% y 43% más bajos, respectivamente, respecto a la harina control.



**Figura 5:** Curvas de empastado de la harina de arroz control y tratada mediante estufa (a), autoclave (b) y microondas (c) durante 15, 30, 60 y 90 minutos.

No se observó una tendencia clara en los valores de breakdown en función del tiempo de tratamiento, pero en todos los casos fueron menores que el valor que se obtuvo en la harina control, lo que indica una mayor estabilidad de la harina de arroz tratada. Comparando los diferentes tratamientos se observó que las harinas tratadas mediante radiación microondas durante largos periodos de tiempo (60 y 90 min) fueron las más estables (51 y 47 cP, respectivamente).

**Tabla 2:** Propiedades de empastado de las muestras de harina de arroz tratadas en estufa (OV), autoclave (AC) y microondas (MW).

Muestra	PT (°C)		Peak time		PV (cp)		TV (cp)		BV (cp)		FV (cp)		SV (cp)	
<b>Control</b>	79,4	a	9,15	a	4245	d	2590	c	1656	d	6046	d	3456	d
<b>OV15</b>	80,9	bA	9,3	aA	4190	dC	2742	dB	1448	cC	6238	dAB	3496	dA
<b>OV30</b>	85,6	cA	9,8	bA	3264	cB	2640	cdB	624	bC	5787	cC	3147	cC
<b>OV60</b>	90,6	dB	12,3	cB	1804	bB	1718	bB	86	aA	2594	bB	877	bB
<b>OV90</b>	91,4	eB	13,0	dB	1511	aB	1384	aB	127	aB	2024	aB	640	aB
<b>SE</b>	0,2		0,1		42		34		15		70		44	
<b>Control</b>	79,4	a	9,15	a	4245	e	2590	d	1656	d	6046	d	3456	c
<b>AC15</b>	85,4	bC	9,58	bB	3347	dA	2543	dA	804	cA	6103	dA	3560	cA
<b>AC30</b>	88,8	cB	10,72	cB	2290	cA	2159	cA	131	aA	3925	cA	1766	bA
<b>AC60</b>	92,2	dB	12,98	dC	1401	bA	1155	bA	246	bB	1556	bA	401	aA
<b>AC90</b>	93,3	eC	12,97	dB	965	aA	819	aA	146	aB	1025	aA	206	aA
<b>SE</b>	0,2		0,06		38		24		21		84		71	
<b>Control</b>	79,4	a	9,15	a	4245	e	2590	d	1656	d	6046	d	3456	d
<b>MW15</b>	82,7	bB	9,33	bA	3815	dB	2778	eB	1037	cB	6378	eB	3601	dA
<b>MW30</b>	86,4	cA	9,57	cA	2428	cA	2118	cA	310	bB	4860	cB	2742	cB
<b>MW60</b>	88,5	dA	10,00	dA	1782	bB	1732	bB	51	aA	3040	bC	1308	bC
<b>MW90</b>	88,5	dA	10,04	dA	1519	aB	1472	aB	47	aA	2358	aC	886	aC
<b>SE</b>	0,1		0,02		39		49		36		75		76	
<b>Análisis de varianza y significancia (p-valores)</b>														
<b>(F1)</b>	*		*		ns		ns		ns		ns		ns	
<b>(F2)</b>	***		***		***		***		***		***		***	
<b>(F1)x(F2)</b>	***		***		***		***		***		***		***	

PT: *pasting temperature*, PV: *peak viscosity*, TV: *trough viscosity*, BV: *breakdown*, FV: *final viscosity*, SV: *setback*, F1: tipo de tratamiento, F2: tiempo de tratamiento, SE: error estándar obtenido mediante el análisis estadístico ANOVA, ns: no significativo p-valor>0,05, \*: p-valor<0,05, \*\*: p-valor<0,01, \*\*\*: p-valor<0,001. Para un mismo tipo de tratamiento, los valores medios con letras minúsculas diferentes para un mismo parámetro indican diferencias significativas entre las medias (p<0,05). Las letras mayúsculas se utilizan para evaluar el efecto del tipo de tratamiento para un mismo tiempo de tratamiento; para cada parámetro, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre las medias (p<0,05).

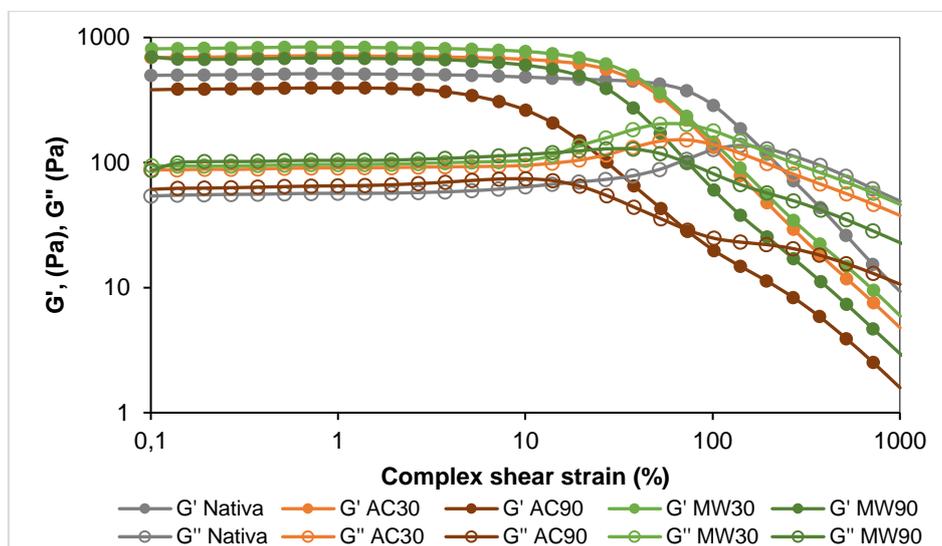
A tiempos cortos de tratamiento (15 min) no se observaron diferencias estadísticamente significativas en los valores de viscosidad final (FV) en las muestras tratadas tanto en estufa como en autoclave respecto a la muestra control. Sin embargo, sí que se observó un aumento de 5% en la muestra tratada 15 min en microondas, pasando de 6046 cP a 6378 cp. A partir de 30 min de tratamiento, la viscosidad final (FV) disminuyó progresivamente a medida que aumentó el tiempo de tratamiento para los tres métodos estudiados, siendo más acusado este descenso en las muestras tratadas con autoclave. El parámetro de *setback* (SV), que hace referencia a la retrogradación a corto plazo de la amilosa, siguió la misma tendencia que la viscosidad final en los tres tipos de tratamiento estudiados. A tiempos cortos de tratamiento (15 min) no se observaron diferencias significativas respecto al control, mientras que a 30, 60 y 90 min, los valores de SV fueron disminuyendo progresivamente a medida que aumentó el tiempo de tratamiento. La muestra tratada durante 90 minutos con autoclave fue la que menor *setback* presentó (206 cP) en comparación a la tratada en estufa o con microondas, lo que se traduce en una menor retrogradación. Este descenso en los valores de SV, puede deberse a un hinchamiento limitado de los gránulos de almidón, una disminución de la lixiviación de la amilosa y una reordenación deficiente de la amilosa durante el periodo de enfriado de la pasta (Ashwar et al., 2016).

Las propiedades de empastado también han sido estudiadas por otros autores (Liu et al., 2019; Sharma et al., 2015), quienes trataron harina de camote y harina de mijo mediante tratamientos HMT asistidos por estufa obteniendo resultados similares a los obtenidos en este ensayo. Ashwar et al. (2016) reportaron un aumento de la temperatura de empastado y del *peak time* en harina de arroz tratada mediante autoclave. García Solaesa et al. (2021) en tratamientos de harina de arroz con microondas observaron además una disminución del PV. Aunque no se observó un patrón claro, al igual que en el presente estudio, Iuga & Mironeasa (2019) reportaron una disminución del BV respecto a la harina control en harinas de arroz tratadas por microondas.

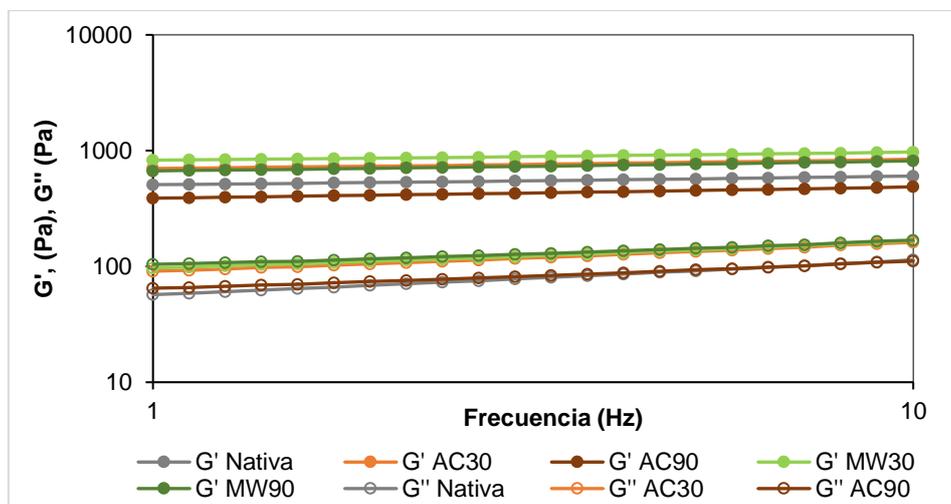
#### **4.4 COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LOS GELES**

Se realizaron ensayos reológicos a los geles obtenidos del ensayo de RVA. La Tabla 3 recoge los valores medios de los parámetros obtenidos de los barridos de deformación y de los barridos de frecuencias al ajustar las gráficas obtenidas a una ecuación potencial. Los valores de  $R^2$  (0.9965 a 0.9997) denotaron el buen ajuste de los valores experimentales a la Ley de la Potencia. El tiempo de tratamiento (F2) y la interacción doble (tipo de tratamiento x tiempo de tratamiento) mostraron un efecto significativo sobre todos los parámetros evaluados (p-valor<0,01). Sin embargo, el tipo de tratamiento (F1) únicamente tuvo un efecto significativo (p-valor<0,05) sobre el módulo elástico ( $G'1$ ). Las Figuras 6 y 7 muestran a modo de ejemplo, el barrido de deformación

(Figura 6) y Barrido de frecuencias (Figura 7) de la harina control y las harinas tratadas mediante autoclave y microondas durante 30 y 60 minutos. Estas curvas revelaron el comportamiento viscoelástico de los geles estudiados, con valores del módulo elástico ( $G'$ ) mayores que el módulo viscoso ( $G''$ ), con ligera dependencia de ambos módulos con la frecuencia.



**Figura 6:** Barridos de deformación de la harina de arroz control y las tratadas mediante tratamiento en autoclave y microondas durante 30 y 90 minutos. Los símbolos rellenos representan el módulo elástico ( $G'$ ) y los vacíos, el módulo viscoso ( $G''$ ).



**Figura 7:** Curvas del barrido de frecuencia de la harina de arroz control y las tratadas mediante tratamiento en autoclave y microondas 30 y 90 minutos. Los símbolos rellenos hacen referencia al módulo elástico ( $G'$ ) y los vacíos al módulo viscoso ( $G''$ ).

El esfuerzo máximo,  $\tau_{max}$ , que es capaz de soportar el gel antes de ser deformado, obtenido a partir del barrido de deformación en la región viscoelástica lineal, fue de 287 Pa para la muestra control. Este valor disminuyó significativamente con el tiempo de tratamiento para los tres métodos estudiados, lo que denota una menor resistencia a la deformación.

**Tabla 3:** Comportamiento reológico de los geles de las muestras de harina de arroz tratadas en estufa (OV), autoclave (AC) y microondas (MW).

Muestra	G' (Pa)		a		G'' (Pa)		b		(tanδ) <sub>1</sub>		c		τ <sub>max</sub> (Pa)		Crossover (Pa)	
<b>Control</b>	500	a	0,0735	a	56	a	0,300	d	0,112	a	0,226	d	287	e	338	c
<b>OV15</b>	548	bA	0,0740	aB	62,7	bA	0,288	cC	0,114	aB	0,214	cB	245	dB	331	cB
<b>OV30</b>	706	dA	0,0712	aA	80,9	cA	0,262	bB	0,115	aA	0,190	bB	229	cB	326	cC
<b>OV60</b>	635	dB	0,0847	bB	92,3	dB	0,228	aA	0,145	bB	0,143	aA	75	bB	103	bB
<b>OV90</b>	582	cB	0,0899	cAB	90,2	dB	0,222	aB	0,155	cA	0,132	aB	51	aB	82	aB
<b>SE</b>	9		0,0009		0,9		0,003		0,001		0,003		2		4	
<b>Control</b>	500	b	0,0735	b	56	a	0,300	d	0,112	a	0,226	d	287	d	338	d
<b>AC15</b>	668	dC	0,0691	aA	73	cC	0,265	cA	0,110	aA	0,196	cA	220	cA	304	cA
<b>AC30</b>	727	cAB	0,0771	cB	92	eAB	0,242	bA	0,127	bB	0,165	bA	137	bA	179	bA
<b>AC60</b>	511	bA	0,0935	dC	84	dA	0,219	aA	0,164	cC	0,125	aA	42	aA	52	aA
<b>AC90</b>	404	aA	0,0943	dB	67	bA	0,228	aB	0,165	cB	0,134	aB	19	aA	31	aA
<b>SE</b>	6		0,0006		1		0,003		0,0009		0,003		9		7	
<b>Control</b>	500	a	0,0735	b	56	a	0,300	e	0,112	a	0,226	e	287	d	338	e
<b>MW15</b>	613	bB	0,0697	aA	68	bB	0,270	dA	0,111	aA	0,200	dA	267	cC	322	dAB
<b>MW30</b>	813	cB	0,0710	aA	96	cB	0,241	cA	0,118	bA	0,170	cA	182	bAB	246	cB
<b>MW60</b>	746	cC	0,0777	cA	100	cC	0,217	bA	0,133	cA	0,139	bA	91	aC	136	bC
<b>MW90</b>	671	bC	0,0866	dA	102	cC	0,208	aA	0,151	dA	0,122	aA	80	aC	104	aC
<b>SE</b>	19		0,0006		2		0,002		0,001		0,002		4		3	

**Análisis de varianza y significancia (p-valores)**

<b>(F1)</b>	*	ns														
<b>(F2)</b>	**	***	**	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
<b>(F1)x(F2)</b>	***	***	***	**	***	**	***	**	***	**	***	**	***	**	***	***

G'1: módulo elástico, G''1: módulo viscoso, a-b-c: exponentes de ajustes de G', G'' y Tan(δ)<sub>1</sub>, Tan(δ)<sub>1</sub>: coeficiente de ajuste que representa la tangente de pérdida a 1Hz, τ<sub>max</sub> : esfuerzo máximo que puede soportar el gel antes de la ruptura de su estructura, F1: tipo de tratamiento, F2: tiempo de tratamiento, SE: error estándar obtenido mediante el análisis estadístico ANOVA, ns: no significativo p-valor>0,05, \*: p-valor<0,05, \*\*: p-valor<0,01, \*\*\*: p-valor<0,001. Para un mismo tipo de tratamiento, los valores medios con letras minúsculas diferentes para un mismo parámetro indican diferencias significativas entre las medias (p<0,05). Las letras mayúsculas se utilizan para evaluar el efecto del tipo de tratamiento para un mismo tiempo de tratamiento; para cada parámetro, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre las medias (p<0,05).

Fue en las muestras tratadas mediante autoclave en las que se obtuvo un menor esfuerzo para todos los tiempos ensayados, llegando a valores de 19 Pa con 90 minutos de tratamiento. Zavareze & Dias (2011) indicaron que la fuerza del gel esta influenciada por la capacidad que presenta el almidón de unirse a moléculas de agua a través de puentes de hidrógeno.

El valor de *crossover* (punto en el que los módulos se igualan  $G'_1 = G''_1$  y el valor de  $(\tan\delta)_1$  es igual a 1), obtenido también a partir del barrido de deformación, hace referencia al esfuerzo a partir del cual la estructura del gel pasa de ser predominantemente elástica ( $G' > G''$ ) a predominantemente viscosa ( $G'' > G'$ ). Este valor disminuyó con el tiempo de tratamiento, lo que demuestra menor estabilidad de la estructura del gel, ya que es necesario menor esfuerzo para cambiar la predominancia de los módulos. Con 90 min de tratamiento, las muestras tratadas con autoclave fueron las que menores valores de *crossover* mostraron (31 Pa), seguido de los tratamientos con estufa (82 Pa) y microondas (104 Pa), lo que representó un 84%, 76% y 69% menos, respectivamente, que el valor obtenido para la harina control.

De forma general, los tratamientos estudiados aumentaron significativamente la componente elástica y viscosa de los geles y este efecto fue más marcado para los tratamientos con microondas. Con tratamientos cortos de 15 min ya se observó un aumento significativo de ambos módulos en los tres tipos de tratamientos, denotando una mayor consistencia del gel. Esta consistencia siguió aumentando en tratamientos de 30 min, con módulos elásticos que aumentaron un 40-45% en tratamientos en estufa y autoclave y 63% en microondas, respecto a la harina control. Sin embargo, un aumento en el tiempo de tratamiento (60 y 90min) produjo una disminución de dicho módulo, llegando incluso a valores por debajo de la harina control, como ocurrió en el tratamiento de 90 min con autoclave.

Similar fue la tendencia observada en el módulo viscoso ( $G''$ ) para los tratamientos con autoclave. Por el contrario, los módulos viscosos de las harinas tratadas con estufa y con microondas, se incrementaron a medida que aumentó el tiempo de tratamiento, con valores un 83% más altos (tratamiento de 90 min en microondas) que los obtenidos para la muestra control. Estos resultados concuerdan con los reportados por Molavi y Razavi (2018) quienes observaron un aumento de  $G'$  tras el tratamiento HMT en almidón de bellota, aunque no sugieren los mismos resultados para la componente viscosa ya que estos autores recogieron una disminución de los valores de  $G''$  tras el tratamiento.

En todos los tratamientos estudiados, los valores del exponente  $a$  denotaron mayor dependencia del módulo elástico con la frecuencia a mayores tiempos de tratamiento, 60 y 90 min, mientras que los valores del parámetro  $b$ , fueron disminuyendo a medida que aumentó el tiempo de tratamiento.

Liao et al. (2019) reportaron un aumento en ambos módulos ( $G'_1$  y  $G''_1$ ), en geles de almidón de batata tratados mediante HMT en un horno convencional. Estos autores lo relacionaron con la disminución de la capacidad de hinchamiento y la disminución de la lixiviación de la amilosa que por ende aumenta la rigidez del almidón (Molavi & Razavi, 2018). Por el contrario, Zhang et al. (2019) estudiaron el comportamiento reológico de geles de almidón de lycoris tratado por microondas y estufa, llegando a una conclusión opuesta a la presentada en este ensayo ya que los valores de ambos módulos se vieron disminuidos como consecuencia del debilitamiento de las estructuras del gel tras el tratamiento. Liu et al. (2016) llegaron a conclusiones similares tras el tratamiento asistido en estufa cuya harina de partida era de tapioca.

Los valores de  $(\tan\delta)_1$  siempre fueron menores a 1, lo que indica la predominancia de la componente elástica en los geles. Valores similares se reportaron en el estudio llevado a cabo por Zhang et al. (2019). En general, con tratamientos cortos no se observaron diferencias significativas en los valores de  $(\tan\delta)_1$  con respecto a la harina control. Sin embargo, estos valores, aumentaron a tiempos de tratamiento largos (60 y 90 min) para todos los métodos estudiados. Valores más altos de la tangente de pérdida se obtuvieron con los tratamientos llevados a cabo en autoclave.

En todos los tratamientos estudiados, se observó una disminución de los valores del parámetro  $c$  al aumentar el tiempo de tratamiento. Liao et al. (2019) concluyeron una disminución de dichos valores tras un tratamiento HMT en estufa aplicado durante 1 hora, y lo relacionaron con un efecto complejo sobre la estructura del almidón durante estos tratamientos hidrotérmicos.

#### **4.5 ANÁLISIS DE COLOR**

En la Tabla 4 se presentan los valores medios obtenidos a través del estudio de colorimetría con el fin de evaluar el cambio de color de las harinas tratadas. El tiempo de tratamiento (F2) y su doble interacción con el tipo de tratamiento mostraron un efecto significativo ( $p$ -valor $<0,001$ ) sobre todos los parámetros de CIELAB medidos, así como sobre la diferencia de color con el control. El factor tipo de tratamiento (F1) también mostró un efecto significativo ( $p<0.05$ ) sobre todos los parámetros de color estudiados a excepción del parámetro  $h$ .

**Tabla 4:** Análisis de color de las muestras de harina de arroz tratadas en estufa (OV), autoclave (AC) y microondas (MW).

Muestra	L*	a*	b*	$\Delta E$	C*	h
<b>Control</b>	93,8 d	0,4 a	6,3 a	- -	6,3 a	86,1 e
<b>OV15</b>	91,7 cB	1,0 bB	6,7 aA	2,2 aB	6,7 abA	81,2 dA
<b>OV30</b>	92,0 cB	0,9 bA	7,1 bA	2,0 aA	7,2 bA	82,5 cB
<b>OV60</b>	89,8 bB	2,0 cA	10,8 cA	6,3 bA	11,0 cA	79,6 bB
<b>OV90</b>	87,7 aC	3,8 dA	13,0 dA	9,7 cA	13,6 dA	73,6 aC
<b>SE</b>	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,5
<b>Control</b>	93,8 d	0,4 a	6,3 a	- -	6,3 a	86,1 e
<b>AC15</b>	91,2 cA	1,0 bB	7,1 bB	2,8 aC	7,2 bB	82,0 cB
<b>AC30</b>	91,7 cB	0,9 bA	8,9 cB	3,4 aB	8,9 cB	84,0 dB
<b>AC60</b>	88,9 bA	2,8 cB	12,5 dB	8,3 bB	12,8 dB	77,5 bA
<b>AC90</b>	84,2 aA	5,6 dC	14,9 eB	13,9 cC	16,0 eB	69,5 aA
<b>SE</b>	0,4	0,2	0,3	0,3	0,3	0,6
<b>Control</b>	93,8 e	0,42 a	6,32 a	- -	6,33 a	86,1 e
<b>MW15</b>	92,6 dC	0,84 bA	7,41 bC	1,7 aA	7,45 bC	83,6 dC
<b>MW30</b>	90,3 cA	1,90 cB	9,60 cC	5,1 bC	9,79 cC	78,8 cA
<b>MW60</b>	89,1 bAB	2,73 dB	12,32 dB	8,0 cB	12,62 dB	77,5 bA
<b>MW90</b>	86,6 aB	4,84 eB	14,50 eB	11,8 dB	15,29 eB	71,5 aB
<b>SE</b>	0,1	0,04	0,05	0,1	0,05	0,3
<b>Análisis de varianza y significancia (p-valores)</b>						
<b>(F1)</b>	*	*	**	**	*	ns
<b>(F2)</b>	***	***	***	***	***	***
<b>(F1)*(F2)</b>	***	***	***	***	***	***

L, a\*,b\*: coordenadas de color del sistema CIELAB, C\*: saturación, h: tono,  $\Delta E$ : diferencia de colores respecto a la harina control, F1: tipo de tratamiento, F2: tiempo de tratamiento, SE: error estándar obtenido mediante el análisis estadístico ANOVA, ns: no significativo p-valor>0,05, \*: p-valor<0,05, \*\*: p-valor<0,01, \*\*\*: p-valor<0,001. Para un mismo tipo de tratamiento, los valores medios con letras minúsculas diferentes para un mismo parámetro indican diferencias significativas entre las medias (p<0,05). Las letras mayúsculas se utilizan para evaluar el efecto del tipo de tratamiento para un mismo tiempo de tratamiento; para cada parámetro, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre las medias (p<0,05).

L\*, que es la coordenada CIELAB relacionada con la luminosidad, disminuyó significativamente en el caso de las harinas tratadas a medida que aumentó el tiempo de tratamiento, respecto a la harina control. Sin embargo, entre los tratamientos con estufa a 15 y 30 min no se observaron diferencias significativas, al igual que ocurrió con los tratamientos en autoclave a esos mismos tiempos de tratamiento. A tiempos largos de tratamiento (90 min), los llevados a cabo con autoclave fueron los que experimentaron mayor descenso en este parámetro, siendo un 10% menor que la harina control. Es decir, por lo general las muestras de harina de arroz que han sufrido un tratamiento más dilatado fueron más oscuras.

Los valores de a\* (verde (-) a rojo (+)) y b\* (de azul (-) a amarillo (+)) en todas las muestras fueron positivos, y como se puede observar en la Figura 8 se encuentran en el primer cuadrante del diagrama cromático. Ambos parámetros aumentaron con el tiempo de tratamiento. Para el parámetro a\* tanto en estufa como autoclave a tiempos cortos (15-30 min) no se observaron diferencias significativas. Comparando los

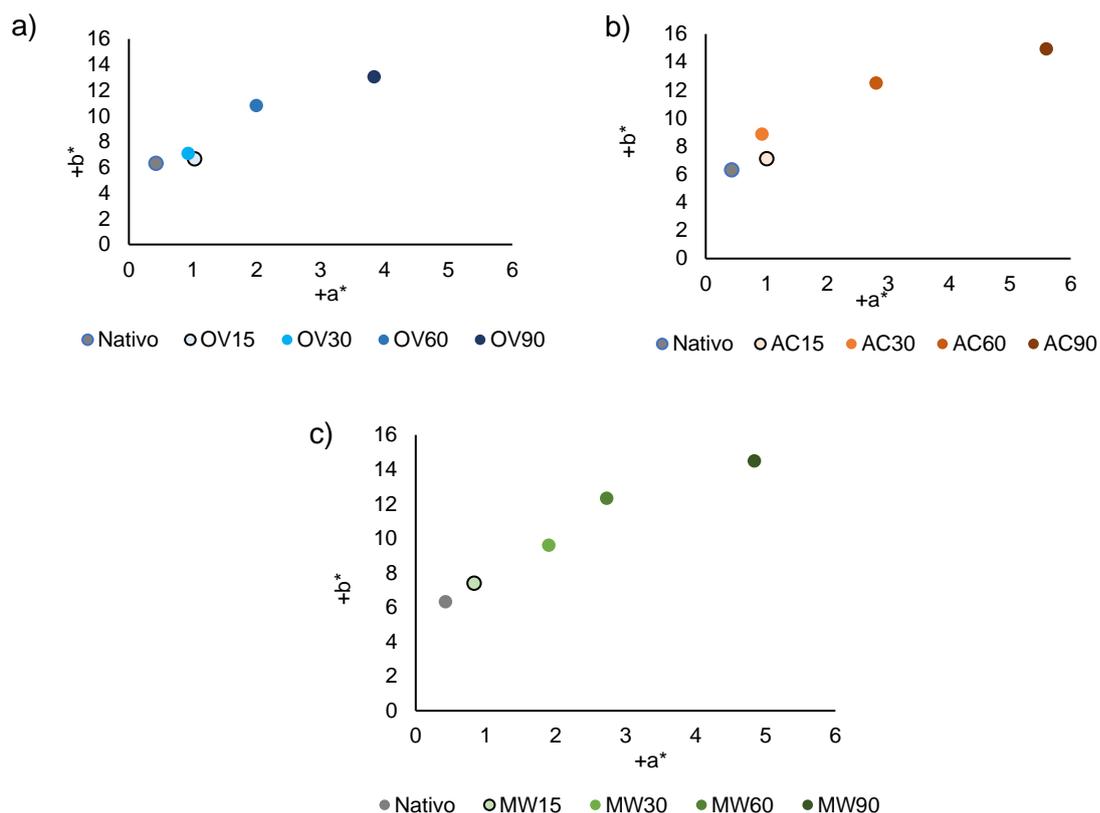
diferentes métodos de tratamiento, se observó que a tiempos prolongados (60 y 90 min) las muestras tratadas por autoclave y microondas fueron similares (oscilaron entre 12,5-12,3 y 14,9-14,5, respectivamente).

Wang & Johnson (2001) estudiaron el efecto del HMT asistido con autoclave en harina de soja llegando a conclusiones similares a las presentadas en este trabajo, ya que el color de todas las muestras fue más oscuro, y los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  aumentaron tras el tratamiento. Otro estudio a partir de harina de yuca tuvo como objetivo establecer diferencias entre las muestras tratadas con microondas y autoclave (Khurshida & Deka, 2022). Estos autores reportaron que tanto  $a^*$  como  $b^*$  aumentaron con los tratamientos, obteniendo mayores valores en las muestras tratadas con microondas. Resultados similares fueron reportados en harina de arroz tratada por autoclave. Según Ashwar et al. (2016) los valores de  $a^*$  y  $b^*$  aumentaron con el tratamiento mientras que los valores de luminosidad disminuyeron. Estos autores achacaron estos cambios a la formación de pigmentos marrones durante las reacciones de Maillard debido a las altas temperaturas alcanzadas en los tratamientos asistidos con autoclave (Ashwar et al., 2016).

La saturación ( $C^*$ ) aumentó con el tiempo de tratamiento, alcanzando los valores más altos a los 90 min para los tres métodos estudiados. El porcentaje de aumento para esas muestras tratadas por estufa, autoclave y microondas fue 54%, 61% y 59% respectivamente, respecto a la harina control.

Por el contrario, el tono disminuyó con el tiempo de tratamiento, siendo este descenso significativo incluso a tiempos cortos (15 min). El descenso más acusado, que se traduce en tonos más rojizos, se produjo en las muestras tratadas durante 90 min con autoclave, que obtuvieron un valor de  $h$  de 69,5 frente a 71,5 en tratamientos en microondas y 73,6 en los de estufa.

La diferencia de color de las harinas tratadas respecto a la harina control aumenta con el tiempo de tratamiento en todos los casos, alcanzando los mayores valores (13,9) en el tratamiento de autoclave a 90 minutos. El porcentaje de aumento, ordenado de mayor a menor fue el siguiente: 85,5% en microondas, 79,8% en autoclave, y por último 77,3% en estufa.



**Figura 8:** Representación de los parámetros cromática  $a^*$  y  $b^*$  de las muestras de harina de arroz control y tratada mediante tratamiento en microondas (a), autoclave (b) y microondas (c) durante 15, 30, 60 y 90 minutos.

## 5 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio han permitido concluir que los diferentes tratamientos HMT (estufa, autoclave y microondas) aplicados a diferentes tiempos (15, 30, 60 y 90 minutos) tuvieron un efecto significativo en las propiedades funcionales, de empastado, en el comportamiento reológico y en el color en la harina de arroz cuya humedad inicial fue del 25%. Cabe destacar que estas modificaciones no siguieron la misma tendencia en todas las propiedades estudiadas.

Los valores de WAC y OAC de las muestras tratadas mediante HMT asistido por autoclave y estufa durante tiempos de hasta 60 min se vieron aumentados significativamente, lo que no ocurrió en el tratamiento por microondas. Los valores de WAI y SP, disminuyeron con el tratamiento, siendo el microondas el que mayor efecto presentó. El parámetro WSI se vio aumentado con el tiempo de tratamiento a excepción de la harina tratada durante 15 minutos en estufa.

En relación con las propiedades de empastado, de forma general, todos los parámetros se vieron disminuidos a excepción de la temperatura de empastado y el *Peak time*. El método basado en autoclave presentó valores de PT más elevados. Para el resto de las propiedades, a medida que se aumentó el tiempo de tratamiento las diferencias que se

encontraron en las curvas de empastado respecto a la harina de arroz control aumentaron de manera significativa. Los geles formados en el ensayo de RVA, de forma general en los tres tratamientos HMT, aumentaron de forma significativa la componente elástica y viscosa con el tiempo de tratamiento, siendo más marcado en los tratamientos asistidos mediante radiación microondas.

Se observaron efectos significativos en el color de las muestras tratadas respecto a la harina de arroz control. Las muestras tratadas fueron más oscuras, lo que aumentó a su vez con el tiempo de tratamiento, siendo los tratamientos más dilatados las que presentaron mayor color oscuro. La saturación presentó los valores más altos a los 90 minutos para los tres métodos estudiados. Por el contrario, el tono disminuyó, siendo significativo incluso a tiempos cortos (15 min). El descenso más acusado, que se traduce en tonos más rojizos, se produjo en las muestras tratadas durante 90 min con autoclave. Como conclusión final, en general, según los resultados obtenidos, los tratamientos con microondas y autoclave fueron los que modificaron en mayor medida las propiedades tecno-funcionales de las harinas y el tiempo de tratamiento aplicado, resultó ser un factor clave.

## 6 AGRADECIMIENTOS

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

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- AACC. (2010). Approved methods of Analysis, 11th Ed. Method 44–19. (Cereals & Grains Association (ed.)). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1094/AACCIntMethod-44-19.01>
- Acevedo, M., Castillo, W., & Belmonte, U. (2006). Origen, evolución y diversidad del arroz. *Agronomía Tropical*, 56(2), 1-17. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0002-192X2006000200001](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2006000200001)
- Aguilera, R. (2014). *Procesamiento del arroz*. República Bolivariana de Venezuela. [https://www.academia.edu/10199763/PROCESAMIENTO\\_DEL\\_ARROZ](https://www.academia.edu/10199763/PROCESAMIENTO_DEL_ARROZ)
- Almaiman, S. A., Albadr, N. A., Alsulaim, S., Alhuthayli, H. F., Osman, M. A., & Hassan, A. B. (2021). Effects of microwave heat treatment on fungal growth, functional properties, total phenolic content, and antioxidant activity of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) grain. *Food Chemistry*, 348, 128979. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.128979>
- Ashwar, B. A., Gani, A., Wani, I. A., Shah, A., Masoodi, F. A., & Saxena, D. C. (2016). Production of resistant starch from rice by dual autoclaving- retrogradation treatment : Invitro digestibility , thermal and structural characterization. *Food hydrocolloids*, 56, 108-117. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.12.004>
- Asranudin, Holilah, Kholidha Syarifin, A. N., Setyo Purnomo, A., Ansharullah, & Fudholi, A. (2021). The effect of heat moisture treatment on crystallinity and physicochemical-digestibility properties of purple yam flour. *Food Hydrocolloids*, 120, 106889. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106889>
- Ávila Marqués, Á. (2021). El consumo de arroz crece en España y en el mundo. *El consumo de arroz crece en España y en el mundo*, 1, 113-116.

- <https://www.mercasa.es/media/publicaciones/284/14-El consumo de arroz crece en España y en el mundo.pdf>
- Chaiwanichsiri, S. (2016). Effects of Heat-Moisture Treatment on Molecular Interactions and Physicochemical Properties of Tapioca Starch. *MOJ Food Processing & Technology*, 3(3). <https://doi.org/10.15406/mojfpt.2016.03.00072>
- Chakraborty, I., Sib, P. N., Mal, S., Paul, U. C., Rahman, H., & Mazumder, N. (2022). An Insight into the Gelatinization Properties Influencing the Modified Starches Used in Food Industry: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 15, 1195-1223. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02761-z>
- Falade, K. O., & Ibang-Bamijoko, Blessing Ayetigbo, O. E. (2019). Comparing properties of starch and flour of yellow-flesh cassava cultivars and effects of modifications on properties of their starch. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 2581-2593. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00178-5>
- García Pacheco, D. Cabrera Mercado, J. Ballestas Santos, M. Campo Arrieta. "Efecto de diferentes tratamientos térmicos sobre las propiedades tecnológicas de la harina de frijol blanco (*Phaseolus Lunatus* L.) y la determinación de su potencial uso agroalimentario", INGE CUC, vol. 15, no. 2, pp. 132-143, 2019. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.15.2.2019.13>.
- García Solaesa, Á., Villanueva, M., Muñoz, J. M., & Ronda, F. (2021). Dry-heat treatment vs. heat-moisture treatment assisted by microwave radiation: Techno-functional and rheological modifications of rice flour. *Lwt*, 141, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110851>
- Guiñazú Fernández, C., Albors Sorolla, A. M., & Martín Esparza, E. (2020). *Harinas Sin Gluten De Origen Vegetal Para El Desarrollo De Productos Alimentarios. Aplicaciones, Propiedades Nutricionales Y Características Funcionales*. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.
- Harinas Climent. (s. f.). *Aplicaciones de la harina de arroz*. Recuperado 4 de junio de 2022, de <https://www.harinadearrozcliment.com/aplicaciones/>
- Iuga, M., & Mironeasa, S. (2020). A review of the hydrothermal treatments impact on starch based systems properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(22), 3890-3915. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1664978>
- Khurshida, S., & Deka, S. C. (2022). Application of microwave and hydrothermal treatments for modification of cassava starch of Manipur region, India and development of cookies. *Journal of Food Science and Technology*, 59(1), 344-354. <https://doi.org/10.1007/S13197-021-05020-9>
- Liao, L., Liu, H., Gan, Z., & Wu, W. (2019). Structural properties of sweet potato starch and its vermicelli quality as affected by heat-moisture treatment. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 1122-1133. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1626418>
- Liu, X., J. H. Wu, D. Z. Mao, Y. J. Yang, and Z. W. Wang. 2016. The impact of heat-moisture treatment on the molecular structure and physicochemical properties of coix seeds starches. *Starch- Stärke* 68: 1-13
- Max, W., Silva, F., Biduski, B., Oliveira, K., Zanella, V., Fernanda, J., Levien, N., Renato, A., & Dias, G. (2017). Starch digestibility and molecular weight distribution of proteins in rice grains subjected to heat-moisture treatment. *Food Chemistry*, 219, 260-267. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.134>
- Ministerio de agricultura pesca y alimentación. (2017). *Arroz*. Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. <https://www.mapa.gob.es/en/agricultura/temas/producciones-agricolas/cultivos-herbaceos/arroz/>
- Molavi, H., & Razavi, S. M. A. (2018). Dynamic Rheological and Textural Properties of Acorn (*Quercus brantii* Lindle.) Starch: Effect of Single and Dual Hydrothermal Modifications. *Starch Journal*, 70, 1-8. <https://doi.org/10.1002/star.201800086>
- Olmos, S. (2007). Apunte de morfología, fenología, ecofisiología, y mejoramiento genético del arroz. En *Facultad de Ciencias Agrarias*.
- Pincioli, M. (2010). Proteínas de arroz. Propiedades estructurales y funcionales. En *Proteínas de arroz propiedades estructurales y funcionales*. [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1828/Documento\\_completo\\_.pdf?sequence=3&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1828/Documento_completo_.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Reque Díaz, J. D. (2007). *Estudio de pre-factibilidad para la fabricación de harina de arroz y su utilización en panificación*.
- Ronda, F., Villanueva, M., & Collar, C. (2014). Influence of acidification on dough viscoelasticity of gluten-free rice starch-based dough matrices enriched with exogenous protein. *LWT - Food Science and Technology*, 59(1), 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.05.052>

- Sánchez, H. D., González, R. J., Osella, C. A., Torres, R. L., & de la Torre, M. A. G. (2009). ELABORACIÓN DE PAN SIN GLUTEN CON HARINAS DE ARROZ EXTRUDIDAS  
ELABORATION OF BREAD WITHOUT GLUTEN FROM EXTRUDED RICE FLOURS. *Journal of Food*, 6(2), 109-116. <https://doi.org/10.1080/11358120809487635>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.129>
- Villanueva, M., De Lamo, B., Harasym, J., & Ronda, F. (2018a). Microwave radiation and protein addition modulate hydration, pasting and gel rheological characteristics of rice and potato starches. *Carbohydrate Polymers*, 201, 374-381. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.08.052>
- Villanueva, M., Harasym, J., Muñoz, J. M., & Ronda, F. (2018b). Microwave absorption capacity of rice flour. Impact of the radiation on rice flour microstructure, thermal and viscometric properties. *Journal of Food Engineering*, 224, 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.030>
- Zavareze, E., & Dias, A. (2011). Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review. *Carbohydrate Polymers*, 83(2), 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.064>
- Zhang, F., Zhang, Y. Y., Thakur, K., Zhang, J. G., & Wei, Z. J. (2019). Structural and physicochemical characteristics of lycoris starch treated with different physical methods. *Food Chemistry*, 275(June 2018), 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.079>
- Zheng, M., Xiao, Y., Yang, S., Liu, H., Liu, M., Yaqoob, S., Xu, X., & Liu, J. (2020). Effects of heat – moisture , autoclaving , and microwave treatments on physicochemical properties of proso millet starch. *Food Science & Nutrition*, 0(0), 1-9. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1295>
- Wang, C., & Johnson, L. A. (2001). Functional Properties of Hydrothermally Cooked Soy Protein Products. En *Press 189 JAOCS* (Vol. 78, Número 2). <https://doi.org/10.1007/s11746-001-0242->