



Optimización del proceso de cocción de quinua utilizando el diseño 3^k y la función de deseabilidad: Grado de gelatinización, índice de absorción de agua, índice de solubilidad y desprendimiento de cotiledones

Optimization of the quinoa cooking process using the 3^k design and the desirability function: Degree of gelatinization, water absorption index, solubility index and cotyledon detachment

Alberto Luis Huamani-H^{1,*} ; Juan Carlos Ponce-Ramírez¹ ; Jorge Málaga-Juárez^{2,*} 

¹ Ingeniería en Industrias Alimentarias. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Peru.

² Ingeniería Agroindustrial. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Peru.

Received December 19, 2019. Accepted June 12, 2020.

Resumen

Se realizó la optimización del proceso de cocción de quinua con vapor, empleando un diseño de superficie de respuesta (RSM) factorial de 3 niveles: 3^k y para encontrar la región óptima se usó la metodología de optimización de respuestas múltiples de función de deseabilidad (Dx), que son herramientas eficaces para optimizar las variables de un proceso, evaluando la maximización del índice de absorción de agua (WAI), índice de solubilidad en agua (WSI), grado de gelatinización (GE) y la minimización del desprendimiento de cotiledones (DC) de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). El equipo utilizado fue un cocinador vertical con generador de vapor, las variables de cocción en estudio, la presión de vapor y el tiempo de cocinado. Los valores óptimos de proceso fueron: Presión 1,5 kgf.cm⁻² y tiempo 8 minutos para las mejores características de la quinua cocida WSI de 26,411%, WAI de 7,960 (g.g⁻¹), GE de 89,245% y CD de 18,40%, el valor de la función de deseabilidad como indicador de las respuestas múltiples fue de 0,798. El conocimiento de estas características pueden ser un valioso complemento en el proceso de cocción y así contribuir a la mejora de la calidad de los cereales cocidos.

Palabras clave: *Chenopodium quinoa*; cocción a vapor; optimización; superficie de respuesta; diseño factorial.

Abstract

Optimization of the steam quinoa cooking process was carried out, using a response surface design (RSM) 3-level: 3^k factorial, and the multiple response optimization methodology of the desirability function (Dx) was used to find the optimal region, which are improved tools to optimize the variables of a process, evaluate the maximization of the water absorption index (WAI), water solubility index (WSI), degree of gelatinization (GE) and the minimization of cotyledon detachment (DC) of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). The equipment used was a vertical cook with a steam generator, the study cooking variables, the steam pressure, and the cooking time. The optimal process values were: Pressure 1.5 kgf.cm⁻² and time 8 minutes for the best characteristics of cooked quinoa WSI of 26.411%, WAI of 7.960 (g.g⁻¹), GE of 89.245% and CD of 18.40%, the value of the desirability function as an indicator of multiple responses was 0.798. Knowledge of these characteristics can be a valuable complement in the cooking process and thus contribute to improving the quality of cooked cereals.

Keywords: *Chenopodium quinoa*; steam cooking; optimization; response surface; factorial design.

1. Introducción

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un pseudocereal tradicionalmente consu-

mido por las culturas andinas que está atrayendo la atención mundial como un alimento funcional. Por su alto contenido en proteínas, lípidos, fibra, vitaminas y minerales, y su excelente equilibrio de aminoácidos

Cite this article:

Huamani-H, A.L.; Ponce-Ramírez, J.C.; Málaga-Juárez, J. 2020. Optimización del proceso de cocción de quinua utilizando el diseño 3^k y la función de deseabilidad: Grado de gelatinización, índice de absorción de agua, índice de solubilidad y desprendimiento de cotiledones. Scientia Agropecuaria 11(3): 381-390.

* Corresponding author

E-mail: jorge.malaga@unsch.edu.pe (J. Málaga-Juárez).

esenciales, se ha encontrado que la quinua contiene numerosos fitoquímicos que incluyen saponinas, fitosteroles, fitoesteres, terpenoides, compuestos fenólicos y péptidos bioactivos. Estos compuestos pueden ejercer efectos beneficiosos sobre la salud metabólica, cardiovascular y gastrointestinal (Vilcacundo y Hernández-Ledesma, 2017). Los granos de quinua están compuestos de una sola semilla encerrada por un pericarpio exterior. La semilla de quinua contiene un perispermo central donde se localizan las reservas de carbohidratos, rodeadas por el embrión ricos en lípidos y rico en proteínas; el endospermo y la capa de semilla, el pericarpio de la quinua es rico en saponinas amargas (Graf et al., 2015).

En comparación con la mayoría de los cereales las semillas de quinua tienen un mayor valor nutricional relativamente ricas en proteínas, con un contenido que va entre 12% y 23%. La proteína de quinua compuesta por 37 % de globulina y 35% de albúmina (Kaspchak et al., 2017). El almidón fue caracterizado en 12,10% \pm 0,13 – 9,46% \pm 0,02 de amilosa y 87,90% \pm 0,13 – 90,54% \pm 0,02 de amilopectina por Jan et al. (2017). Valdez-Arana et al. (2020) obtuvieron en quinua blanca Hualhuas (15,35% \pm 0,05 amilosa, 84,65 \pm 0,05 amilopectina), rosada de Huancayo (14,33 % \pm 0,07 amilosa, 85,68 \pm 0,06 amilopectina) y en pasankalla (11,28 % \pm 0,06 amilosa, 88,73 \pm 0,06 amilopectina). El almidón es el principal componente nutritivo de muchos sustratos alimentarios y juega un papel importante en las propiedades funcionales y nutricionales de los alimentos procesados (Perez-Pacheco et al., 2014). El almidón es el componente principal de los granos de quinua, y representa el 58% - 64% del contenido de los granos de quinua. El contenido de amilosa en los granos varía del 4% al 25% (Qian y Kuhn, 1999; Watanabe et al. 2007). Estudios anteriores mostraron que la amilopectina de quinua tenía cantidades significativas de cadenas cortas y cadenas súper largas (Li y Zhu, 2017). El perfil de la cadena de amilopectina y el contenido de amilosa afectan las propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón de quinua. Los gránulos de almidón de la quinua son polígonos irregulares que varían en diámetro de 1 μ m a 3 μ m, y tienen menor cristalinidad que los gránulos de almidón de maíz (Ruales y Nair, 1994).

Los cereales al someterse a un proceso de cocción sean cual fuera la metodología, la manifestación de la cocción es a través del grado de gelatinización del almidón, también a nivel de los enlaces moleculares de amilosa y amilopectina del almidón se generan cambios, ese nivel de cambios se puede

cuantificar a través del índice de absorción de agua (WAI) como con el índice de solubilidad del almidón en agua (WSI). El WAI disminuye con el aumento de la temperatura probablemente se deba a la descomposición o degradación del almidón (Pelemebe et al., 2002). Se podría esperar que más cadenas de polímeros no dañadas y una mayor disponibilidad de grupos hidrofílicos, que podrían unir más agua, produjeran valores más altos de WAI en una hidrólisis incompleta o baja gelatinización (Jin et al., 1995). El índice de solubilidad en agua (WSI) a menudo se usa como indicador de degradación de componentes moleculares (Kirby et al., 1988). El WSI mide la cantidad de componentes solubles liberados del almidón después de la cocción. El alto WSI es un indicador in vitro de buena digestibilidad del almidón, ya que implica el grado de gelatinización y dextrinización (Guha et al., 1997). También puede medir el grado de conversión de almidón durante la cocción, que corresponde a la cantidad de polisacárido soluble liberado del gránulo de almidón (Ding et al., 2005).

Leite et al. (2017) obtuvieron un 31% de gelatinización en dispersión de agua los gránulos de almidón de guisante (33% de amilosa) a condiciones de 600 MPa / 15 min / 25 °C. Mota et al. (2016) demostraron la pérdida de minerales durante la cocción a vapor un 2% de minerales y a ebullición hasta un 20% en pseudocereales (quinua, amaranto y trigo sarraceno) y arroz (variedades Indica y Japónica).

Durante la cocción de la quinua a ebullición se genera problemas de desprendimiento excesivo del cotiledón y liberación del almidón gelatinizado, generando una apariencia no deseable cuando es deshidratado. Para preservar la calidad de los granos, se propone utilizar la cocción a presión de vapor saturado; por lo que el objetivo de esta investigación fue optimizar el proceso de cocción de quinua con vapor, considerando e grado de gelatinización del almidón, índice de absorción de agua, índice de solubilidad y desprendimiento de cotiledones de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) aplicando el diseño factorial de 3 niveles: 3^k y la función de deseabilidad.

2. Materiales y métodos

Las muestras utilizadas en la investigación fueron granos enteros de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) variedad negra ayrampo. Todos fueron cosechados en la región de Ayacucho-Perú.

2.1. Procedimiento experimental

Para la cocción de la quinua previamente se hizo un remojo por 24 horas, luego se lavó

con agua de la red para eliminar el sabor amargo y las saponinas y después se drenó en una malla. El cocinador vertical con generador de vapor (Vertical Type Sterilizer, Item: HL-340, Serial N° 806727, Gemmy Industrial Corp. U.S.A.) fue programado con la adición de 2 litros de agua destilada para la generación de vapor, la presión y tiempo de cocción según el diseño experimental planteado. Las muestras se colocaron en una canastilla de acero inoxidable en una cantidad de 250 g, seguidamente se procedió a la cocción. Las muestras de cada tratamiento de cocción, finalizado el tiempo de proceso fueron sometidos a secado ($T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), hasta eliminar toda la humedad, luego enfriadas, empacadas en bolsas de aluminio y almacenadas en ambiente frío y seco hasta su análisis, cada muestra con su código respectivo.

2.2. Metodología de análisis

2.2.1. Índice de absorción de agua (WAI) e índice de solubilidad en agua (WSI)

Metodología usada por [Ekielski et al. \(2020\)](#). Previamente se obtuvo el almidón de la quinua cocida, empleando la metodología propuesta por [Arzapalo y Huamán \(2014\)](#), se realizó una molienda de la quinua cocida y seca luego un tamizado para separar la parte sólida que es el embrión y la suspensión de la cual se separa el almidón del agua mediante centrifugado a 2000 RPM por 15 minutos, el almidón fue secado en estufa a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 7 horas. El almidón seco fue molido y tamizado en malla N° 80 ASTM (tamaño de partícula de $180\text{ }\mu\text{m}$). Se pesaron 2,5 g de almidón, se vertieron luego en agua destilada (25 ml) y se reposaron durante 20 minutos (se agitaron suavemente cada 5 minutos). Luego, las muestras preparadas se centrifugaron en una centrífuga de laboratorio (Centrifuga Microprocesada - Q222TM) con una carga de 3000 g durante 10 minutos. El sobrenadante obtenido se vertió en una placa Petri de peso conocido y se secó a $104\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 h (Estufa MEMMERT). Las muestras se pesaron en una balanza electrónica (0,0001-160 g, OHAUS - AS200, Serie 3526). El WAI se determinó como la relación entre el peso de la muestra empacada y el peso de la muestra seca original. El WSI se estableció como la relación del peso del sobrenadante seco con respecto al peso de la muestra seca original expresada como un porcentaje. Las pruebas se realizaron por triplicado para cada análisis.

WAI ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) = Peso de sedimento / Peso de sólido seco (Ec. 1)

WSI (%) = $100 \cdot (\text{Peso de sólido disuelto en suspensión} / \text{Peso de sólido seco})$ (Ec. 2)

2.2.2. Grado de gelatinización del almidón método usado por [Liu et al. \(2017\)](#) y modificación del método de [Birch y Priestley \(1973\)](#).

La determinación de grado de gelatinización se basó en la formación de un complejo de yodo azul con amilosa liberada durante la gelatinización.

Al almidón obtenido de la quinua cocida, mediante la metodología de [Arzapalo y Huamán \(2014\)](#), se realizó la molienda y tamizó en malla N° 80 ASTM (tamaño de partícula de $180\text{ }\mu\text{m}$). Se añadieron 50 mg de muestras a 50 ml de solución de KOH 0,05 M. La suspensión se centrifugó luego durante 10 minutos a 4000 rpm (Centrifuga Microprocesador - Q222TM), se añadieron partes alícuotas de 1 ml del sobrenadante a 1 ml de HCl 0,05 M y se completaron hasta 10 ml con agua desionizada. Luego se agregaron 0,1 mL de reactivo de yodo (1 g de yodo y 4 g de KI por 100 mL de agua desionizada), y después de mezclar la absorbancia se midió a 600 nm (espectrofotómetro UV/Vis 6850 de Jenway) contra un blanco de reactivo sin muestra. KOH (0,05 M) y HCl (0,05 M) fueron reemplazados por KOH 0,5 M y HCl 0,5 M en el grupo de control. El blanco de referencia se prepara con 10 ml de agua destilada y 0,1 ml del reactivo de yodo. El cálculo del grado de gelatinización fue utilizando la siguiente ecuación:

Grado de gelatinización (%) = $100 \cdot (A1/A2)$ (Ec. 3); donde A1 es la absorbancia del grupo de prueba a 600 nm y A2 es la absorbancia del grupo de control.

2.2.3. Desprendimiento de cotiledones (%)

Metodología que consistió en extraer una muestra de 50 g de quinua cocida, se contabilizaron los granos abiertos y cotiledones libres, luego se expresó como la relación de granos abiertos y cotiledones libres en total de granos de quinua en 50 gramos de muestra, expresado en porcentajes, utilizando la siguiente relación:

Cotiledones desprendidos (%) = $100 \cdot (\text{N}^{\circ} \text{ granos abiertos y cotiledones libres} / \text{N}^{\circ} \text{ granos en muestra de 50 g})$ (Ec. 4).

2.3. Metodología de superficie de respuestas múltiples

Como método estadístico fue usado la metodología de superficie de respuesta (RSM), factorial de 3 niveles: 3^k ($k = 2$ factores), para encontrar la región óptima, se usó la metodología de optimización de respuestas múltiples de función de deseabilidad ($D(x)$) ([Darvishi et al., 2020](#); [Kshirsagar et al., 2020](#); [Pandey et al., 2020](#)), ecuación (5). $D(x) = (Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)^{1/n} \dots$ (Ec. 5)

donde Y_i ($i = 1, 2 \dots n$) son los parámetros dependientes y ' n ' es el número total de ellos en la investigación. El valor de " D " varía de cero a uno. La validez del modelo se determinó mediante el análisis de varianza (ANOVA).

3. Resultados y discusión

La **Tabla 1** muestra la serie de resultados de 12 experimentos que se ejecutaron en el procedimiento de optimización. Se obtuvieron quinua cocida con diferentes propiedades físicas (índice de solubilidad en agua, índice de absorción de agua, grado de gelatinización y desprendimiento de cotiledones en granos) en diferentes condiciones de procesamiento (tiempo y temperatura). El objetivo fue encontrar un intervalo de presión y tiempo óptimo, para conseguir una cocción adecuada, a través de las restricciones de maximización del índice de solubilidad en agua (WSI), índice de absorción de agua (WAI), grado de gelatinización del almidón (GE) y minimización del desprendimiento de cotiledones (CD) en granos de quinua durante la cocción a vapor. Los valores extremos de las variables independientes del proceso de cocción como: tiempo de 2 a 10 minutos y presión de 1 a 2 kgf.cm^{-2} fueron valores elegidos en base ensayos preliminares.

Se observa un grado de gelatinización desde 50,4 % a 97,78 % muy variable para cada tratamiento en estudio, este comportamiento puede ser a la estructura morfológica e interna del grano, aparte de los factores de temperatura, presión, agitación, humedad. Los cambios morfológicos en forma general y la estructura interna del grano mostraron la gelatinización limitada y desigual del almidón durante la cocción (Zhu et al., 2020).

Comparando el WAI y GE , ambos valores son máximos a mayores presiones y tiempo, existe una correlación entre ambas variables esto concuerda con lo que manifiesta

Ekielski et al. (2020), el mayor grado de gelatinización del almidón se alcanza con el valor máximo de WAI , mientras que el aumento adicional del valor de WSI provoca la degradación del almidón y otros componentes. WAI es un índice que indica el volumen de agua que el almidón gelificado es capaz de absorber y retener durante su hidratación (Lin et al., 1997). De acuerdo con Mościcki et al. (2007), los valores máximos de WAI se alcanzan a aproximadamente 180 °C.

De acuerdo a los resultados de WSI obtenidos entre 23,83 a 26,42 %, valores que nos indican el nivel de hidrólisis térmica sufrido el almidón durante la cocción de quinua a las condiciones de proceso. Las propiedades funcionales del almidón están afectadas por la estructura interna de la amilopectina (Zhu y Liu 2019). WAI nos permite determinar el grado de gelatinización del almidón, mientras que WSI es una medida del grado de degradación del almidón (Ekielski et al., 2020).

La **Tabla 2** muestra los valores de los coeficientes de correlación del ajuste polinomial evaluado a través del análisis de varianza (ANOVA), fue realizado usando Matlab® 7.2 (Mathworks, Natick, MA). Los resultados muestran una significancia de valor-p menor al valor alfa (5%) o un nivel del 95% de confianza, para cada correlación de respuestas, que indica que los términos del modelo son significativos y existe una correlación de las variables independientes y dependientes. Además, observando los resultados de los coeficientes presenta un modelo estadístico de tipo cuadrático con 6 coeficientes para cada respuesta consistente en: índice de solubilidad en agua (WSI), índice de absorción de agua (WAI), grado de gelatinización del almidón (GE) y desprendimiento de cotiledones (DC), en función de la presión de vapor ($X1$) y tiempo ($X2$).

Tabla 1

Metodología de superficie de respuesta, diseño factorial de 3 niveles: 3^k y resultados de respuesta

Experimento	Tiempo (min)	Presión (kgf.cm^{-2})	WSI (%)	WAI (g.g^{-1})	GE (%)	CD (%)
1	2	1	23,82	4,95	50,4	14,73
2	2	1,5	24,54	7,05	62,5	13,87
3	2	2	24,25	7,54	59,87	20
4	6	1	25,44	6,69	79,13	17,08
5	6	1,5	26,42	7,52	79,07	16,6
6	6	2	26,24	7,93	80,01	20,4
7	10	1	24,74	7,66	92,6	20
8	10	1,5	25,86	8,11	97,78	21,03
9	10	2	26,42	8,32	95,75	24,08
10	6	1,5	26,27	7,43	79,62	16,68
11	6	1,5	26,25	7,5	79,53	17,87
12	6	1,5	26,38	7,83	79,27	16,47

Las temperaturas del vapor saturado que corresponden a las presiones de vapor empleadas: 1 kgf.cm^{-2} , 1,5 kgf.cm^{-2} y 2 kgf.cm^{-2} son 99 °C; 110,8 °C y 119,6 °C respectivamente.

Tabla 2

Análisis de la varianza de los modelos polinómicos predictivos para las respuestas durante la durante la cocción de quinua negra ayrampo

Factores		WSI(g.g ⁻¹)	WAI(%)	GE(%)	CD(%)
		coeficiente	coeficiente	coeficiente	coeficiente
Constante	β_0	18,758	-1,4066	9,6599	25,1239
X ₁ (Presión)	β_1	0,760	0,6199	7,4636	0,3457
X ₂ (Tiempo)	β_2	5,327	7,2792	40,9650	-19,4092
X ₁₂	β_{11}	-0,068	-0,0057	-0,1296	0,0471
X ₂₂	β_{22}	-1,765	-1,4450	-10,5750	8,1750
X ₁ X ₂	β_{12}	-0,156	-0,2413	-0,7900	-0,1487
R ²		0,994	0,962	0,984	0,957
valor-p		1,75e-06	3,53e-04	2,65e-05	5,014e-04

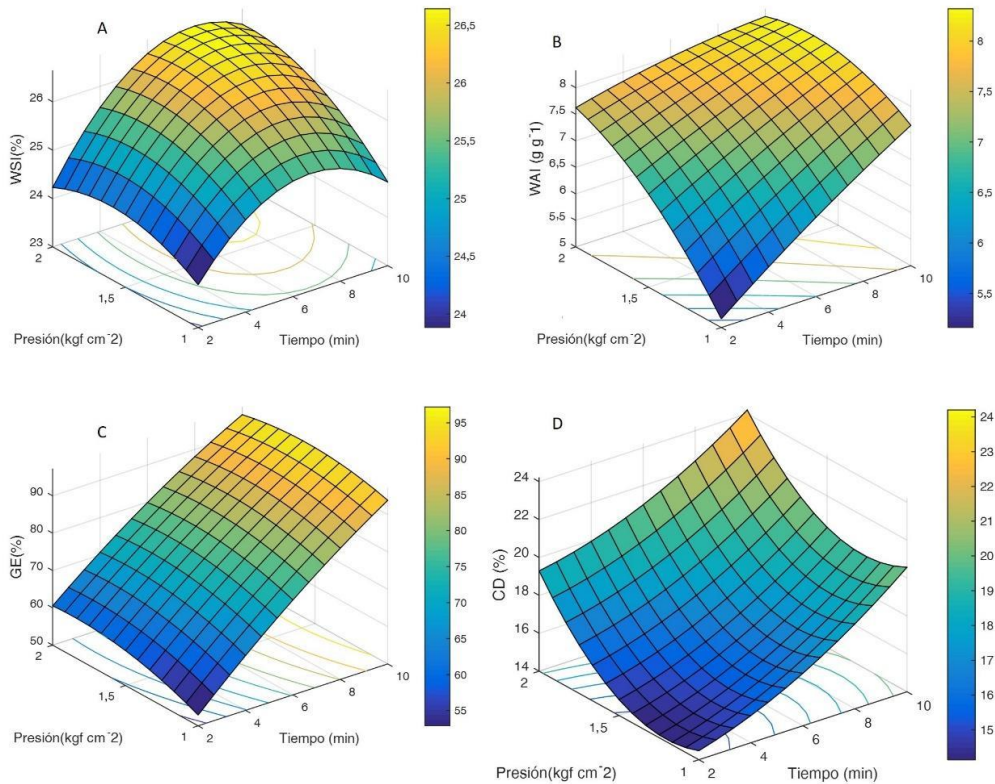


Figura 1. Superficie respuesta de: A-maximización de índice de solubilidad en agua, B-índice de absorción de agua, C- grado de gelatinización del almidón y D- minimización del desprendimiento de cotiledones de los granos de quinua.

La **Figura 1 A, B, C, D** muestran las gráficas de respuesta 3D obtenidas de los resultados de la maximización de índice de solubilidad en agua, índice de absorción de agua, grado de gelatinización del almidón y minimización del desprendimiento de cotiledones de los granos de quinua.

El comportamiento de la hidrólisis térmica del almidón de quinua en el proceso de cocción como son *WSI*, *WAI*, como de la *GE* podemos observar en la **Figura 1**, estos tienen diferentes comportamientos con las variables de presión de proceso, tiempo de proceso. La liberación de amilosa y amilopectina de su estructura molecular del almidón en un cereal durante la cocción se ve significativamente afectada por los métodos de

cocción, contenido de amilosa, amilopectina, el tamaño de peso molecular y el posterior a la cosecha (Li *et al.*, 2019). Ekielski *et al.* (2020) en Gritz de maíz extruido obtuvieron *WAI*/menores de 6,56 y *WSI* como máximo de 48,88%. Pardhi *et al.* (2016) en snack extruido a base de arroz obtuvieron *WAI* menor de 7,81 y *WSI* como máximo de 14,32%.

Altos valores de *WAI*, bajo *WSI*, indica un alto grado de gelificación de almidón (Dun *et al.*, 2020; Ekielski *et al.*, 2020). La gelatinización podría ser afectada por los otros componentes del contenido de un cereal como contenido de aceite y agua como manifiesta, Xu *et al.* (2020), que, durante el proceso de

calentamiento, las emulsiones podrían distribuirse alrededor de los gránulos de almidón, lo que restringe el hinchamiento de los gránulos de almidón. *WAI* nos permite determinar el grado de gelatinización del almidón, mientras que *WSI* es una medida del grado de degradación del almidón. El mayor grado de gelatinización del almidón se alcanza con el valor máximo de *WAI*, mientras que un mayor aumento del valor de *WSI* provoca la degradación tanto del almidón como de otros componentes (Ekielski *et al.*, 2020).

El valor de *WSI* aumenta debido a la mejor solubilidad en agua de partículas de menor tamaño (Mezreb *et al.*, 2003). Los valores *WSI* y *WAI* pueden verse afectados indirectamente por el tamaño inicial de las partículas de materia prima y otras propiedades físicas (Al-Rabadi *et al.*, 2011).

El *WAI* es un índice que indica el volumen de agua que el almidón gelificado es capaz de absorber y retener durante su hidratación (Lin *et al.*, 1997). El *WSI* alto es un indicador in vitro de buena digestibilidad del almidón, ya que implica el grado de gelatinización y dextrinización (Guha *et al.*, 1997). El *WAI* mide la cantidad de agua absorbida por el almidón y puede usarse como índice de gelatinización (Anderson *et al.*, 1970). *WAI* depende de la disponibilidad de grupos hidrofílicos que unen moléculas de agua en el almidón. Los gránulos de almidón de quinua podrían mantener su integridad bajo la temperatura de gelatinización. El poder de hinchazón de almidón es mayor, posiblemente cuando las partículas del almidón son pequeñas y fáciles de interactuar con las moléculas de agua (Jiang *et al.*, 2020).

Las diferencias de índice de solubilidad en agua entre los almidones pueden deberse a las variaciones entre sus distribuciones de longitud de cadena. Además, la amilopectina del almidón de quinua tiene cantidades significativas de cadenas cortas y cadenas súper largas (Li y Zhu, 2018). Las semillas de quinua de diferentes regiones también tienen cierto efecto en su calidad de almidón. Y la relación entre las propiedades fisicoquímicas y estructurales del almidón de quinua es incierta (Jiang *et al.*, 2020). Las vistas integradoras de las relaciones estructura-función de la estructura interna molecular de amilopectina podrían afectar las propiedades funcionales del almidón (Zhu y Liu, 2019).

El almidón se gelatiniza típicamente calentando en sistemas acuosos, resulta en una transición de fase irreversible por hidratación, hinchamiento y solubilización extensas de las moléculas de almidón, creando un

desorden de orden principalmente por la interrupción de los múltiples niveles de organización granular del gránulo de almidón (Xu *et al.*, 2020). Cuando el poder de hinchazón es mayor y menor el índice de solubilidad en agua, esta condición podría estar relacionada con el bajo contenido de amilosa, porque la amilosa restringe la hinchazón de los gránulos al reforzar la red interna (Tang *et al.*, 2002).

Los gránulos de almidón se hinchan gradualmente, y finalmente pierden su cristalinidad y organización molecular, lo que permite que las regiones amorfas sean más accesibles al agua y se hinchen en gran medida (Ai y Jane, 2015; Cai *et al.*, 2014).

Liu *et al.* (2019) demostraron que la gelatinización de los gránulos de almidón de trigo inició a una temperatura inferior a la temperatura de inicio de la endoterma de gelatinización. La interrelación entre el contenido de agua, la temperatura y el tiempo de calentamiento jugó un papel importante en la determinación del grado de gelatinización del almidón (Liu *et al.*, 2019). El grado de polimerización de la amilopectina es un factor estructural importante que puede afectar significativamente las propiedades de gelatinización del almidón (Zhang *et al.*, 2019).

Básicamente, la alta presión afecta significativamente a la estructura amorfa y ordenada del almidón. Podría estar relacionado con el limitado hinchamiento de los gránulos de almidón, ya que la estructura granular aún se mantiene. Sin embargo, el tratamiento térmico cambia las propiedades fisicoquímicas del almidón, tales como el aumento de solubilidad en agua y el desarrollo de un comportamiento viscoelástico (Pei-Ling *et al.*, 2010). El rango de presión en el que se produce la gelatinización es típico para cada tipo de almidón y depende en parte de su estructura cristalina. El grado de gelatinización aumenta con el aumento de la presión de tratamiento: la mayoría de los almidones (maíz, arroz y trigo) gelatiniza completamente a partir de 600 MPa (Pei-Ling *et al.*, 2010). Bauer y Knorr (2005) estudiaron el efecto combinado de la presión y el calor en la gelatinización de una gran variedad de almidones de cereales. Los resultados que obtuvieron indicaron que el grado de gelatinización depende de la presión aplicada, del contenido de humedad, del tiempo de tratamiento, de la temperatura, de la concentración y del tipo de almidón. La gelatinización del almidón normalmente se produce bajo el efecto del agua y el calor durante la cocción del arroz. Se produce en un intervalo de temperaturas de entre 55 y 80 °C dependiendo la variedad (Ahromrit *et al.*,

2007). Por su parte Huang *et al.* (2009) comprobaron cómo una combinación apropiada de presión y temperatura puede ser utilizada para facilitar la absorción de agua y la gelatinización. Los cambios en la morfología de los gránulos de almidón y los cuerpos proteicos en el grano durante la cocción indican la acción del almidón gelatinizado a los cuerpos proteicos (Zhu *et al.*, 2020). La disminución y el aumento de la temperatura de gelatinización se atribuyen principalmente a la estabilización estérica pero no a la adsorción competitiva de proteínas por el agua (Zhu *et al.*, 2020). Cuando el almidón se calienta en presencia de agua, se lleva a cabo un proceso irreversible llamado gelatinización en el que una serie de enlaces de hidrógeno de almidón son sustituidos por enlaces de almidón-agua (Pardhi *et al.*, 2016). La solubilidad del almidón es una consecuencia de la absorción de agua, seguido del hinchamiento del gránulo y del incremento de la temperatura. El índice de solubilidad indica el grado de asociación existente (enlaces intragranulares) entre los polímeros del almidón (amilosa y amilopectina) (Araujo *et al.*, 2004). La presión juega un rol importante durante el proceso, como manifiesta Ji *et al.* (2017), que la presión, podría

retrasar el proceso de gelatinización debido a un hinchamiento de los gránulos de almidón, un gel muy débil y una menor cantidad de amilosa liberada, en algunos casos no se libera y los gránulos de almidón tienden a conservar su forma. El almidón de quinua presenta temperaturas bajas de gelatinización (59,2 °C) (Li y Zhu, 2017a). El almidón en la quinua se almacena como gránulos semicristalinos discretos y consta de dos biopolímeros principales: amilosa lineal (20 - 30%) y amilopectina altamente ramificada (70 - 80%) (Zhao *et al.*, 2015). El contenido de amilosa y la estructura de amilopectina del almidón influyen fuertemente en sus propiedades fisicoquímicas y aplicaciones (Chen *et al.*, 2017). La gelatinización de almidón es un proceso irreversible, consta de hinchamiento granular, fusión cristalina nativa, pérdida de birrefringencia y solubilización del almidón (Ji *et al.*, 2017).

En las Figuras 2 y 3 se muestran los resultados físicos de cada tratamiento, podemos observar los niveles de desprendimiento de cotiledones y apertura de cubierta, los granos cocidos a mayor presión de vapor y tiempo son las que presentan mayor desprendimiento.

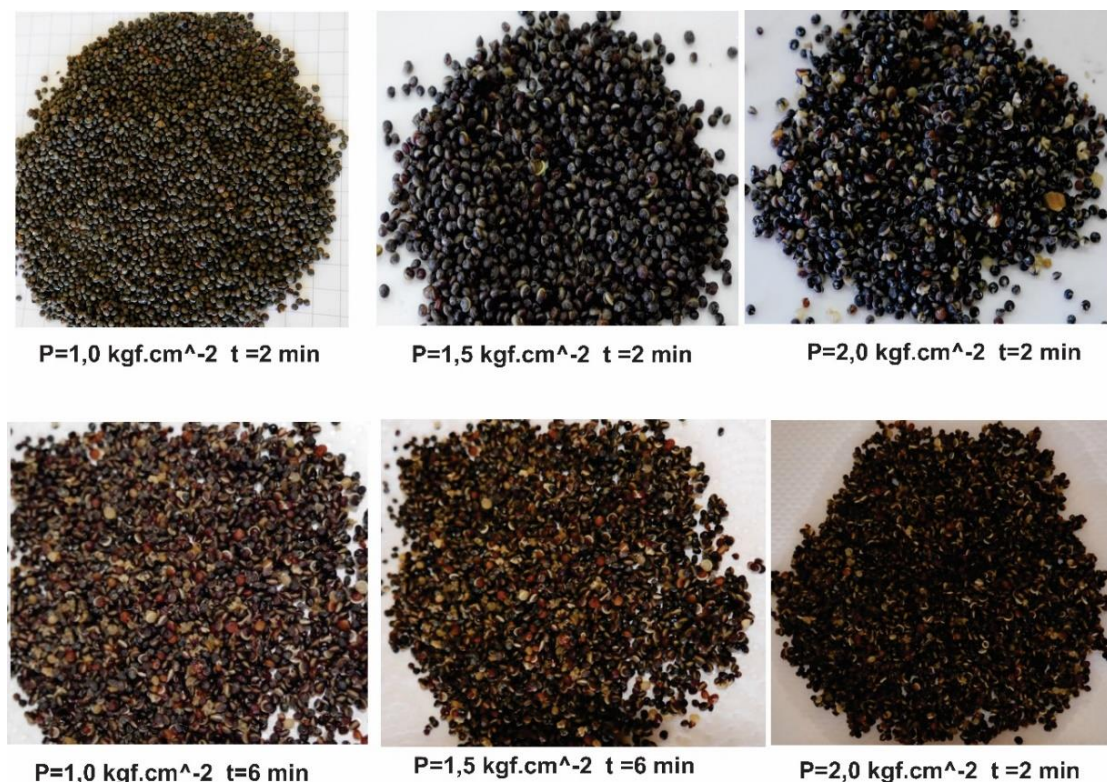


Figura 2. Resultado de desprendimiento de cotiledones (CD) de los tratamientos (1-6) de cocción de quinua con vapor saturado.

Tabla 3

Condiciones óptimas de operación y respuestas optimizadas por función de deseabilidad durante la cocción de quinua

Producto	Condiciones óptimas		Respuestas optimizadas				Dx max
	Presión (kgf.cm ⁻²)	Tiempo (min)	WSI (%)	WAI (g.g ⁻¹)	GE (%)	CD (%)	
Quinua	1,5	8	26,411	7,960	89,245	18,400	0,798



P=1,0 kgf.cm⁻² t=10 min



P=1,5 kgf.cm⁻² t=10 min



P=2,0 kgf.cm⁻² t=10 min



P=1,0 kgf.cm⁻² t=6 min



P=1,5 kgf.cm⁻² t=6 min



P=2,0 kgf.cm⁻² t=6 min

Figura 3. Resultado de desprendimiento de cotiledones (CD) de los tratamientos (7-12) de cocción de quinua con vapor saturado.

La **Figura 4** muestra la optimización de la función de deseabilidad (Dx) (Darvishi *et al.*, 2020; Kshirsagar *et al.*, 2020; Pandey *et al.*, 2020) como una sola función para las cuatro respuestas individuales: maximización del índice de solubilidad en agua (%), índice de absorción de agua (g.g⁻¹) y maximizar grado de gelatinización (%), minimización del desprendimiento de cotiledones (%), que también fueron aplicados en otros alimentos (Darvishi *et al.*, 2020; Kshirsagar *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2019; Pandey *et al.*, 2020).

La región de optimización determinada por la función conveniencia (D_x), puede observarse en la **Figura 4**, entre los rangos de presión (1,50 - 2,0 kgf.cm⁻²), y 6 - 10 minutos de cocción.

La **Tabla 3** muestra la condición de procesamiento óptima para la cocción de quinua que fue obtenida de acuerdo con las soluciones matemáticas de la función de conveniencia total considerando el criterio de optimización.

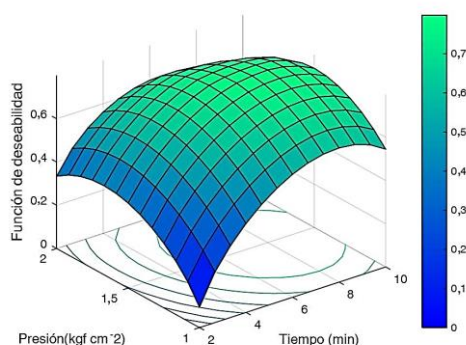


Figura 4. Función de deseabilidad en la optimización de cocción de quinua con vapor saturado.

Dadas las restricciones para la optimización de la función de conveniencia como es la maximización de WSI, WAI, GE y minimización de CD, la función de conveniencia total alcanza un valor de 0,798 el cual es un valor adecuado por el tipo de restricciones a la

optimización, el valor de gelatinización obtenido de 89,245% está muy cercano al valor máximo del 100% de un alimento totalmente cocido. El valor de la función de conveniencia total varía de 0 a 1, que dependerán de las restricciones planteadas al caso (Majdi et al., 2019). Según Cámara et al. (2016), el objetivo es encontrar las condiciones experimentales donde se cumplen todos los criterios, pero no necesariamente deseabilidad igual a 1,0. Las condiciones de deseabilidad se refieren a la zona experimental donde se cumplen los criterios, en mayor y menor medida, para el estudio las variables optimizadas del proceso son: Presión = 1,5 kgf.cm⁻² y Tiempo = 8 min para llegar a una cocción deseada, con las siguientes características físicas de la quinua cocida como son: *WSI* = 26,411%, *WAI* = 7,960 (g.g⁻¹), *GE* = 89,245% y *CD* = 18,40%.

4. Conclusiones

Se ha demostrado la correlación existente de las variables durante la cocción de quinua. La optimización en el proceso de cocción fue: presión de cocción de 1,55 kgf.cm⁻², tiempo de cocción de 8 minutos para obtener una maximización del grado de gelatinización del almidón del 89,24%, maximización del índice de absorción de agua de 7,96 (g/g), máximo valor de índice de solubilidad en agua de 26,411% y una minimización de desprendimiento del cotiledón del grano en 18,40%, la función de conveniencia total de 0,798. El conocimiento de estas características de un producto cocido puede ser un valioso complemento en el proceso de cocción y contribuir a la mejora de la calidad de los cereales cocidos. Se sugiere realizar estudios sobre de reacción de Maillard durante el proceso de cocción para evitar efectos nocivos en la alimentación.

ORCID

A.L. Huamani-H  <https://orcid.org/0000-0001-7076-0265>
 J.C. Ponce-Ramirez  <https://orcid.org/0000-0002-3723-0550>
 J. Málaga-Juarez  <https://orcid.org/0000-0002-9836-2282>

Referencias bibliográficas

- Ahromrit, A.; Ledward, D.A.; Niranjan, K. 2007. Kinetics of high pressure facilitated starch gelatinization in Thai glutinous rice. *Journal of Food Engineering* 79(3): 834-841.
- Ai, Y.; Jane, J.L. 2015. Gelatinization and rheological properties of starch. *Starch - Stärke* 67(3-4): 213-224.
- Al-Rabadi, G.J.; Torley, P.J.; Williams, B.A.; et al. 2011. Effect of extrusion temperature and pre-extrusion particle size on starch digestion kinetics in barley and sorghum grain extrudates. *Animal Feed Science and Technology* 168(3): 267-279.
- Anderson, R.A.; Conway, H.F.; Peplinski, A.J. 1970. Gelatinization of Corn Grits by Roll Cooking, Extrusion Cooking and Steaming. *Starch - Stärke* 22(4): 130-135.
- Araujo, C.; Rincón, A.M.; Padilla, F. 2004. Caracterización del almidón nativo de *Dioscorea bulbifera* L. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 54(2): 241-245
- Arzapalo, D.; Huamán, K.B. 2014. Extracción y caracterización de almidón de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) negra collana, pasankalla roja y blanca Junin. Universidad Nacional del Centro del Perú. 114-116.
- Bauer, B.A.; Knorr, D. 2005. The impact of pressure, temperature and treatment time on starches: pressure-induced starch gelatinization as pressure time temperature indicator for high hydrostatic pressure processing. *Journal of food engineering* 68(3): 329-334.
- Cai, C.; Cai, J.; Zhao, L.; et al. 2014. In situ gelatinization of starch using hot stage microscopy. *Food Science and Biotechnology* 23(1): 15-22.
- Cámara, M.S.; De Zan, M.M.; Vera Candiote, L.; et al. 2016. Diseño experimental y optimización de sistemas con múltiples respuestas. Facultad de bioquímica y ciencias biológicas. Universidad Nacional del Litoral. Argentina.
- Chen, P.; Xie, F.; Zhao, L.; et al. 2017. Effect of acid hydrolysis on the multi-scale structure change of starch with different amylose content. *Food Hydrocolloids* 69: 359-368.
- Darvishi, H.; Farhudi, Z.; Behroozi-Khazaei, N. 2020. Multi-objective optimization of savory leaves drying in continuous infrared-hot air dryer by response surface methodology and desirability function. *Computers and Electronics in Agriculture* 168: 105-112.
- Ding, Q.B.; Ainsworth, P.; Tucker, G.; et al. 2005. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice based expanded snacks. *J. Food Eng.* 66: 283-289.
- Dun, H.; Liang, H.; Zhan, F.; et al. 2020. Influence of O/W emulsion on gelatinization and retrogradation properties of rice starch. *Food Hydrocolloids* 103: 105-152.
- Ekielski, A.; Żelaziński, T.; Siwek, A.; et al. 2020. Formulation and Characterization of Corn Grits-Propylene Glycol Extrudates. *Materials Today: Proceedings* 21: 1772-1780.
- Graf, B.L.; Rojas-Silva, P.; Rojo, L.E.; et al. 2015. Innovations in Health Value and Functional Food Development of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Compr Rev Food Sci Food Saf* 14(4): 431-445.
- Guha, M.; Ali, S.Z.; Bhattacharya, S. 1997. Twin-screw extrusion of rice flour without a die: effect of barrel temperature and screw speed on extrusion and extrudate characteristics. *Journal of Food Engineering* 32(3): 251-267.
- Huang, S.L.; Jao, C.L.; Hsu, K.C. 2009. Effects of hydrostatic pressure/heat combinations on water uptake and gelatinization characteristics of japonica rice grains: a kinetic study. *J Food Sci* 74(8): 442-448.
- Jan, K.N.; Panesar, P.S.; Rana, J.C.; et al. 2017. Structural, thermal and rheological properties of starches isolated from Indian quinoa varieties. *International Journal of Biological Macromolecules* 102: 315-322.
- Ji, Z.; Yu, L.; Liu, H.; et al. Food Hydrocolloids Effect of pressure with shear stress on gelatinization of starches with different amylose / amylopectin ratios. *Food Hydrocolloids* 72: 331-337.
- Jiang, F.; Du, C.; Guo, Y.; et al. 2020. Physicochemical and structural properties of starches isolated from quinoa varieties. *Food Hydrocolloids* 101: 105-115.
- Jin, Z.; Hsieh, F.; Huff, H.E.; 1995. Effects of soy fiber, salt, sugar, and screw speed on physical properties and microstructure of cornmeal extrudate. *J. Cereal Sci.* 22: 185-194.
- Kaspchak, E.; Oliveira, M.A.S.D.; Simas, F.F.; et al. 2017. Determination of heat-set gelation capacity of a

- quinoa protein isolate (*Chenopodium quinoa*) by dynamic oscillatory rheological analysis. *Food Chem* 232: 263-271.
- Kirby, A.R.; Ollett, A.L.; Parker, R.; et al. 1988. An experimental study of screw configuration effects in the twin-screw extrusion-cooking of maize grits. *J. Food Eng.* 8: 247-272.
- Kshirsagar, M.P.; Kalamkar, V.R.; Pande, R.R. 2020. Multi-response robust design optimization of natural draft biomass cook stove using response surface methodology and desirability function. *Biomass and Bioenergy* 135: 105-107.
- Leite, T.S.; De Jesus, A.L.T.; Schmiele, M.; et al. 2017. High pressure processing (HPP) of pea starch: Effect on the gelatinization properties. *LWT - Food Science and Technology* 76: 361-369.
- Li, G.; Zhu, F. 2017. Amylopectin molecular structure in relation to physicochemical properties of quinoa starch. *Carbohydr Polym* 164: 396-402.
- Li, G.; Zhu, F. 2018. Quinoa starch: Structure, properties, and applications. *Carbohydr Polym* 181: 851-861.
- Li, H.; Lei, N.; Yan, S.; et al. 2019. Molecular causes for the effect of cooking methods on rice stickiness: A mechanism explanation from the view of starch leaching. *International Journal of Biological Macromolecules* 128: 49-53.
- Lin, S.; Hsieh, F.; Huff, H.E. 1997. Effects of Lipids and Processing Conditions on Degree of Starch Gelatinization of Extruded Dry Pet Food. *LWT - Food Science and Technology* 30(7): 754-761.
- Liu, K.; Liu, Q. 2020. Enzymatic determination of total starch and degree of starch gelatinization in various products. *Food Hydrocolloids* 103: 105-139.
- Liu, Y.; Yu, J.; Copeland, L.; et al. 2019. Gelatinization behavior of starch: Reflecting beyond the endotherm measured by differential scanning calorimetry. *Food Chem* 284: 53-59.
- Liu, Y.; Chen, J.; Luo, S.; et al. 2017. Physicochemical and structural properties of pregelatinized starch prepared by improved extrusion cooking technology. *Carbohydrate Polymers*. 175: 265-272.
- Majdi, H.; Esfahani, J.A.; Mohebbi, M. 2019. Optimization of convective drying by response surface methodology. *Computers and Electronics in Agriculture* 156: 574-584.
- Mezreb, K.; Goullieux, A.; Ralainirina, R.; et al. 2003. Application of image analysis to measure screw speed influence on physical properties of corn and wheat extrudates. *Journal of Food Engineering* 57(2): 145-152.
- Mota, C.; Nascimento, A.C.; Santos, M.; et al. 2016. The effect of cooking methods on the mineral content of quinoa (*Chenopodium quinoa*), amaranth (*Amaranthus sp.*) and buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). *Journal of Food Composition and Analysis* 49: 57-64.
- Mościcki, L.; Mitrus, M.; Wójtowicz, A. 2007. Technika ekstruzji w przemyśle rolno-spożywczym. PWRiL, Warszawa, ISBN 978-83-09-01027-2.
- Pardhi, A.; Baljit, B.; Gulzar C.; Dar, D. 2016. Evaluation of functional properties of extruded snacks developed from brown rice grits by using response surface methodology. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences JSSAS* 249: 1-11
- Pandey, A.; Gupta, A.; Sunny, A.; et al. 2020. Multi-objective optimization of media components for improved algae biomass, fatty acid and starch biosynthesis from *Scenedesmus sp.* ASK22 using desirability function approach. *Renewable Energy* 150: 476-486.
- Pei-Ling, L.; Xiao-Song, H.; Qun, S. 2010. Effect of high hydrostatic pressure on starches: A review. *Starch - Stärke* 62(12): 615-628.
- Pelembe, L.A.M.; Erasmus, C.; Taylor, J.R.N. 2002. Development of a protein-rich composite sorghum cowpea instant porridge by extrusion cooking process. *LWT-Food Sci. Technol.* 35: 120-127.
- Perez-Pacheco, E.; Moo-Huchin, V.M.; Estrada-Leon, R.J.; et al. 2014. Isolation and characterization of starch obtained from *Brosimum alicastrum* Swartz seeds. *Carbohydr Polym* 101: 920-927.
- Qian, J.; Kuhn, M. 1999. Characterization of *Amaranthus cruentus* and *Chenopodium quinoa* Starch. *Starch - Stärke* 51(4): 116-120.
- Ruales, J.; Nair, B.M. 1994. Properties of starch and dietary fibre in raw and processed quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd.) seeds. *Plant Foods for Human Nutrition*, 45(3): 223-246.
- Tang, H.; Watanabe, K.; Mitsunaga, T. 2002. Characterization of storage starches from quinoa, barley and adzuki seeds. *Carbohydrate Polymers* 49: 13-22.
- Valdez-Arana, J.D.C.; Steffolani, M.E.; Repo-Carrasco-Valencia, R.; et al. 2020. Physicochemical and functional properties of isolated starch and their correlation with flour from the Andean Peruvian quinoa varieties. *International Journal of Biological Macromolecules* 147: 997-1007.
- Vilcacundo, R.; Hernández-Ledesma, B. 2017. Nutritional and biological value of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Current Opinion in Food Science* 14: 1-6.
- Watanabe, K.; Peng, N.L.; Tang, H.; Mitsunaga, T. 2007. Molecular Structural Characteristics of Quinoa Starch. *Food Science and Technology Research* 13(1): 73-78.
- Xu, J.; Blennow, A.; Li, X.; et al. 2020. Gelatinization dynamics of starch in dependence of its lamellar structure, crystalline polymorphs and amylose content. *Carbohydrate Polymers* 229: 115-181.
- Zhang, Y.; Li, B.; Zhang, Y.; et al. 2019. Effect of degree of polymerization of amylopectin on the gelatinization properties of jackfruit seed starch. *Food Chem* 289: 152-159.
- Zhao, Y.; Li, N.; Li, B.; et al. 2014. Reduced expression of starch branching enzyme IIa and IIb in maize endosperm by RNAi constructs greatly increases the amylose content in kernel with nearly normal morphology. *Planta* 241(2): 449-461.
- Zhu, F.; Liu, P. 2019. Starch gelatinization, retrogradation, and enzyme susceptibility of retrograded starch: Effect of amylopectin internal molecular structure. *Food Chem*. 316: 126036.
- Zhu, L.; Wu, G.; Cheng, L.; et al. 2020. Investigation on molecular and morphology changes of protein and starch in rice kernel during cooking. *Food Chem* 316: 126-162.