

ARTÍCULO ORIGINAL

Análisis del valor de pasteurización del puré de camote mediante simulación numérica y pruebas experimentales

Analysis of the pasteurization value of sweet potato puree by numerical simulation and experimental tests.

Kevin Agurto¹ , William Miranda²  y Luis Vilcherrez¹ 

RESUMEN

En esta investigación se realizó una simulación numérica del tratamiento térmico y pasteurización de puré de camote, enfocándose en la distribución de calor en diferentes ubicaciones del baño maría (centro, izquierda y derecha). Se identificó que la posición central presentó la mayor velocidad de calentamiento ($f_h = 47,0521$ min). El puré se elaboró a partir de la pulpa del camote y se determinó que el punto más lento en calentarse fue el centro geométrico del recipiente cilíndrico de vidrio. Al comparar los resultados experimentales con la simulación por elementos finitos, se observaron pequeñas discrepancias en los valores del factor de retraso (j_h) con una variación de $\Delta = 0,0235$ y del f_h con $\Delta = 0,7$ min. Sin embargo, el coeficiente de determinación R^2 cercano a 1 y un error cuadrático medio de $1,063$ °C indicaron una buena precisión en las predicciones. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en la posición central, pero no en los laterales. Finalmente, al comparar dos formulaciones T1 (puré puro) y T2 (puré con 0,075% de CMC y 0,075% de almidón de maíz) se identificaron diferencias sensoriales en color, consistencia, aroma y sabor, aunque algunos atributos resultaron similares.

Palabras clave: pasteurización; tratamiento térmico; simulación térmica; distribución de calor; transferencia térmica

ABSTRACT

In this research, a numerical simulation of the heat treatment and pasteurization of sweet potato puree was carried out, focusing on the heat distribution in different locations of the water bath (center, left and right). It was identified that the central position presented the highest heating rate ($f_h = 47.0521$ min). The puree was made from sweet potato pulp and it was determined that the slowest point to heat up was the geometric center of the cylindrical glass vessel. When comparing the experimental results with the finite element simulation, small discrepancies were observed in the values of the delay factor (j_h) with a variation of $\Delta = 0.0235$ and of the f_h with $\Delta = 0.7$ min. However, the coefficient of determination R^2 close to 1 and a mean square error of 1.063 °C indicated a good accuracy in the predictions. Significant differences ($p < 0.05$) were found at the central position, but not at the lateral ones. Finally, when comparing two formulations T1 (pure puree) and T2 (puree with 0.075% CMC and 0.075% corn starch), sensory differences in color, consistency, aroma and flavor were identified, although some attributes were similar.

Keywords: Pasteurization; Heat treatment; Thermal simulation; Heat distribution; Thermal transfer

*Autor de correspondencia

¹ Universidad Nacional de Frontera, Perú. Email: kevinagurtope17a@gmail.com, vlcherrezarbuloluis@gmail.com

² Universidad Nacional de Piura, Perú. Email: wimiza23@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

El almidón es un recurso ampliamente disponible, renovable, económico y biodegradable que se encuentra en granos, semillas, frutas, tubérculos y raíces de cereales en forma de gránulos insolubles en agua fría (de Oliveira et al., 2018). Entre los productos ricos en almidón se encuentra la batata (*Ipomoea batatas*), un tubérculo ampliamente cultivado que destaca por su valor nutricional, siendo fuente de vitaminas B, C y E, además de contener minerales como hierro y zinc. Por otro lado, los métodos térmicos como la pasteurización tradicional o la esterilización por calor de conservas de frutas y verduras, permiten obtener productos seguros y duraderos, pero provocan cambios significativos en sus propiedades organolépticas (color, sabor, aroma, textura) y en su composición química (Marszałek et al., 2017).

En el procesamiento de alimentos, los métodos térmicos como la pasteurización o la esterilización permiten prolongar la vida útil y garantizar la inocuidad microbiológica. Sin embargo, estos tratamientos pueden generar efectos adversos sobre la calidad sensorial y nutricional de los alimentos, alterando parámetros como el color, sabor, textura y la concentración de compuestos bioactivos. En el caso de la batata, diversos estudios han demostrado que la aplicación de calor puede modificar significativamente la composición de nutrientes, como el contenido de proteínas, almidones y azúcares simples, dependiendo del tipo de cocción empleado (Vidal et al., 2018). Estas transformaciones pueden afectar tanto el valor nutricional como la aceptación del producto final por parte del consumidor.

El tratamiento térmico es un proceso en el que la materia prima se someten a ciclos de alta temperatura que afectan el reordenamiento de la estructura molecular, lo que puede conducir a la transformación de la estructura secundaria de la proteína o la ruptura de los enlaces secundarios utilizados para mantener la estructura espacial de la proteína. (Li et al., 2020).

En este contexto, el modelado computacional mediante dinámica de fluidos (CFD) se presenta como una herramienta eficiente para simular el comportamiento térmico del alimento durante el procesamiento, permitiendo predecir y optimizar condiciones de operación sin necesidad de recurrir exclusivamente a ensayos experimentales costosos. Mediante el uso de CFD, es posible obtener información detallada sobre la mecánica y la química de los fluidos, lo cual resulta valioso para el diseño, la optimización y la modificación de los aspectos del sistema de reacción (Hemamanjushree & Tippavajhala, 2020).

Existen métodos de conservación térmica que permiten obtener conservas seguras y con una vida útil prolongada; sin embargo, estas técnicas generan modificaciones significativas en las características organolépticas y químicas de los alimentos. En el presente estudio, se considera el puré de camote como objeto de análisis mediante el modelamiento del tratamiento térmico. Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo simular numéricamente el tratamiento térmico del puré de batata, a fin de analizar su

comportamiento frente al calor y evaluar posibles alteraciones en sus propiedades, contribuyendo así a un procesamiento más controlado y eficiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

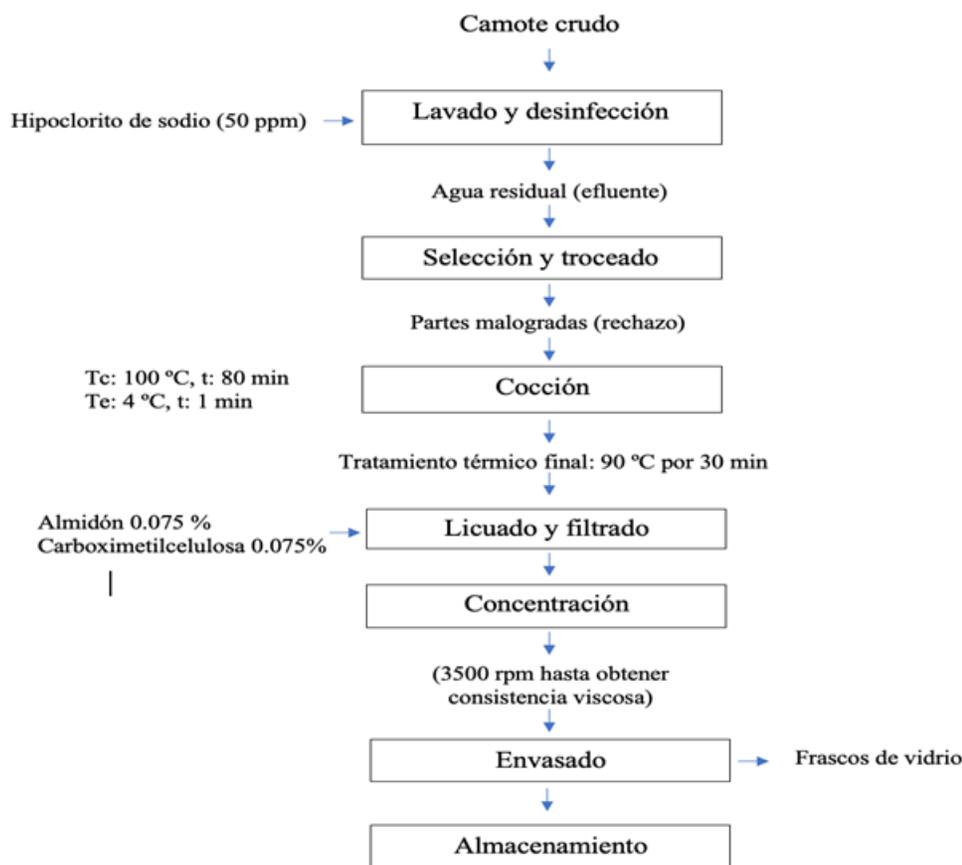
La variedad de camote amarillo utilizada en este estudio fue adquirida en el supermercado Makro de la provincia de Sullana, ubicada en el departamento de Piura. Se verificó cuidadosamente que estuviera en buen estado, sin daños mecánicos ni señales de contaminación o deterioro. Además, se obtuvieron el almidón de maíz y la carboximetilcelulosa en el mismo mercado de la provincia de Sullana, departamento de Piura.

En cuanto a los materiales empleados en la investigación, se adquirieron envases de vidrio de 250 mL en el Supermercado Makro de Sullana. Se utilizaron sensores de termopar tipo PCsensor Interfax USB con cable, fabricados por la marca LIMITED en China, capaces de medir temperaturas en un rango de -40°C a $+125^{\circ}\text{C}$.

Dado que se utilizó una MacBook con sistema operativo MacOs, fue necesario emplear el programa Parallel's Desktop con Windows 11. Es esencial realizar la medición de la constante de tiempo (τ) antes de utilizar el sensor, ya que este parámetro desempeña un papel crucial en el rendimiento dinámico, estando estrechamente relacionado con la transferencia de calor, según lo mencionado por Li et al. (2018).

Además, se utilizó el registrador TEMper V27.5 para registrar la temperatura la cual se empleada para medir el tiempo de retención (τ). Los resultados correspondientes se muestran en la Tabla 1, revelando que los valores obtenidos son muy similares para todos los sensores.

Preparación del puré de camote



Prueba de distribución de calor

Para llevar a cabo la pasteurización, se siguió el método de baño maría conforme a las directrices del Instituto de Especialistas en Tratamiento Térmico (IFTPS). Se conectó un termómetro USB PC Sensor a una laptop MacBook, colocándolo en tres áreas específicas dentro del baño maría. El proceso se ejecutó a una temperatura de 95 °C, deteniéndose al alcanzar la temperatura deseada. Los termopares se fijaron en tapas de metal y se sellaron las perforaciones con silicona acética para resistir las altas temperaturas. La temperatura se registró mediante el software TEMperCOM_V.27.5 con intervalos de 60 segundos. La Zona de Linealidad de Calentamiento (ZLC) se determinó mediante el índice de velocidad de incremento de temperatura (fh), calculado a partir de la curva de calentamiento. Posteriormente, se llevará a cabo la prueba de entrada de calor colocando 6 envases y un sensor en el centro de cada uno, registrando los datos con el software TEMper V27.5. (Tucker y Featherstone, 2021).

Ecuación (1):

$$f_h = -\left(\frac{1}{m}\right)$$

Donde:

- f_h : Es el factor de velocidad de calentamiento, expresado en minutos. Un valor de f_h más alto indica una transferencia de calor más lenta hacia el centro térmico del producto.
- m : Es la pendiente de la porción lineal de la curva de calentamiento, obtenida al graficar $\log_{10}(T_r - T)$ versus tiempo (t). La pendiente es negativa, por lo que se toma su valor absoluto.

Estudio experimental de la temperatura

En cada frasco de vidrio de 250 ml y 200 gramos, se dejó un espacio de 1 cm en la parte superior durante el procesamiento térmico para evitar rupturas del recipiente. Se introdujo un sensor de temperatura en la tapa sellada con silicona acética para monitorear la temperatura durante el proceso. Además, se colocó otro sensor cerca del recipiente para medir la temperatura de la retorta. Los datos se registraron a intervalos de 60 segundos durante el calentamiento y enfriamiento. El tiempo de inactivación térmica "F" se calculó según la ecuación 2, considerando la temperatura en un instante específico, la temperatura de referencia y el valor z (Farazbakht et al., 2017).

Ecuación (2):

$$P_0 = \int_0^t 10^{\frac{T-Tr}{z}}$$

Donde:

- P_0 : valor de letalidad acumulado (min)
- T : temperatura del producto en el tiempo t (°C)
- T_r : temperatura de referencia (°C), típicamente 93,3 °C para mohos termorresistentes como *Byssochlamys fulva*
- z : valor z , incremento de temperatura necesario para reducir el tiempo de inactivación en un factor de 10 (°C)
- t : tiempo total del tratamiento térmico (min)

Se determinó el factor de retraso de calentamiento (j_h) mediante la ecuación 3, que representa el tiempo adicional necesario para que la temperatura del envase se ajuste a las variaciones ambientales (Nedamani et al., 2018).

Ecuación (3):

$$j_h = \frac{T_r - T_m}{T_r - T_i}$$

Donde:

- j_h : Es el factor de retardo o factor de inercia, un valor adimensional. Un valor de j_h mayor a 1 indica que hay un "retraso" inicial en el calentamiento del centro térmico, mientras que un valor cercano a 1 sugiere un calentamiento más rápido desde el inicio.
- T_r : Es la temperatura de la retorta (medio de calentamiento), expresada en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).
- T_m : Es la temperatura del "cero corregido" del producto, o la temperatura que tendría el centro térmico en el tiempo cero si el calentamiento hubiera seguido una cinética lineal desde el principio (extrapolación de la línea recta de calentamiento al tiempo cero en el eje de temperatura). Expresada en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).
- T_i : Es la temperatura inicial del producto en el envase, expresada en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$)

Se procedió con la simulación del tratamiento térmico del puré mediante la evaluación de la transferencia de calor por conducción, utilizando el método de elementos finitos para resolver la ecuación de energía. Esta metodología permitió obtener datos precisos y confiables sobre el comportamiento térmico del sistema. Para llevar a cabo esta tarea, se diseñó un modelo cilíndrico en 2D que fue transformado a 3D, con un volumen aproximado de 250 mL. El cilindro tenía 5,36 cm de diámetro y 6,72 cm de altura. El mallado automático generó 1755 elementos y 8149 nodos.

Para ello se empleó el software Ansys 2023. La instalación de la versión R1 del software Ansys Inc., una herramienta de origen estadounidense, se realizó en una computadora portátil MacBook equipada con Parallels Desktop y Windows 11. Las especificaciones de la MacBook incluyen un procesador Intel Core i3 de dos núcleos a 1.1 GHz, 8 GB de memoria RAM LPDDR4X a 3733 MHz, y el sistema operativo macOS 13.2.1 (22D68).

Las condiciones para el análisis de transferencia de calor

- a) Según la investigación de Shafiekhani et al. (2016), el puré se caracteriza por tener una textura uniforme y un comportamiento homogéneo en todas las direcciones, siendo preparado con una combinación de 1% de CMC y almidón de maíz.
- b) Tanto el alimento como la retorta inician con una temperatura inicial uniforme, registrando $17,31\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $18,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente en todo su volumen.
- c) El envase utilizado posee una forma cilíndrica perfectamente definida.
- d) El material del envase, vidrio, presenta una resistencia térmica insignificante, asegurando que la temperatura de las paredes del envase sea igual a la de la retorta.
- e) Las propiedades termo físicas del alimento (densidad $\rho = 1088,2\text{ kg/m}^3$, capacidad calorífica $C_p = 3457,9\text{ J/kg }^{\circ}\text{C}$, conductividad térmica $k = 0,6\text{ W/m }^{\circ}\text{C}$) se consideran constantes según los modelos de Choi y Okos (da Silva et al., 2020).
- f) La transferencia de calor en el producto se produce exclusivamente por conducción.

g) El coeficiente de convección del vapor de agua en la retorta se mantiene constante en 2500 W/m² K según Kosky et al. (2013), afectando todas las superficies de la retorta.

h) No se considera el espacio de cabeza ni la interacción aire-vapor de agua en la retorta, ya que no tienen un impacto significativo en los resultados de la simulación según Farazbakht et al. (2017).

Solución numérica

Luego de establecer las condiciones relevantes, se ingresó la información del perfil tiempo-temperatura de la retorta para iniciar la construcción del modelo matemático. Este proceso duró 8340 segundos (139 minutos), con registros en cada posición del baño maría por separado. Se generó un gráfico del perfil temporal en relación con la temperatura del alimento, mostrando los valores mínimo, máximo y promedio. Además, se configuró una visualización de 100 fotogramas durante 10 segundos para observar el comportamiento del alimento y definir el Punto de Localización Central (PLC). Posteriormente, se compararon los resultados experimentales con los datos simulados del perfil tiempo-temperatura, el PLC, el valor P, el tiempo de proceso, fh y jh.

Evaluación sensorial de puré

Para evaluar la aceptación sensorial del puré de camote sometido a tratamiento térmico con la adición de CMC y almidón de maíz, se llevó a cabo una evaluación sensorial por parte de 120 panelistas tipo consumidor. Esta evaluación se realizó después de completar los procedimientos de baño maría y enfriamiento del puré. Los parámetros sensoriales evaluados incluyeron el sabor, la textura, la apariencia, el aroma y la aceptabilidad general del puré. Se utilizó una prueba hedónica de preferencia "me gusta" o "no me gusta" para cada uno de estos parámetros. Cada panelista recibió aproximadamente 20 g de muestra etiquetada con códigos numéricos aleatorios para evitar sesgos en la evaluación. Además, se creó un entorno sin distracciones para garantizar una evaluación precisa. Para evitar la influencia de sabores residuales, se proporcionaron galletas saladas y agua para limpiar el paladar entre la degustación de cada muestra (Khurshida & Deka, 2022).

Análisis de datos

Se evaluará la precisión del modelo desarrollado con Ansys mediante el coeficiente de determinación R² y una validación experimental de los resultados simulados, utilizando la raíz cuadrada media del error (RMSE) propuesta por Rodríguez-Ramos et al. (2021).

Ecuación (4):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - E_i)^2}$$

Donde:

- RMSE: Es la Raíz Cuadrada Media del Error. Representa la desviación estándar de los residuos (errores de predicción).
- n: Es el número total de observaciones.
- P_i : Es el valor predicho o simulado por el modelo (en este contexto, el modelo desarrollado con Ansys) para la i -ésima observación.
- E_i : Es el valor experimental para la i -ésima observación.
- $\sum_{i=1}^n$: Denota la sumatoria desde la primera observación ($i=1$) hasta la última observación ($i=n$).
- $(P_i - E_i)^2$: Es la diferencia al cuadrado entre el valor predicho y el valor experimental para la i -ésima observación.
- $n \sum_{i=1}^n (P_i - E_i)^2$: Representa el promedio de los errores al cuadrado, también conocido como el Error Cuadrático Medio (MSE).
- $\sqrt{\quad}$: Indica la raíz cuadrada, que devuelve la métrica a las unidades originales de los datos.

Se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes, con un nivel de significancia del 5 %, utilizando Microsoft Excel Office 2019, para comparar los conjuntos de datos entre los tratamientos evaluados. Dado que se trabajó con dos tratamientos, se consideró dicha prueba solo si los datos cumplían con los supuestos de normalidad (datos paramétricos); en caso contrario, se empleó la prueba no paramétrica de Mann–Whitney. El análisis estadístico se realizó con IBM SPSS Statistics 22 y Microsoft Excel 2019.

RESULTADOS

Figura 1

Representación simulada del perfil de tiempo y temperatura de puré

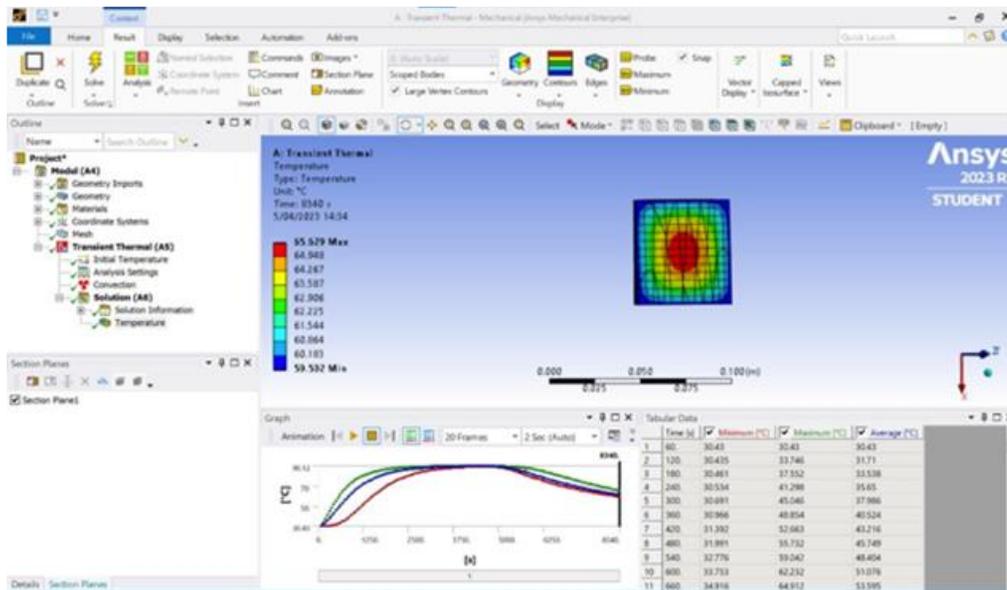
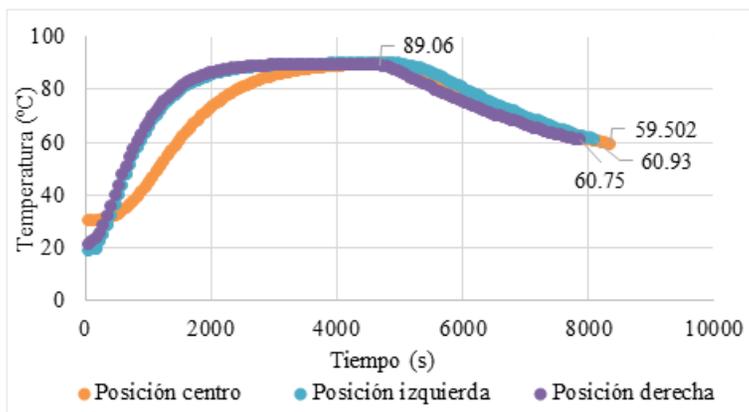


Figura 2

Distribución de calor a los 8340 s en las tres posiciones del baño maría.



Nota. Los resultados de la prueba de distribución de calor, mostrados en la Figura 1, indican que, desde el inicio del proceso, todas las posiciones del baño maría experimentaron un aumento gradual de la temperatura hasta llegar a los 95°C. Específicamente, se detectó que el calentamiento en la posición central fue más lento.

Tabla 1

El valor de f_h en las posiciones derecha, central e izquierda del baño maría.

Posición	f_h (min)
Izquierda	32,7150
Centro	47,0521
Derecha	31,7218

Nota. El valor f_h más alto, de 47,0521 minutos, se observó en la posición central, por lo que se denominó como la PLC.

Figura 3

PLC en el modelo desarrollado en sus puntos máximo y mínimo.

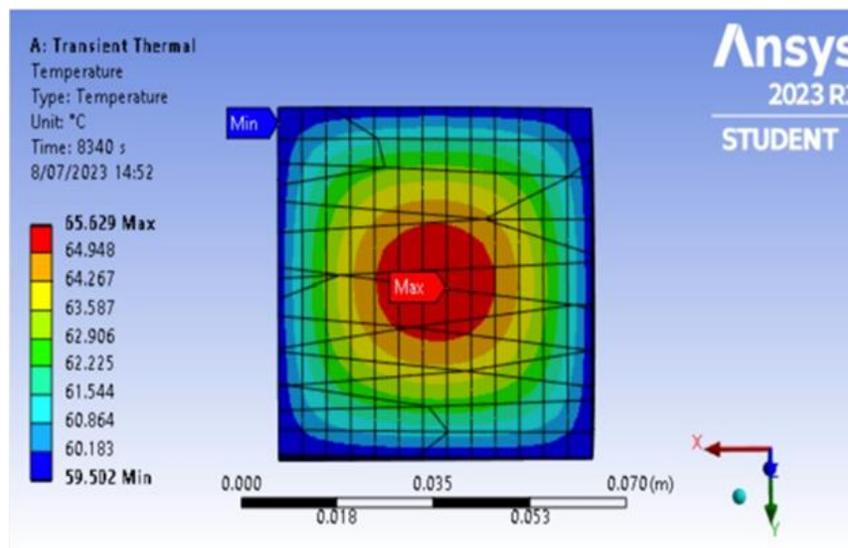
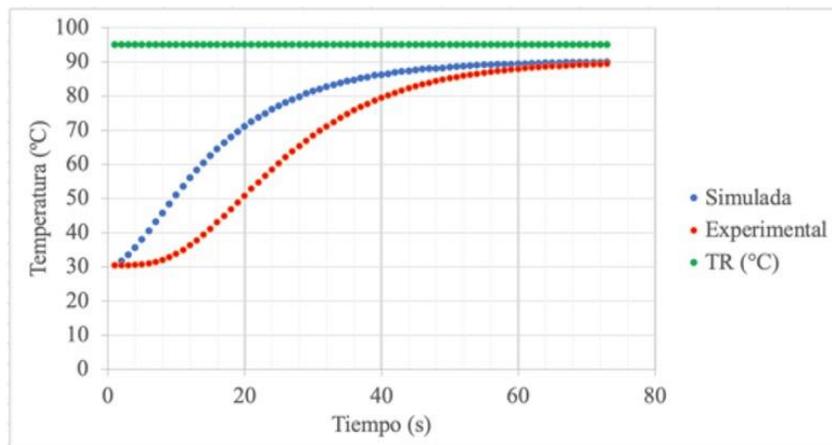


Figura 3

Variación de temperatura dentro de la retorta y comparación entre los valores esperados y los medidos en el punto central del recipiente en las tres posiciones del baño maría.



Nota. La Figura 2 muestra el perfil de tiempo y temperatura en la posición central de la retorta, además de cómo se comporta el puré, analizado mediante mediciones experimentales y simulaciones.

Tabla 2

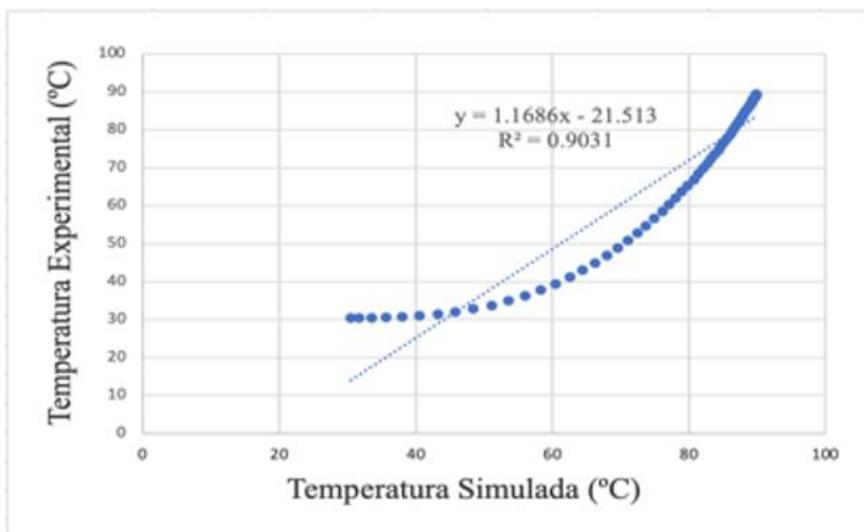
Verificación del estudio experimental y de la simulación numérica.

	Datos	$P_{93,3}^{8,9}$ (min)	Tiempo de proceso (min)	f_h (min)	j_h	R^2	RECOMP (°C)
Posición media	Experimentales	5	66,45	47,05	1,0424	0,9977	1,063
	Simulados	5	67,81	47,75	1,0659	0,9831	
	Diferencia (Δ)	0	1,36	0,7	0,0235		
Posición izquierda	Experimentales	5	57,27	32,71	1,0486	0,9942	0
	Simulados	5	57,27	32,71	1,0486	0,9942	
	Diferencia (Δ)	0	0	0	0		
Posición derecha	Experimentales	5	48,49	31,72	1,0500	0,9952	0
	Simulados	5	48,49	31,72	1,0500	0,9952	
	Diferencia (Δ)	0	0	0	0		

Nota. Se evaluaron la efectividad letal y otros factores relacionados con la distribución de calor en el Punto de Localización Central (PLC), utilizando tanto los resultados obtenidos en experimentos como los generados mediante simulación.

Figura 4

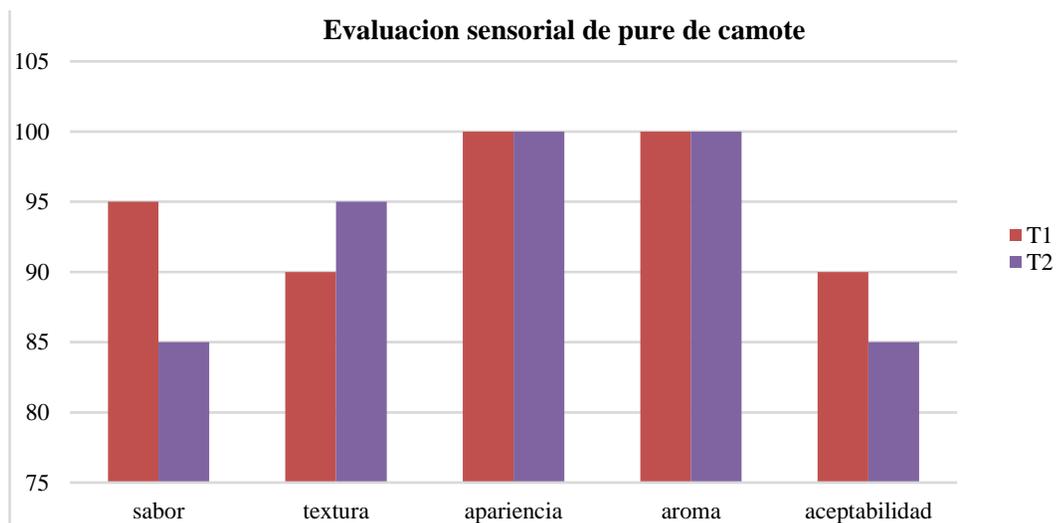
Registro experimental de la temperatura en el punto central del recipiente y temperatura estimada a través de simulación durante la fase de tratamiento térmico.



Nota. Los resultados de la prueba t de Student con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ indican una alta similitud entre los valores simulados y los datos experimentales durante la etapa de calentamiento (valor $p = 0.001$). Hay diferencias significativas en las medias de los datos en la posición central, pero no en las posiciones izquierda y derecha (valor $p = 0$), donde no se observan diferencias significativas.

Figura 5

Evaluación de atributos sensoriales



Nota. Los resultados se pueden evidenciar que hay diferencias significativas entre los tratamientos de la puntuación de cada atributo evaluado. T1: muestra pura pasteurizada, T2: muestra de puré con 0,075 % de almidón de maíz y carboximetilcelulosa.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos destacan aspectos esenciales que afectan la efectividad del tratamiento térmico y la calidad del producto final. La zona de calentamiento más lento se refiere a la región donde el calentamiento es más gradual, y esta característica puede tener implicaciones significativas en relación con la calidad y seguridad del producto (Shafiekhani et al., 2016).

En el baño María a 95 °C, la temperatura en la posición derecha tiende a ser ligeramente superior a la izquierda, mientras que la temperatura en la posición media está entre ambas. Sin embargo, es importante señalar que la posición central en la Figura 1 muestra un calentamiento más lento. Además, se observa que el valor de fh (47,0521 minutos) es más alto en la posición media que en la posición derecha (8,3407 minutos) y en la posición izquierda (5,6985 minutos).

La falta de uniformidad en la distribución del calor en sistemas comparables ya se ha señalado en la literatura, Bornhorst et Alabama (2017b) realizaron un estudio y comparación de sistemas que se encontraban similares con el método de agua caliente convencional, enfatizándose el punto frío que estaba en el centro geométrico y el punto caliente que estaba en la esquina de la bandeja. El resultado destacó que la velocidad de calentamiento varió significativamente en diferentes ubicaciones dentro de un baño maría, lo que reitera la relevancia de tomar en cuenta la ubicación de los sensores de temperatura y la agitación apropiada para garantizar una pasteurización efectiva.

Pisco y Francisco (2020) pudieron demostrar un centro de temperatura experimental con un buen ajuste y nivel un experimento error entre 1.37% y 7.83%, así como una temperatura media de 70 °C con un producto que fue excelente centro de temperatura con un buen ajuste y nivel de error entre 1.37 % y 7.83%, así como una temperatura media de 70 °C con un producto excelente .

Ayala y Ángel (2017) compararon hojalata y frascos de vidrio con tomate puro, cuyos valores son ideales para el proceso de pasteurización en frascos de vidrio a 92.2 °C. La naturaleza del vidrio no tiene ningún efecto sobre el principio dinámico y la concentración de sólidos totales no tiene un efecto despreciable sobre el proceso termoquímico. De forma similar, Silva et al. (2018) encontraron que, en la pasteurización de pulpa de papaya, el PLC estaba significativamente ubicado por encima del centro geométrico de un recipiente irregular, en este caso, en un sistema de pasteurización diferente.

En base a los resultados, con un cambio de ($\Delta = 0,0235$) en el valor jh y un cambio de ($\Delta = 0,7$ min) en el valor fh, son consistentes con los desafíos documentados en la literatura científica (Condori et al., 2012); (Jafri et al., 2015), quienes atribuyen estas variaciones en las condiciones del laboratorio, la precisión de los datos de admisión y las limitaciones del modelo matemático pueden contribuir a las discrepancias entre la simulación y los resultados experimentales.

Los coeficientes de determinación (R^2) cercanos a 1 evidencian una fuerte correlación entre los datos simulados y experimentales. El error cuadrático medio relativo (RECM) de 1,063 °C refuerza esta concordancia, mostrando mínimas discrepancias entre ambos enfoques.

Durante la simulación, se asumió que el envase estaba completamente lleno, omitiendo el espacio de cabeza, lo que llevó a una transferencia de calor exclusivamente por conducción. Esta hipótesis justificó un mayor valor de j_h y un menor f_h en comparación con los valores experimentales.

Para el valor P , se encontró que, desde el punto de vista del efecto esterilizante, tanto los datos experimentales como las simulaciones indicaron que se necesitaban al menos 5 minutos de tratamiento térmico para evitar esporas de *Byssochlamys fulva* que sobreviviera a 93,3 °C. Además, se notó que las dificultades en los tiempos de procesamiento entre los dos enfoques eran mínimos. Los resultados son consistentes con investigaciones anteriores que sugieren que un valor F_0 aproximado de 4,96 minutos es suficiente para lograr la esterilidad en jugo de mango puro en botellas semirrígidas de aluminio.

Los resultados también evidenciaron el impacto de los ingredientes añadidos en el comportamiento térmico. Sharma et al. (2017) demostraron que el uso de carboximetilcelulosa (CMC) y almidón de maíz modifican significativamente propiedades como la textura, sabor y consistencia.

Rinaldi et al. (2018) realizaron un tratamiento térmico por conductividad con distintas concentraciones de almidón (0 % a 6 %), observando que las menores concentraciones influían significativamente en el coeficiente de transferencia de calor en el centro geométrico, efecto también presente en la formulación T2 (1 % CMC y 1 % almidón de maíz), que presentó una estructura más uniforme.

CONCLUSIONES

En el centro del proceso de pasteurización, el valor más alto de f_h (47,0521 min) podría sugerir que esta área es crucial para asegurar la eficacia de la pasteurización. Es posible que la posición media experimente una distribución de temperatura más uniforme, lo que conduciría a un tratamiento térmico más efectivo en comparación con las posiciones izquierda y derecha.

Se confirmó que el centro geométrico del envase cilíndrico de vidrio se ubica en el Punto de Localización Central (PLC), experimento práctico y la simulación de la transferencia de calor por conducción mediante el método de los elementos finitos, se obtuvo para cada caso un valor " P " de cinco minutos. Los valores experimentales, como las simulaciones de tiempos de proceso y parámetros de penetración de calor, muestran una similitud significativa en las tres posiciones evaluadas: la media, la derecha y la izquierda. Las diferencias entre estos valores son valores mínimos (Δ), que indican la coherencia entre la simulación y los resultados prácticos, el tiempo de proceso ($\Delta = 1,36$ min) y los parámetros de penetración de temperatura " f_h " ($\Delta = 0,7$ min) y " j_h " ($\Delta = 0,0235$) como resultado de los supuestos realizados durante

la simulación. Los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos a lo largo del periodo de calentamiento fueron 1, junto con un coeficiente del error relativo medio cuadrático (“RECM”) de 1.063°C . Se encontraron diferencias ($p < 0,05$) en los datos de la posición central, mientras que no se observaron diferencias significativas en las posiciones izquierda y derecha.

Los hallazgos de la evaluación sensorial enfatizan lo crucial que es tener en cuenta una variedad de factores sensoriales al desarrollar y mejorar productos alimenticios. Ajustar los tratamientos y cumplir con las preferencias del público objetivo se presentan en llevar a cabo la preferencia del T1 en sabor, la mejora en textura del T2, y la igualdad en apariencia y aroma. A T1 (camote puro), T2 (puré de camote con 1% de CMC y 1% de almidón de maíz) obtuvo resultados algo mejores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayala, L., & Angel, S. (2017). “Tratamiento térmico y modelamiento matemático del concentrado de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en envase de hojalata y de vidrio”. Universidad Nacional del Callao.
- Bornhorst, E. R., Liu, F., Tang, J., Sablani, S. S., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2017). Food quality evaluation using model foods: A comparison study between microwave-assisted and conventional thermal pasteurization processes. *Food and Bioprocess Technology*, 10(7), 1248–1256. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1900-9>
- Condori, M., Obregón, A. J., & Guevara, A. (2012). Evaluación y optimización del tratamiento térmico de conservas de habas verdes (*Vicia Faba* L.) en salmuera. *Ciencia e Investigación*, 15(2), 84–89. <https://doi.org/10.15381/ci.v15i2.2663>
- da Silva, W. P., de Medeiros, M. S., Gomes, J. P., & e Silva, C. M. D. P. S. (2020). Improvement of methodology for determining local thermal diffusivity and heating time of green coconut pulp during its pasteurization. *Journal of Food Engineering*, 285(110104), 110104. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110104>
- da Silva, W. P., de Ataíde, J. S. P., de Oliveira, M. E. G., e Silva, C. M. D. P. S., & Nunes, J. S. (2018). Heat transfer during pasteurization of fruit pulps stored in containers with arbitrary geometries obtained through revolution of flat areas. *Journal of Food Engineering*, 217, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.012>
- de Oliveira, C. S., Bet, C. D., Bisinella, R. Z. B., Waiga, L. H., Colman, T. A. D., & Schnitzler, E. (2018). Heat-moisture treatment (HMT) on blends from potato starch (PS) and sweet potato starch (SPS). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 133(3), 1491–1498. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7196-9>
- Farazbakht, F., Zamindar, N., Hojjatoleslami, M., & Toghraie, D. (2017). Numerical simulation of transient heat transfer for tomato paste in semi rigid aluminum container. *Journal of Food Measurement & Characterization*, 11(2), 479–487. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9415-z>
- Hemamanjushree, S., & Tippavajhala, V. K. (2020). Simulation of unit operations in formulation development of tablets using computational fluid dynamics. *AAPS PharmSciTech*, 21(3), 103. <https://doi.org/10.1208/s12249-020-1635-1>
- Jafri, M., Jha, A., Rasane, P., & Sharma, N. (2015). Development of a process for the manufacture of shelf stable dhal and its physico-chemical properties. *Journal of Food Science and Technology*, 52(9), 5709–5717. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1586-1>

- Kosky, P., Balmer, R., Keat, W., & Wise, G. (2013). Mechanical Engineering. Exploring Engineering, 259–281. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415891-7.00012-1>
- 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>
- Li, Y., Zhang, Z., Hao, X. y Yin, W. (2018). A Measurement System for Time Constant of Thermocouple Sensor Based on High Temperature Furnace. *Applied Sciences*, 8, 2585. <https://doi.org/10.3390/app8122585>
- Li, S., Yan, Y., Guan, X., & Huang, K. (2020). Preparation of a hordein-quercetin- chitosan antioxidant electrospun nanofibre film for food packaging and improvement of the film hydrophobic properties by heat treatment. *Food Packaging and Shelf Life*, 23(100466), 100466. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100466>
- Pisco, M., & Francisco, J. (2020). Determinación de la difusividad térmica y perfiles de temperatura de la papa (*Solanum tuberosum*) durante el calentamiento en un medio líquido. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Nedanami, A., Ziaifar, A. M., Parvini, M., Kashaninejad, M., & Maghsoudlou, Y. (2018). Numerical calculation of sterilization heat penetration parameters based on initial temperature and headspace in canned non-Newtonian fluid. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(10). <https://doi.org/10.1111/jfpp.13709>
- Marszałek, K., Woźniak, Ł., Skapska, S., & Mitek, M. (2017). High pressure processing and thermal pasteurization of strawberry purée: quality parameters and shelf life evaluation during cold storage. *Journal of Food Science and Technology*, 54(3), 832–841. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2529-4>
- Rodríguez-Ramos, F.; Tabilo, E. J. y Moraga, N. O. (2021). Modeling inactivation of *Clostridium botulinum* and vitamin destruction of non-Newtonian liquid-solid food mixtures by convective sterilization in cans. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 102762.
- Rinaldi, M., Malavasi, M. Cordioli, M. y Barbandi, D. (2018). Investigation of influence of container geometry and starch concentration on thermal treated in-package food models by means of Computational Fluid Dynamics (CFD). *Food and Bioproducts Processing*, 108, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.12.003>
- Shafiekhani, S., Zamindar, N., Hojatoleslami, M., & Toghraie, D. (2016). Numerical simulation of transient temperature profiles for canned apple puree in semi-rigid aluminum-based packaging during pasteurization. *Journal of Food Science and Technology*, 53(6), 2770–2778. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2249-1>
- Sharma, M., Kristo, E., Corredig, M., & Duizer, L. (2017). Effect of hydrocolloid type on texture of pureed carrots: Rheological and sensory measures. *Food Hydrocolloids*, 63, 478–487. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.040>
- Tucker, G. & Featherstone, S. (2021). *Essentials of Thermal Processing* (2da edición). Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Vidal, A. R., Zaucedo-Zuñiga, A. L., & Ramos-García, M. de L. (2018). Propiedades nutrimentales del camote (*Ipomoea batatas* L.) y sus beneficios en la salud humana. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 19(2). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81357541001>