



## Hidratación de granos asistida con ultrasonido y su efecto en los almidones: Una revisión

Ultrasound-assisted grain hydration and its effect on starches: A review

Gilmer Ponce-Quispe<sup>1</sup>; Raúl Siche<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II, s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

ORCID del autor:

G. Ponce-Quispe: <https://orcid.org/0000-0002-0517-1664>

R. Siche: <https://orcid.org/0000-0003-3500-4928>

### RESUMEN

En la hidratación de granos se busca elaborar enfoques novedosos para disminuir el tiempo de la cinética y obtener mejores propiedades aprovechando el tiempo para incorporar nutrientes. Esta revisión busca dar a conocer el potencial del ultrasonido en la hidratación de semillas y su efecto en las propiedades de los almidones. Se ha encontrado que el ultrasonido acelera el proceso de hidratación y germinación en los granos sin alterar las propiedades del almidón, la extracción de alcaloides, reduce el tiempo de cocción con sulfato ferroso, pero a altas temperaturas dificulta el efecto del ultrasonido. Adicionando bicarbonato de sodio se acelera la cinética de ablandamiento, pero se retrasa el proceso de hidratación. En parámetros de calidad la zonificación y tratamientos térmicos provoca un aumento en el tamaño de los gránulos y mejora la tasa de incorporación del agua obteniéndose mejores características aptas para ser utilizadas en la industria. Futuros estudios podrían utilizar otros nutrientes o soluciones de sales en el proceso de hidratación como bisulfato sódico (NaHSO<sub>4</sub>), bisulfito sódico (NaHSO<sub>3</sub>) y fumarato ferroso (C<sub>4</sub>H<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub>), así como investigar otros granos como garbanzos, lentejas y frejol reventón y granos andinos.

**Palabras clave:** sonicación; humidificación; fécula; remojo; granos secos.

### ABSTRACT

In the hydration of grains, it is sought to develop novel approaches to reduce the kinetic time and obtain better properties by taking advantage of the time to incorporate nutrients. This review seeks to publicize the potential of ultrasound in seed hydration and its effect on the properties of starches. It has been found that ultrasound accelerates the hydration and germination process in the grains without altering the properties of starch, and the extraction of alkaloids, it reduces the cooking time with ferrous sulfate, but at high temperatures, it hinders the effect of ultrasound. Adding sodium bicarbonate accelerates the softening kinetics, but slows down the hydration process. In quality parameters, zoning and thermal treatments cause an increase in the size of the granules and improve the rate of incorporation of water, obtaining better characteristics suitable for use in industry. Future studies could use other nutrients or salt solutions in the hydration process such as sodium bisulfate (NaHSO<sub>4</sub>), sodium bisulfite (NaHSO<sub>3</sub>) and ferrous fumarate (C<sub>4</sub>H<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub>), as well as investigate other grains such as chickpeas, lentils and popping beans and Andean grains.

**Keywords:** sonication; humidification; starch; soaking; dry beans.

## 1. Introducción

El punto de partida de esta revisión fue un análisis de clusterización de las palabras clave citadas en los documentos indizados en Scopus respecto a la aplicación del ultrasonido en la hidratación de granos y su efecto en el almidón (Figura 1).

El cluster de color azul (términos centrales “humedad”, “hidratación” y “ultrasonido”) concentra estudios sobre cinética de la hidratación asistida con ultrasonido.

El cluster de color rojo (término central “almidón”) asociado a documentos que estudian los efectos del ultrasonido en las diferentes propiedades físicas, químicas, térmicas y reológicas de los almidones.

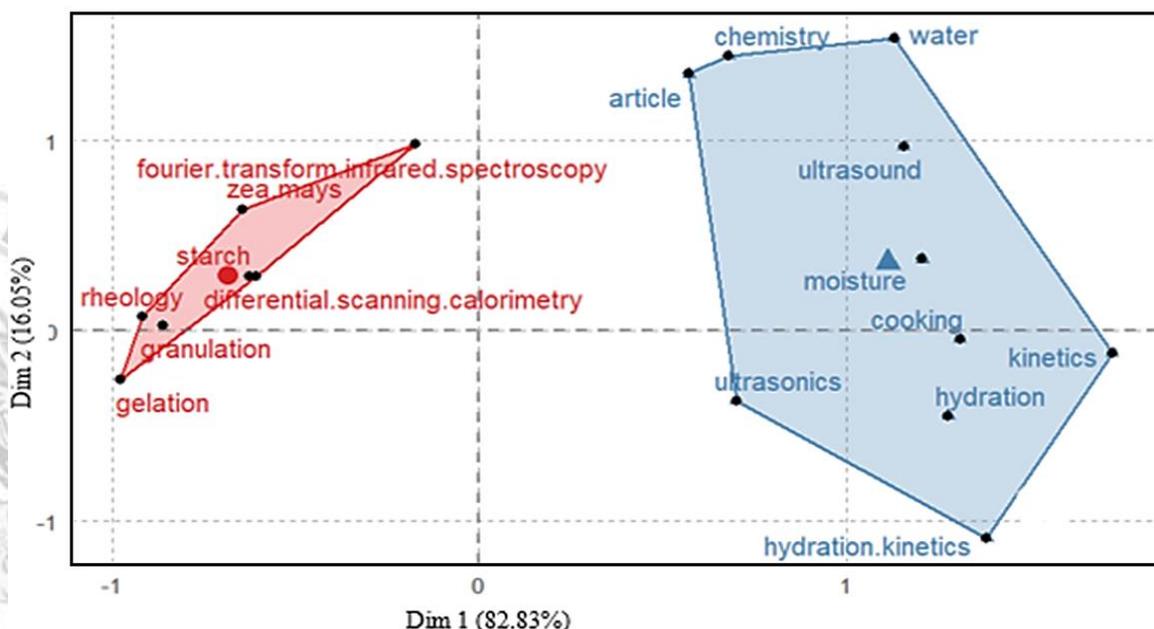
El ultrasonido en el procesamiento de alimentos es una tecnología innovadora, siendo aplicable a muchos procesos como la cristalización, homogeneización, extracción, hidratación entre otras técnicas que implican exposición a ultrasonido (Rahman & Lamsal, 2021) y que se ven afectados en parte por el fenómeno de cavitación (Singla & Sit, 2021), alterando las propiedades estructurales, funcionales y reológicas de los almidones (Golkar et al., 2021; Wang et al., 2022). Reduce el tiempo del proceso de hidratación provocando la aceleración de la germinación de los granos. No cambia ni la estructura ni las propiedades de pegajosidad del almidón, pero si incrementa la viscosidad aparente (Miano et al., 2016).

Por otro lado, el almidón, como uno de los componentes más importantes de los granos, se

compone de amilosa y amilopectina (BeMiller, 2018), de las cuales dependen las características intrínsecas del almidón (Baldwin, 2001; Park et al., 2011).

El almidón está presente como gránulos discretos que se hinchan por encima de la temperatura de gelatinización (Evans & Haisman, 1980), como son muy frágiles al mantenerse a esas temperaturas comienzan a fragmentarse y variando su viscosidad (Yang et al., 2015). La velocidad, el grado de hinchamiento y rotura de los gránulos de almidón dependen del tratamiento termomecánico al que se somete el almidón (Briffaz et al., 2012; Lagarrigue et al., 2008; Nayouf et al., 2003). Las propiedades reológicas dependen de la concentración de partículas sólidas, volumen, tamaño, fuerza y la viscosidad de la fase líquida continua (Stickel & Powell, 2005; Choi & Yoo, 2009). La espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR), calcula las interacciones distinguiendo las bandas representativas de los grupos químicos (Kizil et al., 2002), tanto es así que ha sido utilizado en biopolímeros (Chang et al., 2020), polioles (Pourfarzad et al., 2018), inulina (Pourfarzad et al., 2015) y en la retrogradación de la amilosa y la amilopectina (Liu et al., 2011; Soler et al., 2020).

Por el interés por conocer más sobre este tema, el objetivo de esta revisión fue recopilar los estudios más importantes donde se ha utilizado la tecnología de ultrasonido en la deshidratación de granos, así como recopilar información sobre el efecto en las propiedades de los almidones.



**Figura 1.** Principales conceptos según Análisis de Correspondencia Múltiple (MCA) a partir de las palabras clave de los estudios tomados en cuenta. Información obtenida de la base de datos Scopus y analizada en Bibliometrix.

## 2. Fundamentos del ultrasonido en la hidratación de granos y almidones

Para hidratar el mijano africano Yadav et al. (2021) utilizaron una amplitud de ultrasonido al 66%, un tiempo de tratamiento de 26 min y una relación grano/agua de 1: 3. Vásquez et al. (2021) estudiaron el proceso de remojo sobre la cinética de hidratación y cocción del guandú (*Cajanus cajan*), utilizando soluciones de NaHCO<sub>3</sub> al 0%, 1%, 1,5% y 2% m/m sin y con asistencia de ultrasonido (17 W/L; 40 kHz y 43 W/L; 40 kHz) a 27 °C. El ultrasonido aceleró la cinética de hidratación, pero no afectó el proceso de cocción, el remojo en NaHCO<sub>3</sub>; retrasó la cinética de hidratación, pero aceleró la cinética de ablandamiento. Según Ulloa et al. (2015), el efecto del ultrasonido en la cinética de hidratación y tiempos de cocción de variedades de frijol, no afecta el contenido de humedad en las muestras de frijoles, pero reduce significativamente los tiempos de remojo. Guimarães et al. (2020) estudiaron la hidratación asistida por ultrasonido de granos de trigo a diferentes potencias de entrada nominales (0 - 1500 W) y temperaturas (15 - 25 °C). Observaron un aumento de temperatura, así como una mayor densidad acústica provocando una mejora en la cinética de hidratación. Al utilizar rayos γ, y ultrasonido (91 W/L y 25 kHz) a 25 °C, la hidratación afecta la humedad de equilibrio (Miano et al., 2019). La sonicación provoca un aumento en el tamaño de los gránulos de almidón con el tiempo y mejora la tasa de incorporación de agua, obteniéndose los mejores parámetros de calidad a 35 °C (Borsato et al., 2019).

La tecnología de ultrasonido en el proceso de hidratación, desamargado y el contenido de alcaloides de granos de chocho andino (*Lupinus*

*albus* Sweet), acelera la cinética de hidratación casi un 40%, muestra un comportamiento sigmoidal, mejorando la extracción de alcaloides equilibrio (Miano et al., 2019). Al incorporar hierro en frijol durante la hidratación con y sin ultrasonido (91 W/L; 25 kHz) a 25 °C, se demuestra que el hierro podría incorporarse durante el proceso de hidratación, describiendo un comportamiento cinético similar al de la captación de agua y el ultrasonido acelera el proceso de cocción, sin embargo, la capacidad de germinación de los frijoles se reduce (Miano & Augusto, 2018). El ultrasonido mejora significativamente el proceso de hidratación, aumenta la absorción de agua, índice de solubilidad, disminuye el tiempo del proceso y no modifica las propiedades del almidón (Khatkar et al., 2020; Miano et al., 2017), así como también en las variedades de trigo se modifica la difusividad de la humedad, las propiedades termodinámicas como la energía libre de Gibbs, valores negativos de entalpía, cambios de entropía y disminución de la energía de activación (Yıldırım, 2022). Los efectos del ultrasonido de alta intensidad sobre las propiedades espumantes y emulsionantes del agua de cocción de garbanzos aumentan la estabilidad, el color y la textura de las espumas y en el índice de actividad emulsionante (Meurer et al., 2020) pero el contenido de los oligosacáridos no cambia en los garbanzos, arvejas y la soya con previa hidratación (Han & Baik, 2006). Además, podría aumentar significativamente el contenido de sal (Zou et al., 2018) y prolongar la vida útil (Zhang et al., 2021).

De la revisión realizada, para hidratar granos se ha empleado el ultrasonido con una potencia volumétrica de 40 a 45 W/L, frecuencias de 25 y 40 kHz y temperaturas entre 25 y 30 °C.

**Tabla1**

Potencia y temperatura utilizada en la hidratación de granos y almidones

| Grano / almidón        | Ultrasonido       |                  | Temperatura (°C)   | Referencia               |
|------------------------|-------------------|------------------|--------------------|--------------------------|
|                        | Potencia (W; W/L) | Intensidad (kHz) |                    |                          |
| Grano de Trigo         | 200 W             | 40               | 25, 35, 45, 55     | (Yıldırım, 2022)         |
|                        | 0 - 1500 W        |                  | 15 - 25            | (Guimarães et al., 2020) |
|                        | 360 W             | 25               | 30, 40, 50, 60, 70 | (Shafaei et al., 2019)   |
| 480 W                  | 40                |                  |                    |                          |
| Grano de Guandú        | 17 W/L            | 40               | 27                 | (Vásquez et al., 2021)   |
| Grano de Chocho andino | 43 W/L            |                  |                    |                          |
|                        | 41 W/L            | 25               | 25                 | (Miano et al., 2019)     |
| Grano de Frejol        | 28 W/L            | 25               | 25, 35, 45, 55     | (Miano et al., 2018),    |
|                        | 91 W/L            | 25               | 25                 | (Miano & Augusto, 2018)  |
|                        | 130 W             | 40               | 30                 | (Ulloa et al., 2015)     |
| Almidón de Maíz        | 41 W/L            | 25               |                    | (Miano et al., 2017)     |
| Almidón mijo africano  | 700 W             | 20               |                    | (Yadav et al., 2021)     |

### 3. Modelos utilizados para estudiar el comportamiento de la hidratación de almidones

Al hidratar el frijol mungo (*Vigna radiata*), se muestra un comportamiento de hidratación sigmoideal con una vía de entrada de agua específica (Miano et al., 2016). Para describir la cinética de hidratación en el control y remojo en frejoles asistido por ultrasonido se puede utilizar modelos mecanicistas (difusión de Fickian) y empíricos (ecuación de Peleg, modelo de Weibull y ecuación de primer orden). El ultrasonido mejora la tasa de hidratación y el modelo de Weibull predice mejor la cinética de hidratación de los frijoles blancos en un campo ultrasónico (Ghafoor et al., 2014). Paterno & Augusto (2015) evaluaron el proceso de hidratación de semillas de sorgo, para ello utilizaron el modelo de Peleg. El ultrasonido aumentó tanto la tasa de consumo de agua (relacionada con Peleg, parámetro k1) y el contenido de humedad de equilibrio (relacionado con el parámetro Peleg k2). El tiempo para alcanzar el 90% del contenido de humedad de

equilibrio del proceso de control fue un 40% menor cuando se aplicó el ultrasonido. Los resultados obtenidos destacaron que la tecnología estadounidense puede ser utilizada con éxito para optimizar el proceso de hidratación de granos con aplicación directamente industrial. Shafaei et al. (2019) examinaron la capacidad predictiva de los entornos informáticos neuronales, basados en estrategias de redes neuronales artificiales (ANN) y sistemas de neurodifusos adaptativos (ANFIS), para la simulación integrada de la cinética de hidratación asistida por ultrasonido del grano de trigo. Los resultados de la simulación ANFIS mostraron el incremento individual o simultáneo de la temperatura de en cualquier condición de ultrasonificación dada.

En la Tabla 2 se muestran los distintos modelos de hidratación en granos y almidones. El modelo de Peleg ha sido el más utilizado para analizar el comportamiento de la cinética de la hidratación facilitando en emplear el mismo en otros granos.

**Tabla 2**  
Principales modelos de hidratación

| Modelos de hidratación  | Parámetros   | Nombre del modelo         | Aplicaciones   |
|---|--|---------------------------|--|
| $Mt = M_0 + \frac{(t)}{K1+K2*(t)}$  | $M_0$ = humedad inicial $\left[ \frac{kg_{H2O}}{kg_{ss}} \right]$<br>$t$ = tiempo (s)<br>$K1$ = Constante de velocidad $\left[ s \cdot \frac{kg_{ss}}{kg_{H2O}} \right]$<br>$K2$ = constante de capacidad $\frac{kg_{ss}}{kg_{H2O}}$ | Modelo de Peleg           | Granos de trigo (Guimarães et al., 2020), cebada (Borsato et al., 2019), (Kalita et al., 2021), frijoles (Miano et al., 2018), maíz (Miano et al., 2017), frejoles secos (Ulloa et al., 2015), granos de sorgo (Paterno & Augusto, 2015) |
| $\left( \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} \right) = \exp[-Kp*(t)^n]$  | $Kp$ = coeficiente de difusión $(s)^n$<br>$n$ = tipo de difusión y la microscopía adimensional<br>$R = (Kp)^{\frac{1}{n}}$   | Modelo de Page            | Hidratación de arvejas   |
| $Mt = \left( \frac{M_\infty}{1 + \left[ \frac{M_\infty - M_0}{M_0} \right] \exp(-k_{\tau A} * M_\infty * t)} \right)$ | $k_{\tau A}$ = tasa de hidratación y el tiempo de fase de retraso $\left[ s \cdot \frac{kg_{ss}}{kg_{H2O}} \right]$  | Modelo de Ibarz y Augusto | Otros almidones  |
| $\frac{X(t) - X_0}{X_{eq} - X_0} = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right]$                   | $\alpha$ = parámetro de forma<br>$\beta$ = escala de tiempo (s)  | Modelo de Weibull         | Hidratación de granos de trigo (Guimarães et al., 2020)<br>Hidratación frijoles blancos (Ghafoor et al., 2014)   |
| $M = M_0 + (M_\infty - M_0) * [P(1 - \exp(-k_8 * t)) + (1 - p) * (1 - \exp(-k_9 * t))]$                               | $p$ = fracción de agua absorbida ( $k_8$ y $k_9$ ) = parámetro de transferencia global   | Modelo de Miano           | Hidratación de maíz (Miano et al., 2017)   |
| $M = A \left[ \frac{a_w}{1 - a_w} \right]^B$  | A Y B parámetros de la forma de la curva   | Modelo de Oswin           | Hidratación del frejol mungo (Miano et al., 2016)  |

#### 4. Efecto del ultrasonido en las propiedades de los almidones

##### 4.1 Propiedades fisicoquímicas, estructurales y reológicas

El efecto de cavitación del ultrasonido destruye la estructura de los gránulos de almidón y aumenta el contenido de almidón dañado (Wang et al., 2022). El ultrasonido afecta las propiedades funcionales y de pegajosidad del almidón de lirio blanco, modificando sus características de absorción de agua y viscosidad (Bento et al., 2021). Golkar et al. (2021) estudió el efecto del ultrasonido a diferentes temperaturas (25 °C, 45 °C y 65 °C) y tiempos (30 y 60 min) sobre las propiedades fisicoquímicas, estructurales y reológicas del almidón de maíz, en donde observaron que la solubilidad, el poder de hinchamiento y el contenido mínimo de gelificación aumentaron con el aumento de la temperatura y el tiempo. La microscopía demostró que los gránulos de almidón se aglomeraban a 65 °C y las temperaturas de pegado cambiaron a valores más altos después del tratamiento.

Kaur & Gill (2019) aplicaron a ultrasonificación (15 y 30 min (T 15 y T 30, respectivamente) a cuatro almidones de cereales (trigo, cebada, arroz y maíz) y evaluaron su digestibilidad in vitro, XRD, FTIR, espectroscopia, propiedades morfológicas y reológicas. La ultrasonificación aumentó el poder de hinchamiento y la solubilidad de los almidones de diferentes cereales (Kaur & Gill, 2019), y en combinación con la hidrólisis ácida, la descomposición y la energía de activación de la gelatinización disminuyó sin destruir la estructura cristalina (Mohammad et al., 2015).

##### 4.2 Propiedades térmicas y mecánicas

El efecto del ultrasonido sobre las propiedades térmicas del almidón de trigo mediante termogramas de almidones mostraron que a temperaturas ( $T_p$ ) entre 68,19 - 74,79 °C hay mayores valores de absorción de calor. Asimismo, el ultrasonido mejora la estabilidad térmica de la harina, alcanza la gelatinización a temperaturas más bajas, es de fácil cocción y requiere de menos energía (Gelvez et al., 2016). En el almidón de yuca al emplear ultrasonido y ácido acético, se disminuye la solubilidad y hay menores viscosidades en los almidones modificados (Khurshida et al., 2021). Las propiedades reológicas mostraron un aumento en  $G'$  y  $G''$  durante 15 min de ultrasonificación condujeron a la formación de depresiones y poros en la superficie de los gránulos de almidón (Kaur & Gill, 2019). El

tiempo ultrasónico es importante en el cizallamiento de pasta de fécula de patata, Zhang et al. (2019) investigaron la tixotropía de la PSP en el campo ultrasónico y la conformación espacial de la cadena molecular de la PSP. Observaron que la viscosidad aparente de la PSP disminuye al aumentar el tiempo ultrasónico y el grado de adelgazamiento por cizallamiento de PSP se reduce considerablemente después de la acción ultrasónica.

El comportamiento de flujo de las muestras sonicadas en soluciones ácidas experimentan una transición del comportamiento pseudoplástico al newtoniano. Se reduce la elasticidad del gel, la dependencia del tiempo y la recuperación estructural de las muestras (Mohammad et al., 2015). Hakke et al. (2022) evaluaron las propiedades térmicas de las películas de nanocompuestos de almidón (SNP) y poliuretano (PU) asistida por ultrasonido. Observaron que el aumento de la variación de la entalpía ( $\Delta H$ ) se produce cuando se añade SNP al compuesto de PU y que los fenómenos responsables de ellos es la nucleación local y la cristalinidad. Además, la energía de fusión es mayor a medida que aumenta la compacidad de la película y el porcentaje de peso de SNP en la solución de PU, aumenta la resistencia de la degradación térmica. Concluyeron que a temperaturas bajas la película de nanocompuestos SNP – PU preparada mostró una mayor estabilidad térmica.

#### 5. Suspensión de almidones

En las suspensiones de maíz y arroz cuando se calienta a diferentes concentraciones sacarosa, aumenta la concentración de la sacarosa y la entalpía de gelatinización aumenta solo para los almidones de maíz (Desam et al., 2021). Desam et al. (2020) distribuyeron el tamaño de los gránulos de una suspensión al 8 % p/p de almidón de arroz y patata en agua sometidos a 70, 75, 80 y 85 °C en diferentes tiempos de espera (0 – 60 min). El diámetro promedio de los gránulos de almidón fue mayor a temperaturas más altas y tiempos de espera para NRS, WRS y MPS, lo que indica hinchazón, mientras que para NPS disminuyó, lo que indica rotura.

Desam et al. (2018) realizaron un modelo mecánico para la cinética de hinchamiento de la suspensión de almidón de maíz ceroso. El modelo propuesto predijo con precisión la evolución del tamaño medio de los gránulos y la distribución del tamaño de los gránulos. Al realizar simulaciones dinámicas Stokesianas de suspensiones de

esferas rígidas se puede determinar las condiciones bajo las cuales los gránulos de almidón hinchados pueden considerarse rígidos para mediciones reológicas (Desam et al., 2021). Schröder et al. (2011) caracterizaron suspensiones de almidón de maíz para la determinación del grado de gelatinización. La presión relativa de inyección de gas demostró tener la mayor influencia en la distribución del tamaño de gota. El efecto de la alta presión (HP) en las suspensiones de agua y harina de trigo, mediante barridos de temperatura revelaron que la gelatinización del almidón inducida por HP es de forma sigmoidea entre el grado de gelatinización y la presión de tratamiento (Vallons & Arendt, 2010). Oh et al. (2008) investigaron la gelatinización inducida por alta presión de diferentes almidones. Se encontró que el almidón de papa se vio menos afectado por el tratamiento a presión que los otros almidones. Barrera et al. (2013) investigaron la influencia del contenido de almidón dañado. Las suspensiones de almidón sin calentar mostraron un comportamiento reológico dependiente del tiempo y fueron descritas por el modelo de Weltman, exhibiendo un comportamiento tixotrópico. Tsutsui et al. (2013) estudiaron los efectos del tiempo de recocido, y la temperatura de recocido sobre las propiedades reológicas y térmicas de las suspensiones de almidón de arroz. Se encontró que los efectos del recocido sobre la dependencia de la temperatura de  $\eta$  eran casi los mismos que los de  $G'$  y  $G''$ . Chung et al. (2013) estudiaron la modificación de la reología de suspensiones de gránulos de almidón. Para ello se adicionó calcio. La adición de calcio promovió la gelificación de los sistemas precalentados a temperatura ambiente y condujo a una mayor turbidez, módulo de cizallamiento complejo ( $G^*$ ), y ligereza óptica.

## 6. Estabilidades térmicas en los almidones (Microscopía – FTIR)

El análisis FTIR se utiliza para caracterizar la estructura (es decir, la unión) de las moléculas de agua en la estructura del xerogel y para la obtención de hidrogeles en base de alginato suplementarios con almidón de maíz se emplea la microscopía (Lozano et al., 2021). La topografía microscópica de gelatinización del almidón en granos de arroz, revelaron una alteración dinámica de las células periféricas, lo que puede tener un impacto importante en la lixiviación del almidón y, por lo tanto, en las propiedades de textura del grano cocido (Briffaz et al., 2012). Contreras et al. (2004) estudiaron el hinchamiento de los gránulos de almidón mediante dos técnicas:

el método del dextrano azul y por microscopía óptica. Los resultados mostraron curvas que indican el hinchamiento de las dispersiones de almidón de maíz y trigo (al 64%, p/p, contenido de humedad). Mapengo et al. (2022) investigaron los cambios térmicos y estructurales del almidón de maíz tratado con calor y humedad por infrarrojos (IR-HMT) con ácido esteárico. La microscopía electrónica de barrido mostró más protrusión y menos poros en la superficie granular del almidón para el almidón de maíz con IR-HMT más SA.

Kou & Gao (2019) estudiaron la estabilidad térmica de los almidones reticulados (CL) con diferentes temperaturas. La temperatura de ebullición, el IBC de todos los almidones reticulados fue similar al del maíz nativo, lo que indica que casi toda la amilosa se lixivió y formó complejos azules con yodo. Suriyatem et al. (2018) mejoraron las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica de películas biodegradables a base de almidón de arroz. Los espectros FTIR sugirieron que las interacciones pueden estar presentes entre el enlace sencillo los grupos OH. Las imágenes de microscopía electrónica de barrido revelaron que las superficies de fractura de la sección transversal de todas las películas eran suaves y homogéneas. Sánchez et al. (2010) compararon las propiedades funcionales de los almidones normal y ceroso de maíz, arroz, papa y mandioca. Los geles de almidones normales tuvieron menor sinéresis que los almidones de cereales. Pourfarzad et al. (2021) estudiaron, las interacciones del almidón de trigo con la goma de semilla de salvia mediante pruebas reológicas y la transformada infrarroja de Fourier (FTIR). Todas las mezclas exhibieron comportamientos de flujo tixotrópico observándose un tamaño de partícula mayor en presencia de SSG al 0,50 %. De igual manera en el análisis ATR-FTIR de harinas cocida mostró que los tratamientos térmicos promovieron nuevas interacciones físicas a escala molecular entre el almidón y la proteína (Chávez et al., 2018). En las interacciones del almidón de trigo mediante reología dinámica y espectro infrarrojo transformada de Fourier (FTIR), se encontró que la estructura de la red de amilosa estaba rota y que el enlace de hidrógeno intermolecular e intramolecular de WS se debilita después de la gelificación (Xiong et al., 2017).

## 7. Retos y proyecciones futuros

La producción científica sobre la hidratación de semillas implementando ultrasonido a lo largo del tiempo ha aumentado. Unos de los factores importantes que a llamando a atención a la

comunidad científica, es que el ultrasonido influye positivamente en la hidratación de granos es decir que es capaz de acelerar la cinética de hidratación y el proceso de germinación. Hoy en día las grandes industrias dedicadas a la exportación granos y almidones buscan nuevos métodos para optimizar procesos productivos, debido a que el proceso de hidratación convencional requiere mucho tiempo y, a menudo, da como resultado granos de mala calidad (Yadav et al., 2021), generando el aumento del uso y el costo de energía cuando se requiere llevar a cocción (Vásquez et al., 2021).

Miano et al. (2018) demostraron que a pesar de que el ultrasonido mejora el proceso de hidratación, las altas temperaturas dificultan el efecto de los ultrasonidos y como consecuencia afecta la reorganización de las moléculas durante la hidratación. Kilicli & Toker (2022) en la determinaron las propiedades tecnológicas de las aquafabas (agua de cocción de legumbre) encontraron que en el remojo con ultrasonido disminuyó el contenido de proteínas. La tecnología de ultrasonido acelera el proceso de remojo de varios granos de leguminosas, sin embargo, a veces, los granos se irradian con fines de desinfección (Miano et al., 2019).

A partir del 2014 el uso de la tecnología de ultrasonido se ha utilizado con mayor intensidad en distintas áreas temáticas, con mayor interés en las ciencias médicas y las ciencias agrícolas y biológicas (Figura 2). Se espera que esta tendencia continúe por unos años más.

Para estudios futuros, Miano & Augusto (2018) sugieren trabajar en la hidratación utilizando otros nutrientes solubles en agua, para determinar si el

hierro incorporado es biodisponible y bioaccesible, así como qué tan relevante es este enfoque como política nutricional.

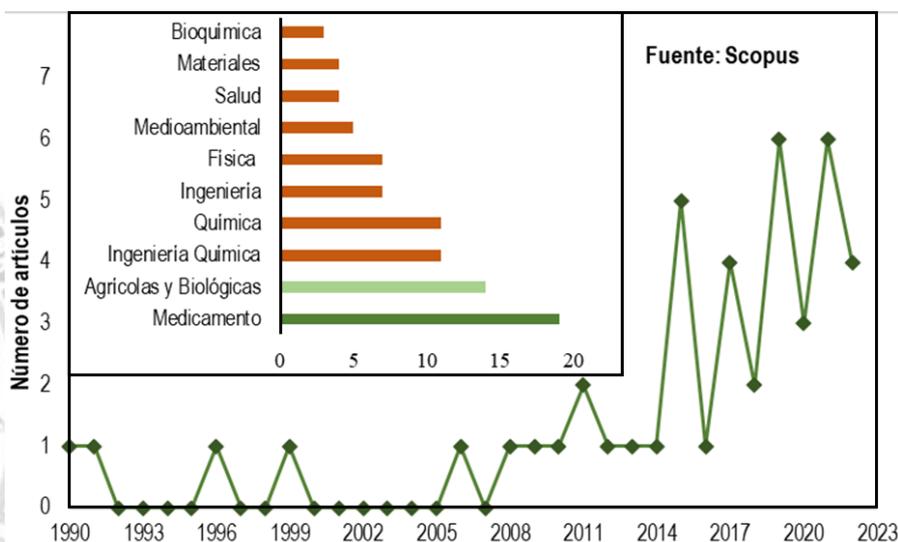
Vásquez et al. (2021) recomiendan estudiar otros granos y soluciones de sales en el proceso de hidratación-cocción.

Además, estudiar el efecto del ultrasonido en la hidratación, así como en los almidones, utilizando otras tecnologías, como la tecnología Rheonaut, es muy prometedora para comprender aún más lo que pasa a nivel físico y químico.

## 8. Conclusiones

En este trabajo se logró hacer una revisión detallada de la implementación del ultrasonido en la hidratación. Muchos autores afirman que el ultrasonido mejora significativamente el proceso de hidratación, aumenta la absorción del agua, el índice de solubilidad obteniéndose mejores parámetros de calidad. Asimismo, mejora la estabilidad térmica, propiedades reológicas, influye en la cocción por lo que se requiere de menos energía. Se espera trabajar con otros nutrientes o soluciones de sales en el proceso de hidratación como bisulfato sódico ( $\text{NaHSO}_4$ ), bisulfito sódico ( $\text{NaHSO}_3$ ) y fumarato ferroso ( $\text{C}_4\text{H}_2\text{FeO}_4$ ) y emplear otras alternativas de granos como garbanzos, lentejas y frejol reventón para estudiar las propiedades estructurales, térmicas y reológicas de los almidones mediante métodos de microscopía y FTIR.

Con esta información se pretende ayudar a la comunidad científica a comprender los principios de esta tecnología en la aplicación de hidratar nuevos almidones para optimizar y acelerar procesos productivos en la industria.



**Figura 2.** Producción científica y cantidad de artículos publicados por cada autor. Información obtenida de la base de datos Scopus (criterio de búsqueda: (TITLE (ultrasound) AND TITLE (hydration))).

## Referencias bibliográficas

- Baldwin, P. M. (2001). Starch granule-associated proteins and polypeptides: A review. *Starch/Stärke*, 53(10), 475–503.
- Barrera, G. N., Bustos, M. C., Iturriaga, L., Flores, S. K., León, A. E., & Ribotta, P. D. (2013). Effect of damaged starch on the rheological properties of wheat starch suspensions. *Journal of Food Engineering*, 116(1), 233–239.
- BeMiller, J. N. (2018). Carbohydrate chemistry for food scientists. *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists*, 41(5), 1–427.
- Bento, J. A. C., Ferreira, K. C., Fidelis, M. C., Souza Neto, M. A. de, Paixão e Silva, G. de L., Bataus, L. A. M., Caliani, M., & Soares Júnior, M. S. (2021). Ultrasound Modification of White Garland-Lily Starch: Functional, Thermal, and Pasting Properties. *Starch/Stärke*, 73(3–4).
- Borsato, V. M., Jorge, L. M. M., Mathias, A. L., & Jorge, R. M. M. (2019). Ultrasound assisted hydration improves the quality of the malt barley. *Journal of Food Process Engineering*, 42(6), 1–10.
- Briffaz, A., Mestres, C., Escoute, J., Larlaud, M., & Domier, M. (2012). Starch gelatinization distribution and peripheral cell disruption in cooking rice grains monitored by microscopy. *Journal of Cereal Science*, 56(3), 699–705.
- Chang, R., Xiong, L., Li, M., Wang, Y., Lin, M., Qiu, L., Bian, X., Sun, C., & Sun, Q. (2020). Interactions between debranched starch and emulsifiers, polyphenols, and fatty acids. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 644–653.
- Chávez, C. E., Veyna-Torres, J. I., Cavazos-Tamez, L. M., de la Rosa-Millán, J., & Sema-Saldivar, S. O. (2018). Physicochemical characteristics, ATR-FTIR molecular interactions and in vitro starch and protein digestion of thermally-treated whole pulse flours. *Food Research International*, 105, 371–383.
- Choi, H. M., & Yoo, B. (2009). Steady and dynamic shear rheology of sweet potato starch-xanthan gum mixtures. *Food Chemistry*, 116(3), 638–643.
- Chung, C., Degner, B., & McClements, D. J. (2013). Creating novel food textures: Modifying rheology of starch granule suspensions by cold-set whey protein gelation. *LWT - Food Science and Technology*, 54(2), 336–345.
- Contreras, I., Rolée, A., & Le Meste, M. (2004). Study of starch granules swelling by the blue dextran method and by microscopy. *Starch/Stärke*, 56.
- Desam, G., Li, J., Chen, G., Campanella, O., & Narsimhan, G. (2018). A mechanistic model for swelling kinetics of waxy maize starch suspension. *Journal of Food*
- Desam, G. P., Dehghani, N. L., Narsimhan, G., & Narsimhan, V. (2021). Characterization of storage modulus of starch suspensions during the initial stages of pasting using Stokesian dynamics simulations. *Food Hydrocolloids*, 121.
- Desam, P., Jones, G., & Narsimhan, G. (2021). Prediction of the effect of sucrose on equilibrium swelling of starch suspensions. *Journal of Food Engineering*.
- Desam, P., Li, J., Chen, G., Campanella, O., & Narsimhan, G. (2020). Swelling kinetics of rice and potato starch suspensions. *Journal of Food Process Engineering*, 43(4), 1–13.
- Evans, I. D., & Haisman, D. R. (1980). Rheology of Gelatinised Starch Suspensions. *Journal of Texture Studies*, 10(4), 347–370.
- Gelvez, V. M., Luna, J., & Campo, Y. (2016). Effect of ultrasound in the thermal properties of wheat starch. *Vitae*, 23.
- Ghafoor, M., Misra, N. N., Mahadevan, K., & Tiwari, B. K. (2014). Ultrasound assisted hydration of navy beans (*Phaseolus vulgaris*). *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(1), 409–414.
- Golkar, A., Milani, J. M., Motamedzadegan, A., & Kenari, R. E. (2021). Physicochemical, structural, and rheological characteristics of corn starch after thermal-ultrasound processing. *Food Science and Technology International*.
- Guimarães, B., Polachini, T. C., Augusto, P. E. D., & Telis-Romero, J. (2020). Ultrasound-assisted hydration of wheat grains at different temperatures and power applied: Effect on acoustic field, water absorption and germination. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 155(July).
- Hakke, V. S., Landge, V. K., Sonawane, S. H., Uday Bhaskar Babu, G., Ashokkumar, M., & M. M. Flores, E. (2022). The physical, mechanical, thermal and barrier properties of starch nanoparticle (SNP)/polyurethane (PU) nanocomposite films synthesised by an ultrasound-assisted process. *Ultrasonics Sonochemistry*, 88.
- Han, I. H., & Baik, B. K. (2006). Oligosaccharide content and composition of legumes and their reduction by soaking, cooking, ultrasound, and high hydrostatic pressure. *Cereal Chemistry*, 83(4), 428–433.
- Kalita, D., Jain, S., Srivastava, B., & Goud, V. V. (2021). Sono-hydro priming process (ultrasound modulated hydration): Modelling hydration kinetic during paddy germination. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70(September 2020), 105321.
- Kaur, H., & Gill, B. S. (2019). Effect of high-intensity ultrasound treatment on nutritional, rheological and structural properties of starches obtained from different cereals. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126, 367–375.
- Khatkar, A. B., Kaur, A., & Khatkar, S. K. (2020). Restructuring of soy protein employing ultrasound: Effect on hydration, gelation, thermal, in-vitro protein digestibility and structural attributes. *Lwt*, 132, 109781.
- Khurshida, S., Das, M. J., Deka, S. C., & Sit, N. (2021). Effect of dual modification sequence on physicochemical, pasting, rheological and digestibility properties of cassava starch modified by acetic acid and ultrasound. *International Journal of Biological Macromolecules*, 188(August), 649–656.
- Kilici, M., & Toker, O. S. (2022). Some physicochemical and technological properties of cooking water of pulses as a canned industry waste: Effect of ultrasound treatment during soaking. *International Journal of Food Engineering*, 18, 105–118.
- Kizil, R., Irudayaraj, J., & Seetharaman, K. (2002). Characterization of irradiated starches by using FT-Raman and FTIR spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(14), 3912–3918.
- Kou, T., & Gao, Q. (2019). A study on the thermal stability of amylose-amylopectin and amylopectin-amylopectin in cross-linked starches through iodine binding capacity. *Food Hydrocolloids*, 88, 86–91.
- Lagarigue, S., Alvarez, G., Cuvelier, G., & Flick, D. (2008). Swelling kinetics of waxy maize and maize starches at high temperatures and heating rates. *Carbohydrate Polymers*, 73(1), 148–155.
- Liu, H., Chaudhary, D., Yusa, S. I., & Tade, M. O. (2011). Glycerol/starch/Na<sup>+</sup>-montmorillonite nanocomposites: A XRD, FTIR, DSC and <sup>1</sup>H NMR study. *Carbohydrate Polymers*, 83(4), 1591–1597.
- Lozano, G., Alvarez Ramirez, J., Lobato Calleros, C., Vernon Carter, E. J., & Hernández Marín, N. Y. (2021). Characterization of Corn Starch-Calcium Alginate Xerogels by Microscopy, Thermal, XRD, and FTIR Analyses. *Starch/Stärke*, 73.
- Mapengo, C. R., Ray, S. S., & M, N. E. (2022). Granular morphology, molecular structure and thermal stability of infrared heat-moisture treated maize starch with added lipids. *Food Chemistry*, 382.
- Meurer, M. C., de Souza, D., & Ferreira Marczak, L. D. (2020). Effects of ultrasound on technological properties of chickpea cooking water (aquafaba). *Journal of Food Engineering*, 265, 109688.
- Miano, A., & Augusto, P. (2018). The ultrasound assisted hydration as an opportunity to incorporate nutrients into grains. *Food Research International*, 106(2017), 928–935.
- Miano, A. C., Sabadoti, V. D., & Augusto, P. E. D. (2018). Enhancing the hydration process of common beans by ultrasound and high temperatures: Impact on cooking and thermodynamic properties. *Journal of Food Engineering*, 225, 53–61.
- Miano, A., Ibarz, A., & Augusto, P. (2017). Ultrasound technology enhances the hydration of corn kernels without affecting their starch properties. *Journal of Food Engineering*, 197, 34–43.
- Miano, A., Pereira, J., Castanha, N., Júnior, M., & Augusto, P. (2016). Enhancing mung bean hydration using the ultrasound technology: Description of mechanisms and impact on its germination and main components. *Scientific Reports*, 6(November), 1–14.
- Miano, A., Sabadoti, V. D., & Augusto, P. E. D. (2019). Combining Ionizing Irradiation and Ultrasound Technologies: Effect on Beans Hydration and Germination. *Journal of Food Science*, 84(11), 3179–3185.
- Mohammad, A., Asad, R., & Seyed, M. A. (2015). Ultrasound-assisted acid-thinning of corn starch: Morphological, physicochemical, and rheological properties. *Almidón/Stärke*, 67.
- Nayouf, M., Loisel, C., & Doublier, J. L. (2003). Effect of thermomechanical treatment on the rheological properties of crosslinked waxy corn starch. *Journal of Food Engineering*, 59(2–3), 209–219.
- Oh, H. E., Pinder, D. N., Hemar, Y., Anema, S. G., & Wong, M. (2008). Effect of high-pressure treatment on various starch-in-water suspensions. *Food Hydrocolloids*, 22(1), 150–155.

- Park, H., Xu, S., & Seetharaman, K. (2011). A novel in situ atomic force microscopy imaging technique to probe surface morphological features of starch granules. *Carbohydrate Research*, 346(6), 847–853.
- Patero, T., & Augusto, P. E. D. (2015). Ultrasound (US) enhances the hydration of sorghum (*Sorghum bicolor*) grains. *Ultrasonics Sonochemistry*, 23, 11–15.
- Pourfarzad, A., Ahmadian, Z., & Habibi-Najafi, M. B. (2018). Interactions between polyols and wheat biopolymers in a bread model system fortified with inulin: A Fourier transform infrared study. *Heliyon*, 4(12).
- Pourfarzad, A., Habibi Najafi, M. B., Haddad Khodaparast, M. H., & Khayyat, M. H. (2015). Serish inulin and wheat biopolymers interactions in model systems as a basis for understanding the impact of inulin on bread properties: a FTIR investigation. *Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 7964–7973.
- Pourfarzad, A., Yousefi, A., & Ako, K. (2021). Steady/dynamic rheological characterization and FTIR study on wheat starch-sage seed gum blends. *Food Hydrocolloids*, 111(September), 106380.
- Rahman, M. M., & Lamsal, B. P. (2021). Ultrasound-assisted extraction and modification of plant-based proteins: Impact on physicochemical, functional, and nutritional properties. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1457–1480.
- Sánchez, T., Dufour, D., Moreno, I. X., & Ceballos, H. (2010). Comparison of pasting and gel stabilities of waxy and normal starches from potato, maize, and rice with those of a novel waxy cassava starch under thermal, chemical, and mechanical stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(8), 5093–5099.
- Schröder, J., Kraus, S., Rocha, B. B., Gaukel, V., & Schuchmann, H. P. (2011). Characterization of gelatinized corn starch suspensions and resulting drop size distributions after effervescent atomization. *Journal of Food Engineering*, 105(4), 656–662.
- Shafaei, S. M., Nourmohamadi-Moghadami, A., Rahmani-Koushkaki, H., & Kamgar, S. (2019). Neural computing efforts for integrated simulation of ultrasound-assisted hydration kinetics of wheat. *Information Processing in Agriculture*, 6(3), 357–374.
- Singla, M., & Sit, N. (2021). Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73.
- Stickel, J. J., & Powell, R. L. (2005). Fluid mechanics and rheology of dense suspensions. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 37, 129–149.
- Suriyatem, R., Auras, R. A., & Rachtanapun, P. (2018). Improvement of mechanical properties and thermal stability of biodegradable rice starch-based films blended with carboxymethyl chitosan. *Industrial Crops and Products*, 122(April), 37–48.
- Tsutsui, K., Katsuta, K., Matoba, T., Takemasa, M., Funami, T., Sato, E., & Nishinari, K. (2013). Effects of Time and Temperature of Annealing on Rheological and Thermal Properties of Rice Starch Suspensions during Gelatinization. *Journal of Texture Studies*, 44(1), 21–33.
- Ulloa, J. A., Enríquez López, K. V., Contreras Morales, Y. B., Rosas Ulloa, P., Ramírez Ramírez, J. C., & Ulloa Rangel, B. E. (2015). Effect of ultrasound treatment on the hydration kinetics and cooking times of dry beans (*Phaseolus vulgaris*). *CYTA - Journal of Food*, 13(4), 588–596.
- Vallons, K. J. R., & Arendt, E. K. (2010). Understanding high pressure-induced changes in wheat flour-water suspensions using starch-gluten mixtures as model systems. *Food Research International*, 43(3), 893–901.
- Vásquez, U., Siche, R., & Miano, A. C. (2021). Ultrasound-assisted hydration with sodium bicarbonate solution enhances hydration-cooking of pigeon pea. *Lwt*, 144(February).
- Wang, L., Wang, M., Zhou, Y., Wu, Y., & Ouyang, J. (2022). Influence of ultrasound and microwave treatments on the structural and thermal properties of normal maize starch and potato starch: A comparative study. *Food Chemistry*, 377.
- Xiong, J., Li, Q., Shi, Z., & Ye, J. (2017). Interactions between wheat starch and cellulose derivatives in short-term retrogradation: Rheology and FTIR study. *Food Research International*, 100, 858–863.
- Yadav, S., Mishra, S., & Pradhan, R. C. (2021). Ultrasonics Sonochemistry Ultrasound-assisted hydration of finger millet ( *Eleusine Coracana* ) and its effects on starch isolates and antinutrients. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105542.
- Yang, Q., Xiao, Z., Zhao, Y., Liu, C., Xu, Y., & Bai, J. (2015). Effect of extrusion treatment with different emulsifiers on the thermal stability and structure of corn starch. *Czech Journal of Food Sciences*, 33(5), 464–473.
- Yıldırım, A. (2022). Influence of temperature, ultrasound, and variety on moisture diffusivity and thermodynamic properties of some durum wheat varieties during hydration. *Revista de Procesamiento y Conservación de Alimentos*.
- Zhang, J., Zhang, Y., Zou, Y., & Zhang, W. (2021). Effects of ultrasound-assisted cooking on quality characteristics of spiced beef during cold storage. *Lwt*, 136(P2), 110359.
- Zhang, Y. F., Li, J. Bin, Zhang, Z. Y., Wei, Q. S., & Fang, K. (2019). Rheological law of change and conformation of potato starch paste in an ultrasound field. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(3), 1695–1704.
- Zou, Y., Zhang, W., Kang, D., & Zhou, G. (2018). Improvement of tenderness and water holding capacity of spiced beef by the application of ultrasound during cooking. *International Journal of Food Science and Technology*, 53(3), 828–836.

