

UNIVERSIDAD NACIONAL DE FRONTERA

Facultad de Ingeniería de Industrias Alimentarias y Biotecnología

Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias



**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**TÍTULO: “Simulación numérica del tratamiento térmico
de un puré de frutas y subproductos infravalorados de
Piura”**

Autor: Br. Vicente Amirpasha Tirado Kulieva

Asesor: Dr. William Rolando Miranda Zamora

PY-EPIIA-036

Sullana – Perú

2022

Dedicatoria

El presente estudio está dedicado a mi querida madre Tania por su amor y apoyo incondicional durante toda mi vida. Sin ti, este sueño no fuese posible.

Asimismo, a mis familiares, amigos, compañeros, docentes y demás personas que formaron parte de este recorrido. Cada uno de ustedes ha contribuido con la realización de este trabajo.

Agradecimiento

A Dios por guiarme durante toda la carrera universitaria, permitiéndome culminarla satisfactoriamente a pesar de los tropiezos académicos y personales presentados.

A Tania, mi mamá. Gracias a sus enseñanzas, apoyo continuo e íntegro en todo momento; pieza clave para superar las distintas dificultades de la vida y, específicamente, del camino universitario.

Al Dr. William Rolando Miranda Zamora por su apoyo desde el planteamiento de la idea de tesis hasta la culminación de este informe. Además, por su tiempo dedicado y sus conocimientos compartidos como profesional y persona.

A mis amigos y futuros colegas, Regina Valderrama Curay, Tatiana Rivera Gutiérrez, Eliam Gonzales Arévalo y a Brayan Flores Castillo por su apoyo en las distintas etapas del procedimiento experimental.

A los estudiantes del curso de Bioquímica de los Alimentos por su participación en la evaluación sensorial.

Al Mg. Oscar Julián Berrios Taucaya por su pertinente gestión para el uso de los laboratorios, por resolver los percances presentados, y su apoyo en la evaluación sensorial.

A la Blga. Maria Lourdes Chipana Samaniego y a la Msc. Vicky Almendra Correa Seminario por el soporte brindado en el laboratorio.

De igual manera, a la Universidad Nacional de Frontera que, mediante la subvención del “II Concurso para el Financiamiento de Investigaciones Conducentes al Grado Académico de Bachiller o Título Profesional” pude ejecutar el presente estudio.

Visto Bueno del Asesor de la Tesis

El suscrito, en mi condición de asesor del señor **Vicente Amirpasha Tirado Kulieva** de la Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias, informo que la Tesis titulada **“Simulación Numérica del Tratamiento Térmico de un Puré de Frutas y Subproductos Infravalorados de Piura”** se encuentra conforme a lo indicado en el Reglamento de Grados y Títulos.

Sullana, 24 de junio de 2022



Asesor

Dr. William Rolando Miranda Zamora

DNI: 40045539

Jurado Evaluador



Dr. Manuel Jesús Sánchez Chero
Presidente



Mba. Leandro Alonso Vallejos More
Secretario



Dr. William Rolando Miranda Zamora
Vocal



UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
FRONTERA

Acta de Evaluación de Sustentación del Informe de Tesis

Siendo las 16:00 horas del día 05 del mes de julio del año 2022 se reunieron en la sala virtual <https://meet.google.com/bhe-ymxv-tpi?pli=1&authuser=3> de la Universidad Nacional de Frontera, los miembros del Jurado de Tesis para evaluar el Informe de Tesis denominado: "Simulación Numérica del Tratamiento Térmico de un Puré de Frutas y Subproductos Infravalorados de Piura"

Siendo sustentado en sesión pública por el autor: Br. Vicente Amirpasha Tirado Kulieva como requisito para obtener el Título Profesional de INGENIERO DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS.

Terminada la sustentación, se procedió a la defensa del Informe de Tesis, etapa en que los miembros del Jurado de Tesis formularon sus inquietudes y preguntas de manera individual, las que fueron respondidas por el sustentante.

Seguidamente, el Jurado solicitó el retiro de todos los asistentes y del (los) sustentante(s) de la sala virtual o física según sea el caso; el Jurado de Tesis determinó la calificación concedida a la sustentación del Informe de Tesis para la Obtención de Título Profesional, en términos de:

Aprobado (a) con el calificativo de 19 (Excelente), levantándose la sesión a 16:00 horas del mismo día. Se concluye el acto de sustentación, suscribiendo el acta.

Presidente

Dr. Manuel Jesús Sánchez Chero

Secretario

Mba. Leandro Alonso Vallejos More

Vocal

Dr. William Rolando Miranda Zamora

No.	DESCRIPCIÓN	RECOMENDAR	
		SI	NO
1	Recomendar para presentar en eventos		
2	Recomendar para publicación		
3	Recomendar para patente		
4	Recomendar para Meritorio		
5	Recomendar para Laureado		

Código: PY-EPIIA-036

Índice

Resumen.....	xi
Abstract.....	xii
I. INTRODUCCIÓN	13
II. MATERIALES Y MÉTODOS	17
2.1. Lugar de ejecución.....	17
2.2. Métodos.....	17
2.2.1. Materia prima y materiales	17
2.2.2. Preparación del puré mixto	18
2.2.3. Prueba de distribución de calor.....	19
2.2.4. Estudio experimental de la temperatura.....	20
2.2.5. Simulación del tratamiento térmico.....	22
2.2.6. Evaluación sensorial del puré	24
2.2.7. Análisis de datos.....	24
III. RESULTADOS.....	26
3.1. Zona de más lento calentamiento en la retorta.....	26
3.2. Estudio experimental y simulación de la transferencia de calor en el puré	27
3.3. Efecto del tratamiento térmico en la aceptabilidad del puré.....	29
IV. DISCUSIONES.....	31
V. CONCLUSIONES	37
5.1. Conclusión general.....	37
5.2. Conclusiones específicas	37
VI. RECOMENDACIONES.....	39
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
ANEXOS	47

Índice de tablas

Tabla 1 Constante de tiempo (τ) de los sensores a emplear	17
Tabla 2 Valor f_h de la zona superior, media e inferior del autoclave	26
Tabla 3 Validación del estudio experimental y de la simulación numérica	28
Tabla 4 Puntuaciones sensoriales	30

Índice de figuras

Figura 1 Flujograma de elaboración del puré de frutas y subproductos	18
Figura 2 Distribución de calor a los 640 s en las tres zonas del autoclave evaluado	26
Figura 3 Evolución de la temperatura en la retorta, y los valores predichos y experimentales en el centro geométrico del envase	27
Figura 4 Distribución de temperaturas (°C) a los a) 780 s (13 min), b) 2100 s (35 min), c) 5100 s (85 min), d) 9120 s (152 min), e) 10740 s (179 min)	27
Figura 5 PLC en el modelo desarrollado a los 1140 s (19 min)	28
Figura 6 Temperatura experimental en el centro geométrico del envase y temperatura predicha por simulación en la etapa de a) calentamiento y b) enfriamiento	29

Índice de Anexos

Anexo A Determinación de la constante de tiempo (τ) de los termopares	47
Anexo B Lavado y desinfección del mango ciruelo (a), banano (b) y mango Kent (c)	48
Anexo C Escaldado de la materia prima: calentamiento (a) y enfriamiento (b)	49
Anexo D Pelado del banano (a) y despepitado del mango ciruelo (b) y mango Kent (c)	50
Anexo E Bananos pelados sumergidos en la solución de zumo de limón al 5%	51
Anexo F Formulación/pesado de la materia prima	52
Anexo G Homogeneizado de la materia prima	53
Anexo H Envasado (a) y almacenamiento (b) del puré	54
Anexo I Distribución de las termocuplas en la cesta del autoclave	55
Anexo J Conexión autoclave-termocuplas-laptop y condiciones de operación	56
Anexo K Aseguramiento de la hermeticidad del sensor en la tapa	57
Anexo L Sensor de termopar en el centro geométrico del envase con el puré	58
Anexo M Creación y mallado de la geometría del envase	59
Anexo N Designación de las propiedades termofísicas del puré	60
Anexo O Modelos de Choi y Okos para estimar las propiedades termofísicas de un alimento según su composición proximal y en función de la temperatura	61
Anexo P Composición proximal del puré	62
Anexo Q Construcción del modelo matemático con las características de la retorta	63
Anexo R Simulación del perfil de tiempo-temperatura del alimento	64
Anexo S Ficha de evaluación de la aceptabilidad del puré	65
Anexo T Ejemplo de una ficha de evaluación sensorial completada	66
Anexo U Transferencia de calor en el puré envasado en frasco de vidrio	67
Anexo V Color de las muestras de puré: a) T ₀ , b) T ₁ , c) T ₂ , d) T ₃ y e) T ₄	68

Resumen

En este estudio se simuló numéricamente el tratamiento térmico de un puré de frutas y subproductos infravalorados de Piura. Primero, se determinó mediante la prueba de distribución de calor que la zona inferior del autoclave es la de más lento calentamiento, al mostrar un índice de velocidad de calentamiento ($f_h = 29,8841$ min) más alto. Se preparó un puré de pulpa de banano, pulpa y cáscara de mango ciruelo, y pulpa y cáscara de mango Kent. El centro geométrico del envase cilíndrico de vidrio se estableció como punto de más lento calentamiento durante la pasteurización. No hubo diferencias en el valor de letalidad (P), pero sí en el factor de retraso de calentamiento ($j_h, \Delta = 2,17$) y en el valor f_h ($\Delta = 16,79$ min) respecto al estudio experimental y a la simulación de la transferencia de calor por conducción mediante el método de elementos finitos. Al comparar los datos experimentales y predichos, se obtuvieron valores R^2 cercanos al 1, además de un valor de la raíz del error cuadrático medio de $2,5597$ °C. Asimismo, ambos conjuntos de datos no tuvieron diferencias significativas ($p > 0,05$). Por último, hubo diferencias significativas ($p < 0,05$) respecto al color característico, consistencia, olor característico y gusto por el sabor de las muestras de puré tratadas con distintas condiciones de pasteurización. Todas las muestras fueron bien aceptadas, pero la muestra tratada con la temperatura más alta y por un tiempo menor obtuvo un mayor puntaje.

Palabras clave: puré de frutas, tratamiento térmico, simulación, transferencia de calor, zona de más lento calentamiento.

Abstract

In this study, the thermal treatment of a puree of undervalued fruits and by-products from Piura was numerically simulated. First, it was determined by the heat distribution test that the lower zone of the autoclave is the slowest heating zone, showing a higher heating rate index ($f_h = 29.8841$ min). A puree was prepared from banana pulp, plum mango pulp and peel, and mango (Kent variety) pulp and peel. The geometric center of the cylindrical glass container was established as the point of slowest heating during pasteurization. There were no differences in the lethality value (P), but there were differences in the heating delay factor (j_h , $\Delta = 2.17$) and in the f_h value ($\Delta = 16.79$ min) with respect to the experimental study and the simulation of conduction heat transfer using the finite element method. When comparing the experimental and predicted data, R^2 values close to 1 were obtained, in addition to a root mean square error value of 2.5597 °C. Likewise, both data sets did not have significant differences ($p > 0.05$). Finally, there were significant differences ($p < 0.05$) with respect to the characteristic color, consistency, characteristic odor, and taste for the flavor of the puree samples treated with different pasteurization conditions. All samples were well accepted, but the sample treated with the higher temperature and for a shorter time obtained a higher score.

Keywords: fruit puree, heat treatment, simulation, heat transfer, slower heating zone.

I. INTRODUCCIÓN

En todo el mundo, un tercio del total de alimentos producidos para consumo humano son perdidos o desperdiciados a lo largo de la cadena alimentaria, significando grandes pérdidas económicas (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2014). Además, la descomposición de los alimentos genera problemas ambientales y para la salud.

El Perú es uno de los países con mayor producción agrícola. Piura es una de sus regiones con mayor potencial frutícola, representado por productos como el banano (*Musa paradisiaca*) cuya producción fue de 379 212 toneladas en el 2019, siendo el 16,84% de la producción nacional (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú [MIDAGRI], 2019). Sin embargo, el 90% de la producción se destina al consumo nacional cuyo 20 a 25% es descartada por no cumplir con los requisitos de calidad, principalmente por la apariencia (Yap et al., 2017). El mango (*Mangifera indica*) es otro producto bandera de la región con una producción de 304 946 toneladas en el 2019, representando el 71,27% de la producción del país (MIDAGRI, 2019). La variedad Kent representa el 82% de toda la producción, según el Ministerio de Agricultura y Riego del Perú (MINAGRI, 2015). En los hogares se suele emplear solo la pulpa, descartándose la semilla y cáscara, las cuales conforman desde el 35 al 60% del peso total del mango (Tirado-Kulieva et al., 2021). Asimismo, con 1 875 toneladas en el 2019, el mango ciruelo o taperibá (*Spondias dulcis*) en Piura representó el 34,88% de la producción del país (MIDAGRI, 2019). En este caso, las ramificaciones en su pepa dificultan su consumo directo, generando altos niveles de desperdicio: 66% de pulpa y 34% de cáscara-semilla-fibra (Niño y Arévalo, 2021).

Estos desperdicios masivos de materia prima son un riesgo para la seguridad alimentaria, lo cual influye en la desnutrición. Aunque la pulpa de *Musa paradisiaca*, la pulpa y cáscara de *Spondias dulcis*, y la pulpa y cáscara de *Mangifera indica* sean infravalorados, tienen un alto valor nutricional y bioactivo. Contienen polifenoles, carotenoides, ácidos orgánicos, aceites

esenciales, fibra dietética, vitaminas y minerales, etc., los cuales les confieren características antioxidantes, antimicrobianas, inmunomoduladoras, antiinflamatorias, anticancerígenas, además de propiedades para prevenir enfermedades cardiovasculares, metabólicas, neurológicas, entre otras (Chaouch y Benvenuti, 2020; Tirado-Kulieva et al., 2021).

Aunque dicha materia prima no sea atractiva en fresco, la tendencia actual es consumir productos naturales transformados. Esto les dará un valor agregado que permitirá difundir su importancia y generar mayor desarrollo agroindustrial en la región. Asimismo, es indispensable prolongar la vida útil del alimento mediante el envasado y tratamiento térmico, teniendo en cuenta que las altas temperaturas afectan significativamente la calidad. En este sentido, Malekjani y Jafari (2018) destacan que se debe emplear técnicas de modelamiento y simulación computacional que permitan predecir, controlar y optimizar el proceso para reducir el impacto, pero sin afectar la esterilidad deseada de los productos, además de reducir el tiempo y costos de procesamiento. Adicionalmente, el usar este tipo de herramientas tecnológicas contribuye a estar a la vanguardia de instituciones de alto nivel en el mundo.

En procesos de tratamiento térmico es fundamental saber cuál es la zona de más lento calentamiento (ZLC) en el autoclave y el punto de más lento calentamiento (PLC) en el envase para garantizar la seguridad microbiológica de los productos (Serami et al., 2020). Para el modelamiento y simulación se debe tener en cuenta las propiedades físicas y térmicas del alimento; las dimensiones, geometría y orientación del envase (Park y Yoon, 2018). Dependiendo del tipo de transferencia de calor (por convección, conducción o mixta) se debe considerar las ecuaciones que gobiernan el proceso que, según Erdoğan et al. (2018), debido a su complejidad no se resuelven con los datos que se tienen a la mano y, por ello, deben simplificarse. Para resolver las ecuaciones diferenciales se emplean métodos numéricos. Los más utilizados son los métodos de diferencias finitas (MDF), los métodos de elementos finitos (MEF) y los métodos de volúmenes finitos (MVF). Los MDF y MVF proporcionan ecuaciones

discretas, mientras que los MEF proporcionan soluciones continuas, lo cual es ideal para productos heterogéneos con geometría irregular y condiciones de contorno complejas (Fadiji et al., 2021).

Algunos hallazgos de interés sobre estos puntos clave, los cuales fueron de utilidad para establecer los parámetros en la metodología del presente estudio, se muestran a continuación. Según distintas pruebas de distribución de calor en retortas verticales, independientemente del número de zonas (divisiones), la ZLC es aquella que se encuentra más alejada de la entrada del vapor de agua (Berteli et al., 2012; Berteli et al., 2013).

La transferencia de calor en alimentos sólidos y líquidos con alta viscosidad es por conducción, en alimentos líquidos de baja viscosidad es por convección, y en alimentos sólidos-líquidos es por ambos mecanismos (Serami et al., 2020). Suele usarse una solución de carboximetilcelulosa (CMC) al 0,85% como modelo para purés de frutas y vegetales y se tiende a evaluar la transferencia de calor por convección (Lespinaud et al., 2019). Sin embargo, Lespinaud et al. (2008) simularon la transferencia de calor por convección en el tratamiento térmico de un puré de tomate, cuya validación demostró que el modelo obtenido no fue preciso. En contraste, obtuvieron óptimos resultados al evaluar la transferencia de calor por conducción, estableciéndolo como predominante en este tipo de alimentos.

Los productos alimentarios calentados por conducción generalmente no alcanzan la temperatura deseada en todos sus puntos y principalmente en el PLC, cuya ubicación siempre se considera que es el centro geométrico del envase. Para determinarlo experimentalmente, los termopares se colocan en (o cerca de) dicho punto (Holdsworth y Simpson, 2016). Esto aplica al menos al usar envases de geometría común (forma cilíndrica, por ejemplo), según los resultados obtenidos en la pasteurización de pulpa de papaya (da Silva et al., 2018).

Respecto al tipo del envase, los frascos de vidrio son seguros al tener una interacción mínima con el producto, además de brindar como ventaja su visibilidad (Raits et al., 2021). Sin

embargo, la mayoría de investigaciones se centran en alimentos envasados en latas (Lespinard et al., 2019) y, por ello, es necesario aumentar los estudios sobre envases de vidrio, cubriendo un vacío de la literatura científica.

Se emplean softwares potentes para evaluar la transferencia de calor y masa, y la dinámica de fluidos en los productos alimentarios, para lo cual, actualmente, no existe soluciones analíticas. Nedamani et al. (2018) emplearon COMSOL 4.1 para evaluar la transferencia de calor en una solución de almidón enlatado, evaluando el efecto del espacio de cabeza (10 y 20%). Concluyeron que, con menor espacio de cabeza, la temperatura aumenta más rápido y de forma más constante, debido al menor volumen de aire. Otro software muy popular y el que se usó en este estudio es Ansys. Serami et al. (2020) determinaron con Ansys Fluent 16 que, en la esterilización del guiso Fesenjan, el PLC se ubicó en el centro geométrico y el valor de letalidad (F) optimizado alrededor de 6,1 min. Resultados similares se mostraron en el estudio de Azar et al. (2020), cuyo valor F de un guiso de apio se optimizó a 8 min.

Ya que no existe información sobre la elaboración de una conserva nutritiva y mixta a base de la materia prima mencionada y al modelamiento de su tratamiento térmico, el objetivo de este estudio es simular numéricamente el tratamiento térmico de un puré de frutas y subproductos infravalorados de Piura. Se planteó los siguientes objetivos específicos:

- a) Determinar la zona de más lento calentamiento en la retorta mediante la prueba de distribución de calor.
- b) Analizar experimentalmente la transferencia de calor en el puré y validar mediante simulación numérica por el método de elementos finitos.
- c) Evaluar el efecto del tratamiento térmico con distintas combinaciones de temperatura-tiempo en la aceptabilidad del puré.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Lugar de ejecución

La parte experimental de este estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Tecnología de Alimentos de la Universidad Nacional de Frontera.

2.2. Métodos

2.2.1. *Materia prima y materiales*

El banano, el mango variedad Kent y el mango ciruelo se obtuvieron de forma aleatoria de distintos puntos de venta del mercado del distrito de Bellavista, provincia de Sullana, departamento de Piura. Se consideró materia prima fresca y madura, sin importar daños mecánicos, pero excluyendo la que presentaba signos de contaminación o deterioro.

Respecto a los materiales, los envases de vidrio de 500 mL se obtuvieron del Supermercado Tottus, ubicado en Sullana. Los sensores de termopar tipo K TH2018KA alámbricos se obtuvieron de PCsensor (RDING TECH CO., LIMITED, China).

Ya que los sensores son nuevos, antes de emplearlos es indispensable medir la constante de tiempo (τ). Este es el principal parámetro de rendimiento dinámico al tener relación directa con la transferencia de calor y que, según Li et al. (2018), es el tiempo que se tarda para alcanzar el 63,2% de la diferencia de temperatura inicial. La metodología empleada para la medición de τ se detalla en el Anexo A. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1, habiendo encontrado valores muy similares para todos los sensores.

Tabla 1

Constante de tiempo (τ) de los sensores a emplear

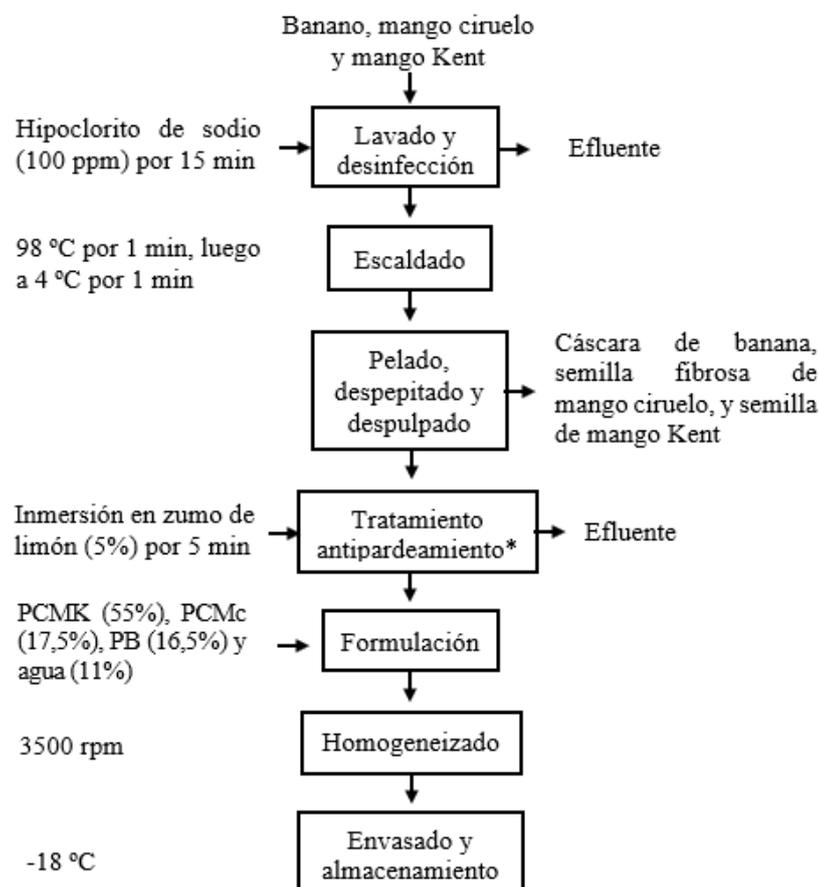
Sensor	τ (s)
1	17,27
2	19,42
3	17,64

2.2.2. Preparación del puré mixto

El flujograma del proceso se muestra en la Figura 1, el cual se detalla posteriormente.

Figura 1

Flujograma de elaboración del puré de frutas y subproductos



*Exclusivamente para la pulpa de banano. PCMK: pulpa y cáscara de mango Kent (mixto), PCMc: pulpa y cáscara de mango ciruelo (mixto), PB: pulpa de banano.

2.2.2.1. Lavado y desinfección (Anexo B). La materia prima se lavó con agua corriente, luego se sumergió en una solución clorada a 200 ppm durante 15 min y se lavó nuevamente, según lo sugerido por da Silva et al. (2018). La finalidad de esto fue eliminar los restos de tierra y otras partículas extrañas, y reducir la carga microbiana.

2.2.2.2. Escaldado (Anexo C). La materia prima se colocó en agua a 98 °C durante 1 min para inactivar las enzimas de oxidación y mejorar sus características sensoriales. Posteriormente, se enjuagó con agua fría (4 °C) durante 1 min.

- 2.2.2.3. Pelado, despepitado y despulpado (Anexo D).** Los bananos se pelaron. Se deshuesaron los mangos ciruelo y los mangos Kent para dejar la pulpa y cáscara. Todo se realizó manualmente.
- 2.2.2.4. Tratamiento antipardeamiento (Anexo E).** Inmediatamente después del pelado de los bananos, se mantuvieron sumergidos en una solución de zumo de limón al 5% hasta el momento del homogeneizado de toda la materia prima.
- 2.2.2.5. Formulación (Anexo F).** Con base en pruebas preliminares, se empleó 55% de PCMK, 17,5% de PCMc, 16,5% de PB y 11% de agua. El pesado se realizó con una balanza electrónica Coretto EC30A.
- 2.2.2.6. Homogeneizado (Anexo G).** La mezcla se homogeneizó con una licuadora Skymesen LAR-25PMB a 3500 rpm hasta obtener una consistencia suave.
- 2.2.2.7. Envasado y almacenamiento (Anexo H).** Todo el puré se vertió en una olla, se tapó y se mantuvo en una congeladora Aro BD-500 a -18 °C para mantener sus características hasta su posterior uso.

2.2.3. Prueba de distribución de calor

Para establecer la ZLC en la retorta, se siguieron las indicaciones de *La Norma Sanitaria Aplicable a la Fabricación de Alimentos Envasados de Baja Acidez y Acidificados destinados al Consumo Humano* (Ministerio de Salud del Perú [MINSa], 2008). 3 termopar USB TH2018KA alámbricos se conectaron en 3 laptops (1 c/u) y se distribuyeron en las tres zonas (inferior [a 16,5 cm de altura de la base], media [a 33 cm de altura de la base] y superior [a 49,5 cm de altura de la base]) de la cesta del autoclave Vertical Type Steam Sterilizer HL-342 como se observa en el Anexo I. El proceso se llevó a cabo a 100 °C (Anexo J) y se detuvo cuando las tres zonas alcanzaron la temperatura establecida. Los termopares se introdujeron en tapas de metal (Anexo K) para asegurar su inamovilidad y las perforaciones se sellaron con silicona acética

transparente (resistencia desde -60 hasta 120 °C). El registro de la temperatura se realizó con el software TEMperCOM_V1.6.6 en intervalos de 20 s.

Para el cálculo de la ZLC, se determinó el índice de velocidad de calentamiento (f_h), el cual es el tiempo que tarda la curva de calentamiento trazada en coordenadas semilogarítmicas en recorrer un ciclo logarítmico (Tucker y Featherstone, 2021). f_h (min) se calculó a partir de la ecuación 1 donde m es la pendiente del ajuste lineal de la curva de calentamiento.

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

Según lo recomendado por Kızıldağ et al. (2010), al finalizar el proceso se abrió cada frasco y se cercioró que el termopar no haya sido alterado, ocasionando error en la medición de la temperatura. Ya que no ocurrió esto, los datos (y experimentos) no fueron descartados.

2.2.4. Estudio experimental de la temperatura

La temperatura ($27,2 \pm 0,1$ °C) y el pH ($3,5 \pm 0,1$) del puré se obtuvieron por triplicado con un medidor portátil HANNA.

Se llenó un envase de vidrio con 480 g de puré. Para asegurar un rápido y constante incremento de temperatura durante su posterior tratamiento térmico, se dejó un espacio de cabeza de aproximadamente 10% (Nedamani et al., 2018).

Se colocó un termopar dentro del envase a través de una tapa perforada. El agujero se selló con silicona acética para asegurar la hermeticidad (Anexo L) y evitar la fuga del puré y/o entrada de agua durante el proceso. Específicamente, el termopar se colocó en el centro geométrico del recipiente (aproximadamente, altura: 5 cm y diámetro: 4 cm), donde se esperaba que se encontrara el PLC según la literatura. Este envase se colocó en la ZLC. Adicionalmente, un termopar se colocó cerca del envase para medir la temperatura de la retorta. Se realizó la conexión de los termopares en la laptop. El

proceso se llevó a cabo a 100 °C y el registro de datos en intervalos de 60 s se realizó durante la etapa de calentamiento, la etapa de mantenimiento de la temperatura y la etapa de enfriamiento.

Con los datos obtenidos, mediante el Método general se determinó la letalidad (F para esterilización; en este caso, P para pasteurización, ecuación 2), la cual es el tiempo requerido para inactivar todas las esporas de un microorganismo específico y en condiciones específicas (Miranda-Zamora, 2012). Ya que el pH del puré es menor a 4, a pesar del tratamiento térmico, pueden sobrevivir bacterias ácido lácticas, levaduras y principalmente mohos como el *Byssochlamys fulva* y *B. nivea*, los cuales son muy comunes en frutas (Holdsworth y Simpson, 2016). En esta línea, se tomó como referencia a *B. fulva*, cuyas esporas son resistentes al calor. Para resolver la ecuación, se tomaron los datos ($P_{93,3}^{8,9} = 4,5$ min) del estudio de Huamaní (2022) referente al tratamiento térmico de un puré de tumbo serrano. 8,9 es el valor z o la temperatura necesaria para reducir en un ciclo logarítmico la carga microbiana del microorganismo de referencia y 93,3 es la temperatura de la retorta (T_r).

$$P_0 = \int_0^t 10^{\frac{T-T_r}{z}} dt \quad (2)$$

También se determinó el factor de retraso de calentamiento (j_h), definido como el retraso térmico previo a que la temperatura del envase responda a la fluctuación de temperatura del medio (Tucker y Featherstone, 2021). Se calculó siguiendo la ecuación 3, donde T_m es la temperatura pseudoinicial del producto (intersección con el eje de la temperatura en el tiempo cero de la línea recta) y T_i es la temperatura inicial del producto.

$$j_h = \frac{T_r - T_m}{T_r - T_i} \quad (3)$$

Se determinó el valor f_h de igual forma que en la prueba de distribución de calor.

Estos parámetros, además del tiempo de proceso se calcularon con el programa “EVATMI-ZA Simplified Procedure” Versión 1.0 descrito en Zamora et al. (2021). El tiempo de proceso (B_B , min) se calcula mediante el método de fórmula de Ball (ecuación 4) donde g es el número de grados ($^{\circ}\text{C}$) por debajo de T_r en el PLC del envase al final del proceso de calentamiento (Awuah et al., 2007).

$$B = B_B = f_h \log \left[\frac{j_h - (T_r - T_i)}{g} \right] \quad (4)$$

Sin embargo, este método de fórmula es para procesos de esterilización comercial. En el software en mención se modificó el método de Ball para responder a procesos de pasteurización, lo cual se requiere en este estudio. Los algoritmos para ello se encuentran inéditos.

2.2.5. Simulación del tratamiento térmico

Esta (validación) es fundamental para el diseño y optimización del proceso. Se evaluó la transferencia de calor por conducción en el puré resolviendo la ecuación de energía mediante el método de elementos finitos. Para esto, se empleó el software Ansys 2022 R1 (Ansys Inc., EE.UU.) instalado en una computadora portátil Windows 10 Home de 64 bits, AMD Ryzen 7 3700U con Radeon Vega Mobile Gfx, 2,30 GHz y 8,00 GB de RAM.

2.2.5.1. Detalles de la geometría del envase. Como se ve en el Anexo M, se creó un modelo cilíndrico en 2D y se convirtió en 3D cuyo volumen fue de aproximadamente 500 mL, con un diámetro de 8 cm y una altura de 10 cm. Se realizó un mallado automático con 1862 elementos y 8580 nodos.

2.2.5.2. Condiciones de transferencia de calor. Para facilitar el análisis de transferencia de calor en estado no estacionario, se asumió lo siguiente:

- a) El puré es homogéneo e isótropo (da Silva et al., 2018).
- b) La temperatura inicial del alimento ($27,2^{\circ}\text{C}$) y de la retorta ($25,5^{\circ}\text{C}$) es uniforme.

- c) El envase es un cilindro perfecto.
- d) La resistencia térmica del material (vidrio) es despreciable; la temperatura de las paredes es igual a la de la retorta.
- e) Con base en Serami et al. (2020), las propiedades termofísicas del alimento ($\rho = 1080,22 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 3,59 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$, $k = 0,56 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, Anexo N) se consideraron constantes porque no varían significativamente con los cambios de temperatura. Estas se obtuvieron con los modelos de Choi y Okos (Anexo O) a partir de la composición proximal (Anexo P).
- f) La transferencia de calor en el producto ocurre por conducción en su totalidad.
- g) El coeficiente de convección ($h = 5000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, Singh y Heldman, 2014) del vapor de agua en la retorta es constante y afecta todos los lados de la geometría (parte superior, parte inferior y paredes laterales).
- h) El espacio de cabeza no fue considerado para evitar complejidades por la interfaz aire-vapor de agua de la retorta. Kızıldağ et al. (2010) mencionan que esto no afecta significativamente en los resultados de la simulación.

2.2.5.3. Solución numérica. Habiendo definido todas las condiciones pertinentes, se insertó la información sobre el perfil tiempo-temperatura de la retorta para dar inicio a la construcción y solución del modelo matemático (Anexo Q). Este proceso duró 11160 s (186 min) y se estableció que la información se dé cada 60 s.

Se obtuvo el perfil de tiempo versus temperatura (mínima, máxima y promedio) del alimento debidamente graficado. Se realizó un corte en la mitad de la geometría y se estableció la visualización de 186 fotogramas por 10 s para ver el comportamiento del alimento durante el proceso y también para definir el PLC (Anexo R).

2.2.5.4. Análisis post proceso. El perfil de tiempo-temperatura, el PLC, además del valor P, tiempo de proceso, f_h y j_h calculados con los datos simulados fueron comparados con los resultados obtenidos experimentalmente.

2.2.6. Evaluación sensorial del puré

Para determinar la aceptación sensorial del puré mixto, se evaluó la influencia del tratamiento térmico. Con base en estudios experimentales sobre la destrucción de *B. fulva* se seleccionaron cuatro distintas combinaciones de temperatura y tiempo: 80 °C por 20 min (T_1), 90 °C por 10 min (T_2), 100 °C por 5 min (T_3) y 110 °C por 3 min (T_4) (Sant'Ana et al., 2009). También se evaluó la muestra sin tratamiento (control, T_0). En este sentido, este estudio tuvo un tipo y diseño de investigación experimental.

Modificando la metodología de Zhang et al. (2019), se les dio aproximadamente 20 g de muestra (a temperatura ambiente) de cada tratamiento en envases de 2 oz a 42 panelistas no entrenados. Las muestras fueron rotuladas con códigos aleatorios de tres dígitos de la siguiente manera: T_0 : 915, T_1 : 209, T_2 : 737, T_3 : 196 y T_4 : 440.

La medición se realizó mediante una escala hedónica de 9 puntos (Anexo S), evaluando la intensidad y preferencia del color, olor, textura y sabor, y también se midió la aceptabilidad general de las muestras de puré. Para evitar errores, se aseguró un ambiente libre de ruidos y a los panelistas se les dio galletas saladas y agua para enjuagar entre la degustación de cada muestra.

2.2.7. Análisis de datos

Para la comparación del promedio entre la temperatura calculada y la medida, se empleó la raíz del error cuadrático medio (RECM). El cálculo se realizó según la ecuación 5, donde P y E son los valores predictivos y experimentales, respectivamente, y n es el número de mediciones. Los datos también fueron comparados con el coeficiente de determinación (R^2).

$$\text{RECM} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - E_i)^2} \quad (5)$$

Usando Excel Office 2019, para la prueba de hipótesis se empleó el test de t de student para muestras independientes con un nivel de significancia (α) de 5%. Se planteó la siguientes hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (H_0) : no hay diferencias significativas entre la media del conjunto de datos experimentales y la del conjunto de datos predichos.
- Hipótesis alternativa (H_i) : sí hay diferencias significativas entre la media del conjunto de datos experimentales y la del conjunto de datos predichos.

En el caso de los resultados de la evaluación sensorial, se efectuó el análisis de varianza ANOVA de un factor y la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para determinar la diferencia entre los tratamientos, en caso hubiese. Las hipótesis planteadas fueron las siguientes:

- H_0 : no hay diferencias significativas entre la media de la puntuación de cada atributo evaluado en las muestras de puré.
- H_i : sí hay diferencias significativas entre la media de la puntuación de cada atributo evaluado en las muestras de puré.

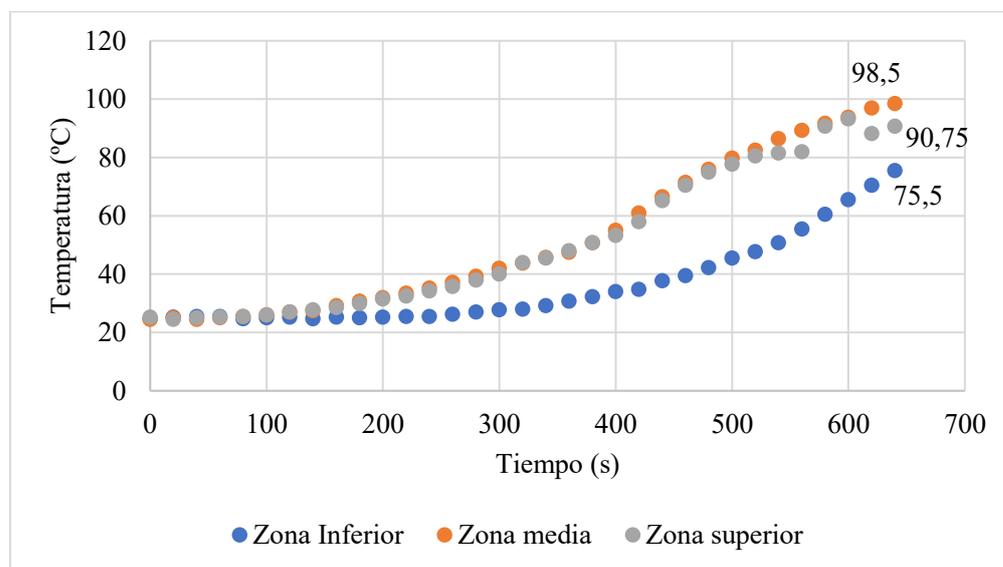
III. RESULTADOS

3.1. Zona de más lento calentamiento en la retorta

En la Figura 2 se muestran los resultados de la prueba de distribución de calor, desde el inicio del proceso hasta que en una de las zonas (la inferior, en este caso) se aproximó a la temperatura establecida (100 °C).

Figura 2

Distribución de calor a los 640 s en las tres zonas del autoclave evaluado



A partir de los datos mostrados, el valor f_h de las tres zonas se muestra en la Tabla 2, cuyo valor más elevado (29,8841 min) es el de la zona inferior; por lo tanto, se definió como la ZLC.

Tabla 2

Valor f_h de la zona superior, media e inferior del autoclave

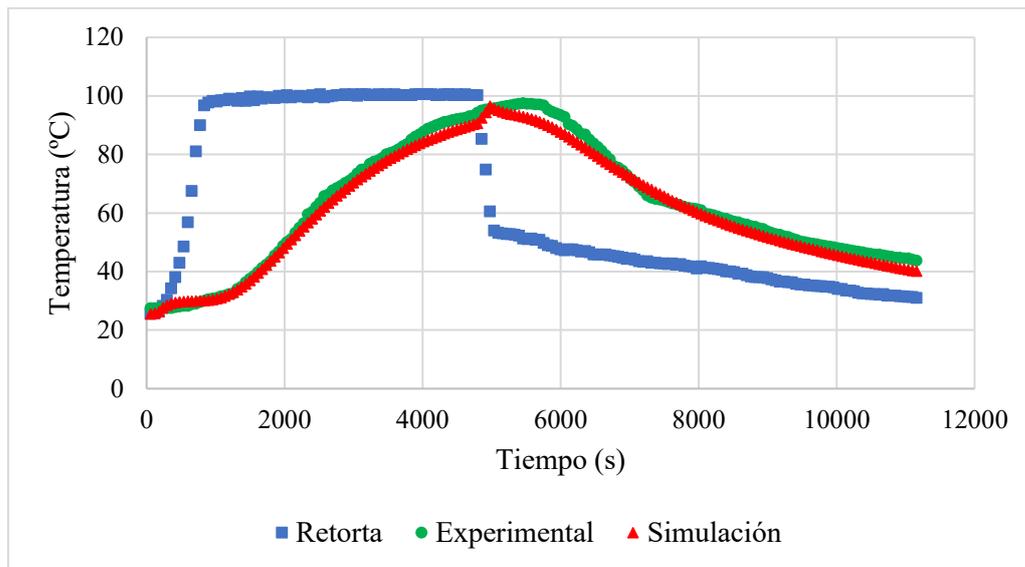
Zona	f_h (min)
Superior	5,6985
Media	8,3407
Inferior	29,8841

3.2. Estudio experimental y simulación de la transferencia de calor en el puré

El perfil de tiempo y temperatura de la retorta, además del comportamiento del puré medido experimentalmente y mediante simulación se muestran en la Figura 3.

Figura 3

Evolución de la temperatura en la retorta, y los valores predichos y experimentales en el centro geométrico del envase



Se simuló el comportamiento del puré durante el tratamiento térmico. Algunos contornos de temperatura se muestran en la Figura 4, donde se destaca que el PLC se ubica en el centro geométrico del envase. Su ubicación se visualiza mejor en la Figura 5.

Figura 4

Distribución de temperaturas (°C) a los a) 780 s (13 min), b) 2100 s (35 min), c) 5100 s (85 min), d) 9120 s (152 min), e) 10740 s (179 min)

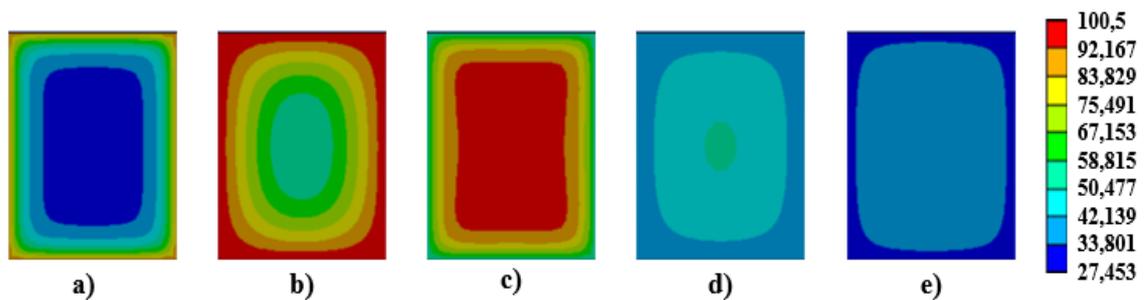
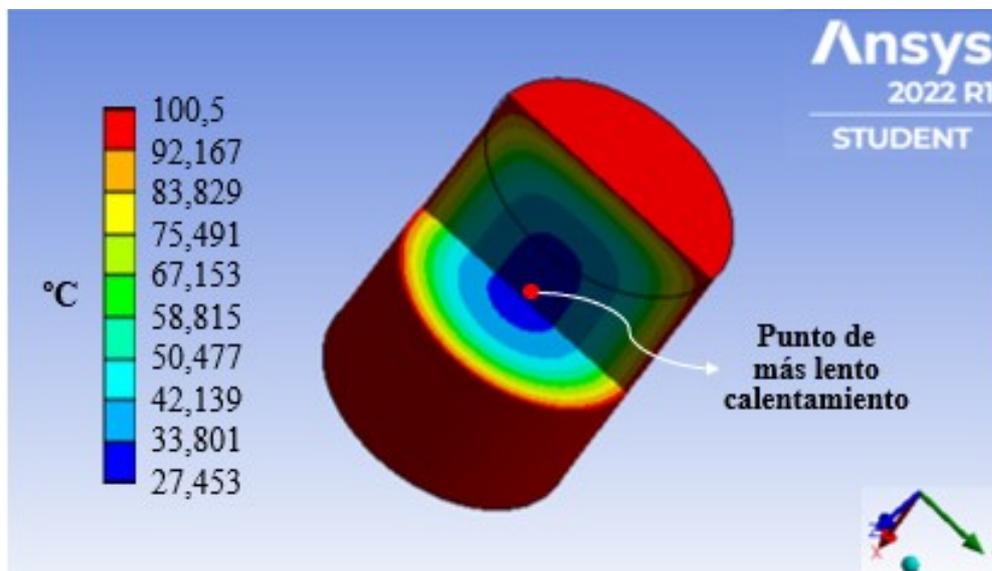


Figura 5

PLC en el modelo desarrollado a los 1140 s (19 min)



Por otro lado, se obtuvo la letalidad y otros parámetros de penetración de calor en el PLC a partir de los datos experimentales y de los datos obtenidos mediante simulación. Estos valores, además de los parámetros de validación entre ambos conjuntos de datos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

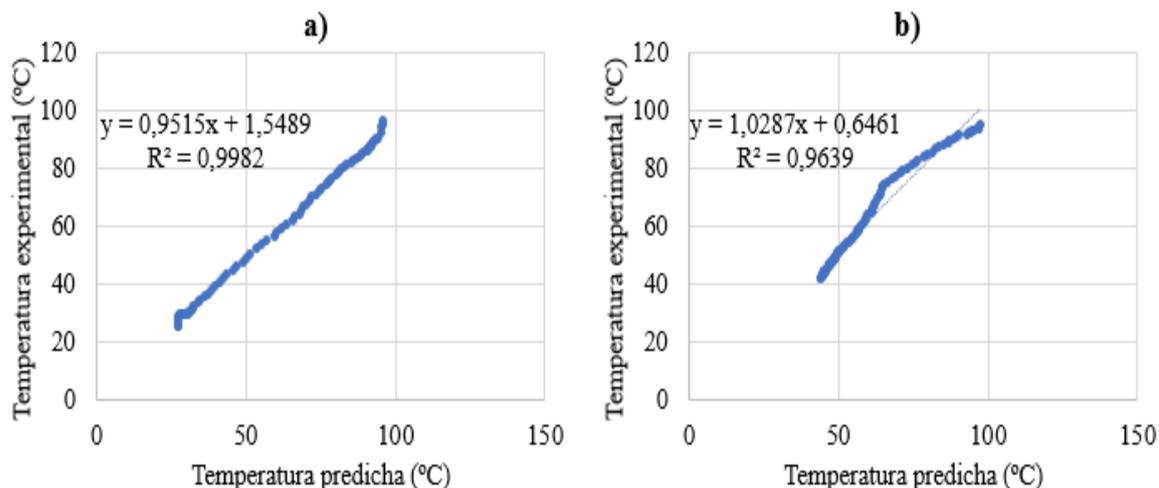
Validación del estudio experimental y de la simulación numérica

Datos	$P_{93,3}^{8,9}$ (min)	Tiempo de proceso (min)	de f_h (min)	j_h	R^2		RECM (°C)
					Etapa A	Etapa B	
Experimentales	5	77,35	44,77	4,59			
Simulados	5	76,46	61,56	2,42	0,9982	0,9639	2,5597
Diferencia (Δ)	0	0,89	16,79	2,17			

Nota: La *Etapa A* abarca el desde el inicio del proceso hasta el final del mantenimiento de la temperatura y la *Etapa B* abarca el periodo de enfriamiento, como se ve en la Figura 6a y 6b, respectivamente.

Figura 6

Temperatura experimental en el centro geométrico del envase y temperatura predicha por simulación en la etapa de a) calentamiento y b) enfriamiento



Asimismo, los resultados de la prueba t de student ($\alpha = 0,05$) mostraron una alta similitud entre los valores obtenidos por simulación y los datos experimentales en la etapa de calentamiento ($p = 0,227$) y en la de enfriamiento ($p = 0,819$). Al ser $p > 0,05$ en ambos casos, se acepta la H_0 . En este sentido, no existe diferencias significativas entre ambos conjuntos de datos.

3.3. Efecto del tratamiento térmico en la aceptabilidad del puré

De los 42 panelistas, se descartó una ficha de evaluación porque no se llenó correctamente con las puntuaciones del intervalo asignado (del 1 al 9). Según las 41 fichas seleccionadas, la edad promedio de los panelistas fue de $21 \pm 6,8$ años. Además, las mujeres representaron el 66% del total de panelistas. Como ejemplo, en el Anexo T se muestra una de las fichas llenadas.

Los resultados de la evaluación sensorial del puré sin tratar y de las muestras tratadas se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4*Puntuaciones sensoriales*

Atributos	Tratamiento*				
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
Color característico	6,63 ± 1,56 ^a	7,51 ± 1,33 ^{ab}	7,49 ± 1,33 ^{ab}	7,37 ± 1,64 ^{ab}	7,59 ± 1,53 ^b
Gusto por el color	7,66 ± 1,37	7,51 ± 1,29	7,32 ± 1,21	7,46 ± 1,31	7,68 ± 1,29
Consistencia	6,15 ± 2,20 ^a	6,34 ± 2,04 ^a	6,39 ± 1,58 ^a	7,46 ± 1,19 ^b	7,56 ± 1,18 ^b
Gusto por la textura	6,73 ± 1,67	6,73 ± 1,73	6,68 ± 1,52	6,32 ± 1,65	6,93 ± 1,72
Olor característico	7,90 ± 0,94 ^a	6,98 ± 1,54 ^b	7,05 ± 1,45 ^b	7,02 ± 1,39 ^b	7,90 ± 1,04 ^a
Gusto por el olor	7,22 ± 1,81	7,10 ± 1,48	7,20 ± 1,49	7,37 ± 1,32	7,44 ± 1,69
Sabor característico	7,07 ± 1,94	7,66 ± 1,28	7,32 ± 1,25	7,37 ± 1,22	7,61 ± 1,34
Gusto por el sabor	7,29 ± 1,85 ^a	7,51 ± 1,33 ^{abc}	7,44 ± 1,05 ^{ab}	8,10 ± 0,77 ^{bc}	8,24 ± 0,83 ^c
Aceptabilidad general	7,56 ± 1,66	7,83 ± 1,36	7,61 ± 1,12	7,63 ± 1,04	8,20 ± 0,90
Σ	64,21	65,17	64,50	66,10	69,15

Nota: Los resultados se muestran como promedio ± desviación estándar. Los superíndices distintos indican que hay diferencias significativas entre las filas. En estos casos, se acepta la H_i; si hay diferencias significativas entre la media de la puntuación de cada atributo evaluado. Caso contrario, no hay diferencias significativas, aceptándose la H₀.

*T₀: muestra sin tratar, T₁: 80 °C por 20 min, T₂: 90 °C por 10 min, T₃: 100 °C por 5 min, y T₄: 110 °C por 3 min.

IV. DISCUSIONES

La dispersión de temperatura en una retorta suele ser uniforme, pero es común que haya regiones cuya temperatura es inferior a la medida por el controlador (Tucker y Featherstone, 2021). Como se ve en la Figura 2, en la zona inferior del autoclave hubo mayor demora en llegar a la temperatura establecida (100 °C), seguida de la zona media y de la zona superior. Esto se corroboró con lo mostrado en la Tabla 2. El valor f_h (29,8841 min) fue más elevado en la zona inferior, a comparación de la zona media (8,3407 min) y zona superior (5,6985 min). Este resultado coincide con el estudio de Chambi y Huacullo (2020), cuyos valores más altos de f_h indicaron un mayor retraso en la subida de la curva de calentamiento, pero en este caso, la ZLC se ubicó en la zona media. La razón podría ser que la entrada de vapor del autoclave estudiado se encuentra en la parte superior; por lo tanto, el aumento de temperatura es más lento a medida que aumenta la distancia con dicha entrada. Berteli et al. (2012); Berteli et al. (2013) realizaron una prueba de distribución de calor en una retorta vertical dividida en cinco zonas y tres zonas, respectivamente, obteniendo los mismos resultados. Curiosamente, en la prueba de distribución de calor en una retorta vertical dividida en 9 niveles, Gil et al. (2020) determinaron que, la ZLC se ubicó en la zona media. Esto se asoció en que el vapor enfrenta dificultades para llegar a esa zona debido a la carga en el autoclave (otros sensores y los alimentos envasados).

Como se muestra en la Figura 3, el periodo de calentamiento en la retorta duró 1860 s (31 min), el mantenimiento de la temperatura (alrededor de 100 °C) duró 2940 s (49 min) y el enfriamiento hasta los 31 °C duró 6360 s (106 min). En total, el procesamiento duró 11160 s (186 min, 3,1 h). Se podría decir que el proceso fue largo, pero esto es inherente a las condiciones de la retorta; el autoclave demoró en alcanzar la temperatura establecida. En el inicio del proceso, la temperatura de la retorta fue muy superior a la del centro geométrico del envase. Esta diferencia se redujo a medida que transcurría el tiempo, hasta la etapa de

mantenimiento de temperatura. En el estudio de Lespinard et al. (2012) ocurrió lo mismo al pasteurizar mermelada de kiwi. Al iniciar, el aire contenido en el autoclave evitaba la correcta transferencia de calor al actuar como aislante térmico. A medida que aumentaba la temperatura, se generaba mayor vapor de agua, mejorando la transferencia de calor por convección. Posteriormente, aunque había iniciado el periodo de enfriamiento, la temperatura del alimento siguió aumentando por 10 min. Esto fue debido a la inercia térmica. Igualmente pasó cuando Azar et al. (2020) evaluaron la esterilización de un guiso de apio. Aunque el envase empleado fue de aluminio, la temperatura del producto siguió aumentando por la diferencia con la temperatura de la pared del envase. Transcurrido los 10 min, empezó a disminuir la temperatura del puré, pero de forma menos abrupta que la de la retorta.

Por otro lado, en la Figura 4, la simulación muestra que se produce un calentamiento excesivo en las zonas cercanas a la pared del envase. Debido a la naturaleza del alimento, las partículas de la zona caliente no se desplazan a las zonas más frías (Raits et al., 2021). Esto es indeseable porque se produce una cocción no uniforme que afecta las características sensoriales y nutritivas del alimento, y favorece la proliferación de microorganismos (Rinaldi et al., 2018). Se corrobora que en el centro geométrico se ubica el PLC debido a que, en la transferencia de calor por conducción no hay movimiento físico del producto (Erdoğdu et al., 2010). Esta región es muy grande en el inicio del proceso (Figura 4a), pero se reduce a medida que transcurre el calentamiento (Figura 4b). Lo mismo ocurre en el proceso de enfriamiento (Figura 4c, 4d y 4e), pero de forma contraria. En este caso, las zonas cercanas a la pared del envase se enfrían más rápido y en el centro geométrico se ubica la zona más *caliente*. Lo mismo determinaron Azar et al. (2020) al analizar los contornos de temperatura en la transferencia de calor de guiso de apio, cuyo mecanismo se basó en la conducción al igual que en este estudio. Los resultados concuerdan con investigaciones en las que se evaluaron otros alimentos como el guiso Fesenjan (Serami et al., 2020) y agua gelificada con agar (Erdoğdu et al., 2010). Sin embargo, al parecer,

esto solo ocurre cuando se emplean envases con geometrías regulares. Por ejemplo, en la pasteurización de papaya en estado de pulpa pastosa, da Silva et al. (2018) determinaron que el PLC se ubicó significativamente más arriba del centro geométrico de un envase arbitrario (o irregular) elaborado a partir de la unión de dos vasos idénticos (uno encima de otro). De igual manera, en la investigación de Rinaldi et al. (2018), el PLC durante el tratamiento térmico por conducción de soluciones de almidón al 6% en frascos cuadrados y acampanados no se encontraba exactamente en el centro geométrico.

La transferencia de calor por conducción se llevó a cabo en su totalidad porque se supuso que el envase estaba completamente lleno de puré. Si se consideraba el espacio de cabeza, el resultado podría haber sido distinto como en el estudio de Farazbakht et al. (2016). Los autores determinaron que, el PLC en un envase de aluminio semirrígido lleno de pasta de tomate se ubicó en el centro geométrico durante todo el proceso. Al considerar el espacio de cabeza, el PLC varió con una significancia que aumentó a medida que transcurría el proceso. Esta asimetría fue por la presencia de flujos débiles sobre la pasta. En contraste, en el estudio de Shafiekhani et al. (2016), el espacio de cabeza no influyó en la ubicación y forma del PLC durante el tratamiento térmico de un puré de manzana en el mismo envase. El mecanismo subyacente en estas diferencias es tema de futuros estudios.

Concerniente a los factores para describir la penetración de calor (Tabla 3), el valor f_h de los datos experimentales y de los datos predichos fue de 44,77 y 61,56 min, respectivamente. También se encontró diferencias respecto al valor j_h (4,59 en el estudio experimental y 2,42 por simulación). En la transferencia de calor por conducción, el calor fluye de una temperatura alta a una baja por medio de la energía vibratoria. Las moléculas que reciben energía térmica vibrarán más, *chocando* con las moléculas de al lado. La lenta transferencia de calor durante la conducción se debe a esta vibración molecular (Tucker y Featherstone, 2021). Ya que el PLC se ubica en el centro geométrico (Figura 5), es mayor el tiempo para que fluya la temperatura

desde el exterior. A diferencia del estudio experimental, en la simulación no se consideró el espacio de cabeza. Este factor contribuyó en un valor f_h más bajo (y j_h más alto) experimentalmente debido a la intervención de la convección en ese espacio (Anexo U). Otro factor a tener en cuenta es el error de conducción de los termopares. Respecto al valor P , se determinó que, en términos de efecto esterilizante, el tratamiento térmico mínimo que se necesita para evitar la supervivencia de las esporas de *B. fulva* a 93,3 °C debe ser 5 min según el estudio experimental y la simulación. Asimismo, la diferencia entre el tiempo de proceso fue mínima ($\Delta = 0,89$ min). En otros estudios se determinó que, con alrededor de F_0 de 4,96 min se alcanzaría la esterilidad en puré de manzana (Shafiekhani et al., 2016) y alrededor de 5,3 min en pasta de tomate (Farazbakht et al., 2016), ambos en envases de aluminio semirrígido. Asimismo, el F_0 de melocotón, pera, piña, uva y cereza osciló entre 1,56 y 9,70 min (Cordioli et al., 2015). En todos los casos, la letalidad experimental y simulada tenían alta semejanza.

Para determinar la similitud entre la temperatura medida experimentalmente y la predicha por simulación, se validaron los resultados obtenidos. Los valores R^2 mostrados en la Tabla 3 y en la Figura 6 para el periodo de calentamiento y enfriamiento entre los dos conjuntos de datos fue de 0,9982 y 0,9639. Al ser cercanos al 1, significa que los modelos se ajustan casi en su totalidad a los datos. El valor R^2 es menor en el enfriamiento porque en la simulación el valor h del vapor de agua (5000 W/m² K) fue constante en todo el proceso. Al usarse agua para el enfriamiento, se podría usar un valor h menor y así obtener resultados más precisos en esa etapa. El valor RECM (2,5597 °C) también indica que el error existente entre los conjuntos de datos experimentales y simulados es bajo. Por último, la prueba t de student determinó que no existe diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los datos experimentales y simulados durante el calentamiento y enfriamiento. De esta forma se validó este estudio; específicamente, el modelamiento y simulación de la transferencia de calor por el método de elementos finitos.

La Tabla 4 muestra los puntajes de la evaluación sensorial en términos de intensidad o gusto de los atributos. El color es un parámetro vital en la aceptación de un producto alimentario al ser la primera característica que atrae la atención de los consumidores. De acuerdo con los panelistas, la muestra sin tratar (T_0) tiene menos intensidad de color que todas las demás. Las muestras T_1 (80 °C, 20 min), T_2 (90 °C, 10 min) y T_3 (100 °C, 5 min) fueron considerados con una intensidad mayor y, por último, la muestra T_4 (110 °C, 3 min) se definió como la de color más intenso, lo cual se puede visualizar en el Anexo V. El pardeamiento generado se asoció a la reacción de Maillard debido a la cocción, lo cual también ocurrió en la pasteurización de jugo de ciruela porcina a 90 °C por 1 min por parte de Oladunjoye et al. (2021). En el estudio de Oliveira et al (2011), la pulpa de umbú tratada a 88-96 °C por 10-30 s perdió ligeramente su color amarillo/naranja y mostró oscurecimiento por la oxidación de pigmentos como los carotenoides y la polimerización de los compuestos fenólicos. No hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) en el gusto por el color, pero la muestra T_4 tuvo mayor puntaje a pesar de haber pasado por el tratamiento más severo en términos de temperatura.

Para los panelistas, las muestras T_3 y T_4 fueron más espesas que las demás ($p < 0,05$). Curiosamente, el puntaje es menor en las muestras tratadas con temperaturas más bajas, y las muestras sin tratar tuvo el puntaje más bajo. Zhang et al. (2019) evaluaron la influencia del envasado de puré de camote esterilizado con asistencia de microondas sobre su aceptación. Según los panelistas, algunas muestras eran más *acuosas* que otras. Los autores mencionaron que, dichas muestras habían tenido menor pérdida de agua que las otras. Esto se relaciona con el presente estudio. Las muestras sometidas a mayor temperatura perdieron más proporción de agua y fueron consideradas como más espesas por los panelistas. A pesar de ello, no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) en el gusto por la textura entre todas las muestras. Por otro lado, algunos panelistas manifestaron sentir considerablemente la cáscara de las frutas en el

puré y lo consideraron como poco deseable. Esto influyó en puntajes relativamente bajos en todas las muestras, a comparación de los otros atributos.

También se observaron diferencias ($p < 0,05$) en el olor característico. Las muestras T_0 y T_4 frente a las muestras T_1 , T_2 y T_3 . El primer grupo tuvo puntajes más altos. Asimismo, no se mostró diferencias significativas ($p > 0,05$) en el gusto por el olor. No hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) respecto al sabor característico, pero sí en el gusto por el sabor ($p < 0,05$). La muestra T_0 tuvo el puntaje más bajo y la muestra T_4 , el puntaje más alto, siendo definida como la más dulce. Estos resultados tienen relación con los obtenidos por Ledeker et al. (2014), quienes prepararon puré de seis cultivares de mango tailandés ($85\text{ }^\circ\text{C}$ por 15 s). De acuerdo con los autores, el tratamiento térmico degradó el ácido ascórbico del mango y provocó reacciones entre los aminoácidos y azúcares reductores. A su vez, esto desarrolló compuestos aromáticos como el 5-metilfurfural y el acetilfurano, intensificando el sabor acaramelado. Asimismo, el olor menos intenso en las muestras T_1 , T_2 y T_3 es por la pérdida de la concentración de algunos compuestos volátiles durante el calentamiento. Aunque se empleó temperaturas más elevadas en el tratamiento a la muestra T_4 , el tiempo de proceso fue más corto. Esto habría mantenido el equilibrio característico del aroma del puré.

Por último, no se halló diferencias significativas ($p > 0,05$) en la aceptabilidad general de las muestras. Sin embargo, en este ítem se ratificó la preferencia por la muestra T_4 . Esto sugiere que es ideal los tratamientos con altas temperaturas durante periodos de tiempo más cortos.

V. CONCLUSIONES

5.1. Conclusión general

Aprovechando el valor nutricional y bioactivo de las frutas y subproductos infravalorados de Piura, se elaboró un puré a base de pulpa de banano, pulpa y cáscara de mango ciruelo, y pulpa y cáscara de mango Kent. Para comprender la transferencia de calor durante su pasteurización con miras a la optimización del proceso, se realizó una simulación numérica. Los resultados se validaron al compararlos con los obtenidos experimentalmente ($p > 0,05$). Esto resulta prometedor ya que, con el enfoque y modelo propuestos se predijo con éxito y rápidamente el comportamiento del puré durante el tratamiento térmico. Asimismo, según la evaluación sensorial, la muestra más aceptada fue la tratada con la temperatura más elevada, pero con menor tiempo, habiendo tenido diferencias significativas ($p < 0,05$) en algunos atributos respecto a las otras muestras.

5.2. Conclusiones específicas

- De acuerdo con la prueba de distribución de calor, la zona inferior es la de más lento calentamiento en el autoclave empleado al tener un valor f_h (29,8841 min) mayor. En dicha zona se debe enfocar las evaluaciones correspondientes ya que, al ser menos favorable, si esta logra cumplir con los parámetros establecidos, ocurrirá lo mismo con las demás, sin necesidad de realizar los análisis en dichas zonas.
- Se determinó que el PLC se ubicó en el centro geométrico del envase cilíndrico de vidrio. El valor P del proceso experimental y la simulación de la transferencia de calor por conducción mediante el método de elementos finitos fue de 5 min para ambos. Hubo diferencias en el tiempo de proceso ($\Delta = 0,89$ min) y los parámetros de penetración de calor f_h ($\Delta = 16,79$ min) y j_h ($\Delta = 2,17$) por las suposiciones que se realizaron en la simulación. Se obtuvo un valor R^2 de 0,9982 en el periodo de calentamiento y 0,9639 en el periodo de enfriamiento, además de un valor RECM de

2,5597 °C. Se concluyó que los datos experimentales y predichos no tuvieron diferencias significativas ($p > 0,05$).

- A partir de la evaluación sensorial, las muestras tuvieron diferencias significativa ($p < 0,05$) respecto al color característico, consistencia, olor característico y gusto por el sabor. Todas las muestras fueron bien recibidas por los panelistas. En general, la muestra que tratada a 110 °C por 3 min tuvo un mayor puntaje, incluso más que la muestra cruda. De acuerdo con la literatura, al emplear temperaturas más elevadas y por periodos de tiempo menores se desarrollaron aromas y sabores agradables para el consumidor.

VI. RECOMENDACIONES

- a) Valorizar la materia prima mediante otras formas como la elaboración de otros productos o para extraer compuestos bioactivos de interés.
- b) Emplear más sensores para la prueba de distribución de calor y también para determinar experimentalmente el PLC en el envase.
- c) Emplear sensores inalámbricos más precisos y versátiles, y sistemas multicanal para registrar simultáneamente los datos de múltiples sensores.
- d) Determinar las propiedades termofísicas del producto experimentalmente para que, los valores obtenidos sean más precisos y se obtengan mejores resultados en la simulación.
- e) Evaluar variables independientes como el espacio de cabeza, el tipo, geometría, posición y rotación del envase, además de otras como el refinamiento de la malla y el paso del tiempo.
- f) Evaluar variables dependientes como la degradación de nutrientes mediante el valor de cocción.
- g) Simular (o aparentar) un tratamiento térmico común al colocar envases llenos de agua cerca de los envases con el alimento.
- h) Adquirir licencia de Ansys u otro software similar como Comsol para tener un abanico de opciones más amplio y así realizar un mejor modelamiento y simulación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Awuah, G. B., Ramaswamy, H. S. y Economides, A. (2007). Thermal processing and quality: Principles and overview. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(6), 584-602. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.08.004>
- Azar, A. B., Ramezan, Y. y Khashehchi, M. (2020). Numerical simulation of conductive heat transfer in canned celery stew and retort program adjustment by computational fluid dynamics (CFD). *International Journal of Food Engineering*, 16(9), 20190303. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0303>
- Berteli, M. N., Vitali, A. A., Berto, M. I. y Jr, A. M. (2013). Alternative venting in steam retorts—An approach to energy savings in thermal processing. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 70, 204-210. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2013.03.020>
- Berteli, M. N., Vitali, A. A., Jr, A. M. y Berto, M. I. (2012). The analysis of an alternative approach to the venting process in retorts operating under steam pressure. *Journal of Food Engineering*, 109, 288-398. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.11.014>
- Chambi, S. C. y Huacullo, L. (2020). *Estudio del tratamiento térmico con TEMper V24.1 en la elaboración de una salsa picante a base de pimiento rojo (Capsicum annuum L.) y aceituna verde fermentada (Olea europaea L.)* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/12233>
- Chaouch, M. A. y Benvenuti, S. (2020). The Role of Fruit by-Products as Bioactive Compounds for Intestinal Health. *Foods*, 9, 1716. <https://doi.org/10.3390/foods9111716>
- Cordioli, M., Rinaldi, M., Copelli, G., Casoli, P. y Barbanti, D. (2015). Computational Fluid Dynamics (CFD) Modelling and Experimental Validation of Thermal Processing of

- Canned Fruit Salad in Glass Jar. *Journal of Food Engineering*, 150, 62-69.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.11.003>
- da Silva, W. P., de Ataíde, J. S. P., de Oliveira, M. E. G., Silva, C. M. D. P. S. y 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>
- Erdoğdu, F., Karatas, O. y Sarghini, F. (2018). A short update on heat transfer modelling for computational food processing in conventional and innovative processing. *Current Opinion in Food Science*, 23, 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.10.003>
- Erdoğdu, F., Uyar, R. y Palazoğlu, T. K. (2010). Experimental comparison of natural convection and conduction heat transfer. *Journal of Food Process Engineering*, 33, 85-100. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00309.x>
- Fadji, T., Ashtiani, S. H. M., Onwude, D. I., Li, Z. y Opara, U. L. (2021). Finite Element Method for Freezing and Thawing Industrial Food Processes. *Foods*, 10, 869. <https://doi.org/10.3390/foods10040869>
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2014). *Food wastage footprint: Full-cost accounting (Final Report)*. <http://www.fao.org/3/i3991e/i3991e.pdf>
- Farazbakht, F., Zamindar, N., Hojjatoleslami, M. y Toghraie, D. Numerical simulation of transient heat transfer for tomato paste in semi rigid aluminum container. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11, 479-487. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9415-z>
- Gil, A. G., González, O. A. O., Sepúlveda, L. F. C. y Torres, P. N. A. (2020). Venting stage experimental study of food sterilization process in a vertical retort using temperature

- distribution tests and energy balances. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, 100736. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100736>
- Holdsworth, S. D. y Simpson, R. (2016). *Thermal Processing of Packaged Foods* (3era edición). Suiza: Springer.
- Huamaní, C. J. (2022). *Elaboración de puré de Tumbo serrano (Passiflora mollissima H.B.K.), maximizando la retención del ácido ascórbico* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5192>
- Kızıltaş, S., Erdoğan, F. y Palazoğlu, T. K. (2010). Simulation of heat transfer for solid–liquid food mixtures in cans and model validation under pasteurization conditions. *Journal of Food Engineering*, 97, 449-456. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.042>
- Ledeker, C. N., Suwonsichon, S., Chambers, D. H. y Adhikari, K. (2014). Comparison of sensory attributes in fresh mangoes and heat-treated mango purées prepared from Thai cultivars. *LWT - Food Science and Technology*, 56, 138-144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2013.11.011>
- Lepinard, A. R. (2012). *Simulación y Optimización del Tratamiento Térmico de Alimentos Envasados en Recipientes de Vidrio* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de la Plata]. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/2671>
- Lepinard, A. R., Badin, E. E., Santos, M. V. y Mascheroni, R. H. (2019). Computational fluid dynamics analysis on natural convective heating of bottled liquid food during pasteurization: Effect of container orientation. *Journal of Food Process Engineering*, 42, e12995. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12995>
- Lepinard, A. R., Bambicha, R. R. y Mascheroni, R. H. (2012). Quality parameters assessment in kiwi jam during pasteurization. Modelling and optimization of the thermal process.

Food and Bioproducts Processing, 90, 799-808.

<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.03.001>

Lespinaud, A. R., Salgado, P. R. y Mascheroni, R. H. (2008). Heat Transfer and Flow Pattern during Sterilization of Liquid Food Packaged in Glass Jars. *International Conference of Agricultural Engineering XXXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola* (p. 4). Brasil.

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>

Malekjani, N. y Jafari, S. M. (2018). Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 206-223. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.006>

MIDAGRI – Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú (2019). *Anuario Estadístico de Producción Agrícola 2019*. <https://siea.midagri.gob.pe/portal/publicacion/boletines-anuales/4-agricola>

MINAGRI – Ministerio de Agricultura y Riego del Perú (2015). *Mango: Perú un campo fértil para sus inversiones. Boletín Pro Inversión*. <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/herramientas/organizaciones/dgca/mango.pdf>

MINSA - Ministerio de Salud del Perú. (2008). NTS N°069-MINSA/DIGESA-V.01. *Norma sanitaria aplicable a la fabricación de alimentos envasados de baja acidez y acidificados destinados al consumo humano*. https://www.saludarequipa.gob.pe/desa/archivos/Normas_Legales/alimentos/RM_495-2008-MINSA.pdf

- Miranda-Zamora, W. R., Vignolo, T. G. y Leyva, N. L. (2012). *Ingeniería del tratamiento térmico de alimentos*. Perú: Universidad Nacional de Piura.
- Nedamani, A. R., Ziaifar, A. M., Parvini, M., Kashaninejad, M. y 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, e13709. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13709>
- Niño, P. D. P. y Arévalo, L. M. T. (2021). *Viabilidad financiera y diseño de un sistema productivo de mermelada de mango ciruelo con panela para la comunidad agrícola de Vista Florida* [Tesis de pregrado, Universidad de Piura]. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/4985>
- Oladunjoye, A. O., Adeboyejo, F. O., Okekunbi, T. A. y Aderibigbe, A. R. (2021). Effect of thermosonication on quality attributes of hog plum (*Spondias mombin* L.) juice. *Ultrasonics – Sonochemistry*, 70, 105316. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105316>
- Oliveira, E. A., Borges, S. V., Furtado, A. A. L., Modesta, R. C. D. y Godoy, R. O. (2011). Heat processing (HTST) of umbu (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara) pulp. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 31(4), 923-928. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612011000400015>
- Park, H. W. y Yoon, W. B. (2018). Computational Fluid Dynamics (CFD) Modelling and Application for Sterilization of Foods: A Review. *Processes*, 6(6), 62. <https://doi.org/10.3390/pr6060062>
- Raits, E., Pinte, L., Kirse-Ozolina, A. y Muizniece-Brasava, S. (2021). A Case-study: Temperature Distribution and Heat Penetration in Steam-air Retort, Using Glass Jars and Retort Pouches. *Rural Sustainability Research*, 46(341), 90-96. <https://doi.org/10.2478/plua-2021-0020>

- 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 Bioprocesses Processing*, 108, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.12.003>
- Sant'Ana, A. S., Rosenthal, A. y Massaguer, P. R. (2009). Heat resistance and the effects of continuous pasteurization on the inactivation of *Byssoschlamys fulva* ascospores in clarified apple juice. *Journal of Applied Microbiology*, 107, 197-209. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04195.x>
- Serami, M. S., Ramezan, Y. y Khashehchi, M. (2020). CFD simulation and experimental validation of in-container thermal processing in Fesenjan stew. *Food Science & Nutrition*, 9, 1079-1087. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2083>
- Shafiekhani, S., Zamindar, N., Hojatoleslami, M. y 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>
- Singh, R. P. y Heldman, D. R. (2014). *Introduction to Food Engineering* (5ta edición). Estados Unidos: Academic Press.
- Tirado-Kulieva, V., Atoche-Dioses, S. y Hernández-Martínez, E. (2021). Phenolic compounds of mango (*Mangifera indica*) by-products: Antioxidant and antimicrobial potential, use in disease prevention and food industry, methods of extraction and microencapsulation. *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 283-293. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.031>
- Tucker, G. & Featherstone, S. (2021). *Essentials of Thermal Processing* (2da edición). Estados Unidos: John Wiley & Sons.

- Yap, M., Fernando, W. M. A. D. B., Brennan, C. S., Jayasena, V. y Coorey, R. (2017). The effects of banana ripeness on quality indices for puree production. *LWT - Food Science and Technology*, 80, 10-18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.073>
- Zamora, W. R. M., Chero, M. J. J., Timaná-Alvarez, M., Seminario-Morales, V., Niño-Carmona, C., Leyva, N., More, L. A. V., Ticona-Carrizales, L. y Ygnacio, A. (2021). Program in Visual Basic Language: A Simplified Procedure for Thermal Treatment Evaluation of Packaged Foods. En: Russo, D., Ahram, T., Karwowski, W., Di Bucchianico, G. y Taiar, R. (Eds.), *Intelligent Human Systems Integration IHSI* (pp. 476-481). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68017-6_71
- Zhang, H., Patel, J., Bhunia, K., Al-Ghamdi, S., Sonar, C. R., Ross, C. F., Tang, J. y Sablani, S. S. (2019). Color, vitamin C, β -carotene and sensory quality retention in microwave-assisted thermally sterilized sweet potato puree: Effects of polymeric package gas barrier during storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100324. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100324>

ANEXOS

Anexo A

Determinación de la constante de tiempo (τ) de los termopares

Con una temperatura inicial de 28 °C, cada termopar se introdujo en agua hirviendo (100,25 °C) y se midió la temperatura cada 10 s. τ se determinó con base en la ecuación 6.

$$\ln\left(\frac{T - T_m}{T_0 - T_m}\right) = -\frac{t}{\tau} \quad (6)$$

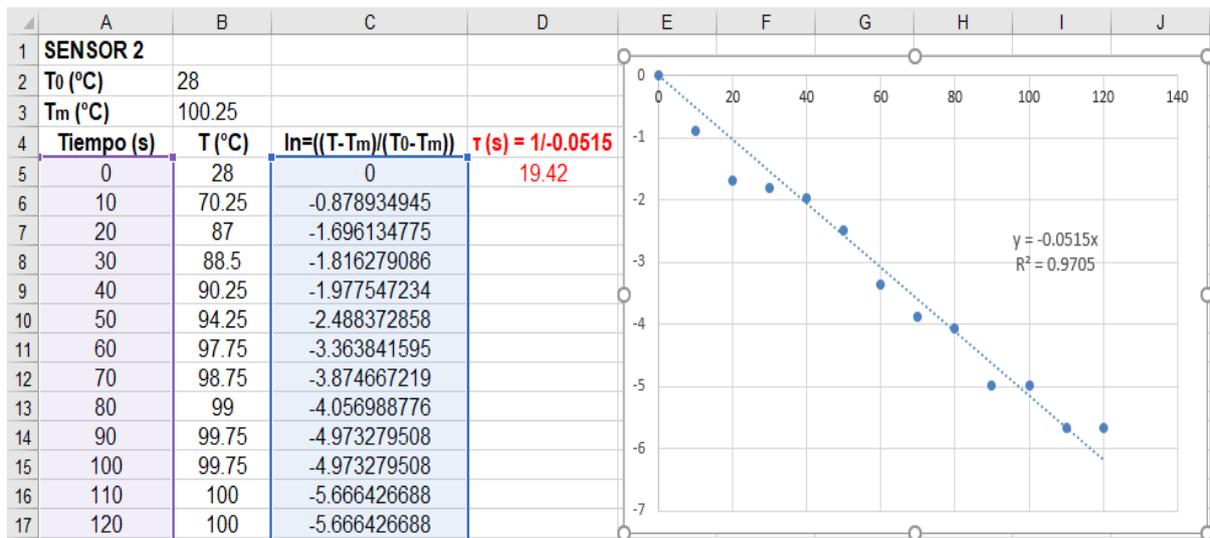
En una hoja de cálculo se realizó una gráfica cuyo valor del eje de las abscisas (x) y del eje de las ordenadas (y) se sustituye como se muestra en la ecuación 7.

$$Y = \frac{1}{\tau}x \quad (7)$$

Considerando que Y es la pendiente (m), simplificando, τ se obtiene siguiendo la ecuación 8.

$$\tau = \frac{1}{m} \quad (8)$$

Según los resultados obtenidos, el valor de τ del sensor 1, 2 y 3 fue 17,27, 19,42 y 17,64 s, respectivamente. Como ejemplo, a continuación, se muestra cómo se obtuvo τ del sensor 2.



Anexo B

Lavado y desinfección del mango ciruelo (a), banano (b) y mango Kent (c)



Anexo C

Escaldado de la materia prima: calentamiento (a) y enfriamiento (b)



Anexo D

Pelado del banano (a) y despepitado del mango ciruelo (b) y mango Kent (c)



Anexo E

Bananos pelados sumergidos en la solución de zumo de limón al 5%



Anexo F*Formulación/pesado de la materia prima*

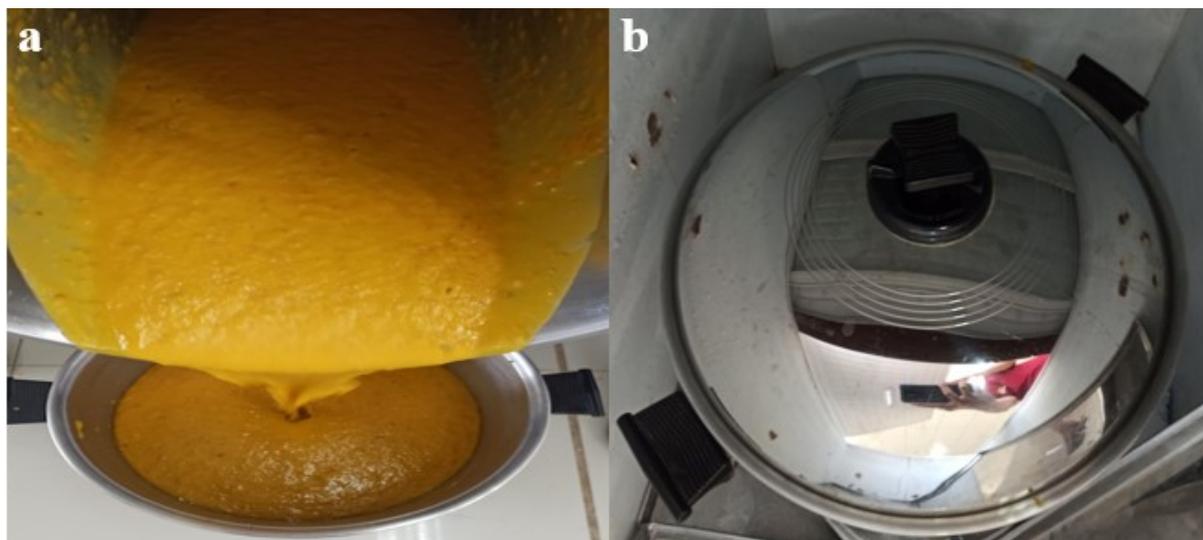
Anexo G

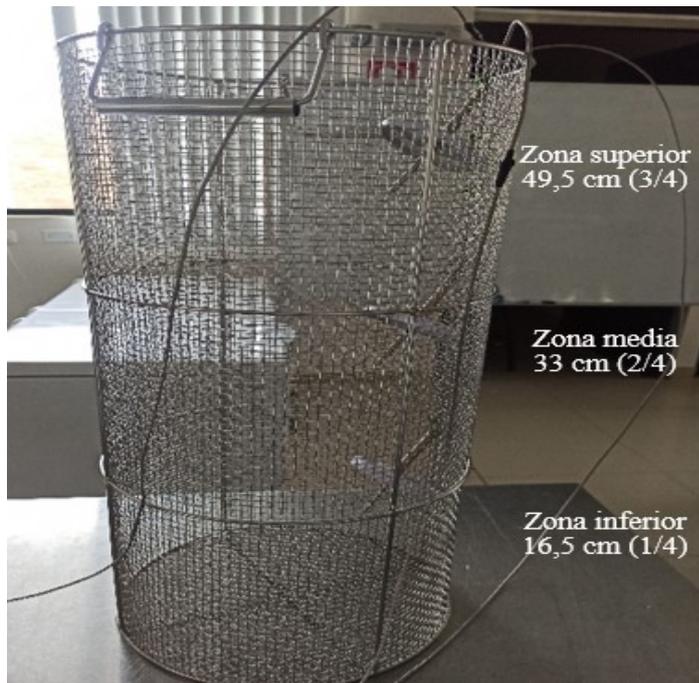
Homogeneizado de la materia prima



Anexo H

Envasado (a) y almacenamiento (b) del puré



Anexo I*Distribución de las termocuplas en la cesta del autoclave*

Nota: Los valores expresan la altura desde la base de la cesta (60 cm).

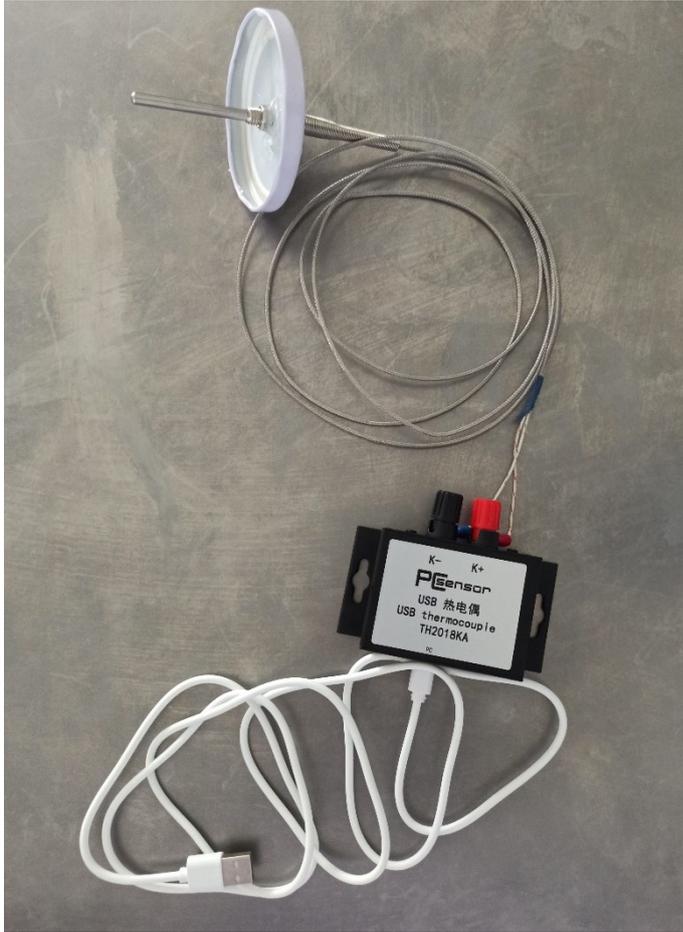
Anexo J

Conexión autoclave-termocuplas-laptop y condiciones de operación



Anexo K

Aseguramiento de la hermeticidad del sensor en la tapa



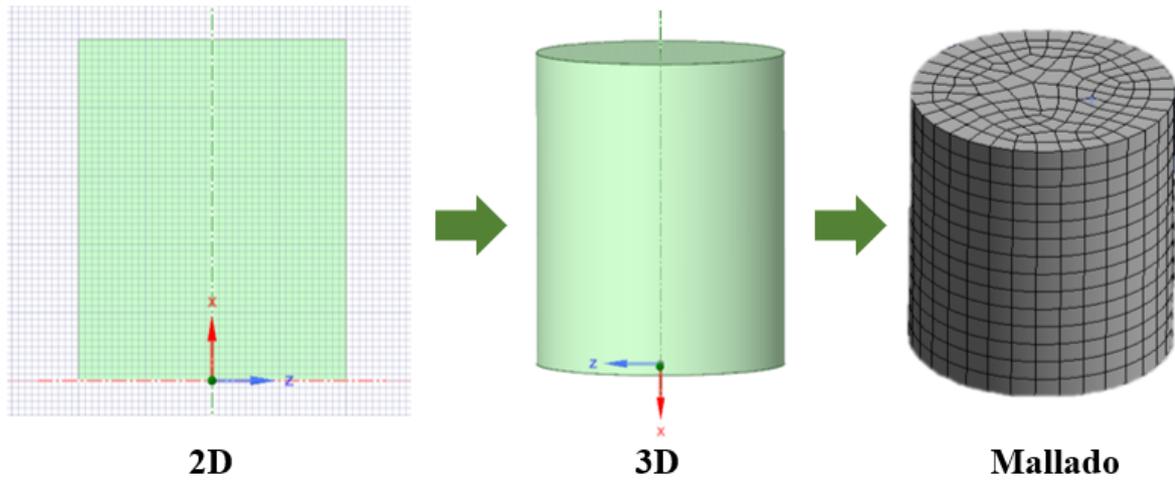
Anexo L

Sensor de termopar en el centro geométrico del envase con el puré



Anexo M

Creación y mallado de la geometría del envase



Anexo N

Designación de las propiedades termofísicas del puré

Properties of Outline Row 4: Puré  Puré			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Material Field Variables	 Table	
3	 Density	1080.2	kg m ⁻³ ▼
4	 Isotropic Thermal Conductivity	0.56	W m ⁻¹ C ⁻¹ ▼
5	 Specific Heat Constant Pressure, C _p	3590	J kg ⁻¹ C ⁻¹ ▼

Anexo O

Modelos de Choi y Okos para estimar las propiedades termofísicas de un alimento según su composición proximal y en función de la temperatura

Propiedad	Fórmula	Componente	Modelo
ρ (kg/m ³)	$\frac{1}{\sum \frac{m_i}{\rho_i}}$	Carbohidratos	$1,5991 \times 10^3 - 3,1046 \times 10^{-1} T$
		Proteínas	$1,3299 \times 10^3 - 5,1840 \times 10^{-1} T$
		Lípidos	$9,2559 \times 10^2 - 4,1757 \times 10^{-1} T$
		Fibra	$1,3115 \times 10^3 - 3,6589 \times 10^{-1} T$
		Agua	$9,9718 \times 10^2 + 3,1439 \times 10^{-3} T - 3,7574 \times 10^{-3} T^2$
		Cenizas	$2,4238 \times 10^3 - 2,8063 \times 10^{-1} T$
c_p (kJ/kg °C)	$\sum [c_{pi}(m_i)]$	Carbohidratos	$1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3} T - 5,9399 \times 10^{-6} T^2$
		Proteínas	$2,0082 + 1,2089 \times 10^{-3} T - 1,3129 \times 10^{-6} T^2$
		Lípidos	$1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3} T - 4,8008 \times 10^{-6} T^2$
		Fibra	$1,8459 + 1,8306 \times 10^{-3} T - 4,6509 \times 10^{-6} T^2$
		Agua*	$4,1289 - 9,0864 \times 10^{-5} T + 5,4731 \times 10^{-6} T^2$
		Cenizas	$1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3} T - 3,6817 \times 10^{-6} T^2$
k (W/m °C)	$\sum [k_i(Y_i)]$ $Y_i = \frac{m_i/\rho_i}{\sum (m_i/\rho_i)}$	Carbohidratos	$2,0141 \times 10^{-1} + 1,3874 \times 10^{-3} T - 4,3312 \times 10^{-6} T^2$
		Proteínas	$1,7881 \times 10^{-1} + 1,1958 \times 10^{-3} T - 2,7178 \times 10^{-6} T^2$
		Lípidos	$1,8071 \times 10^{-1} - 2,7604 \times 10^{-4} T - 1,7749 \times 10^{-7} T^2$
		Fibra	$1,8331 \times 10^{-1} + 1,2497 \times 10^{-3} T - 3,1683 \times 10^{-6} T^2$
		Agua	$5,7109 \times 10^{-1} + 1,7625 \times 10^{-3} T - 6,7036 \times 10^{-6} T^2$
		Cenizas	$3,2962 \times 10^{-1} + 1,4011 \times 10^{-3} T - 2,9069 \times 10^{-6} T^2$

Fuente: Singh y Heldman (2014).

Nota: ρ_i , c_{pi} y k_i son la densidad (ρ), calor específico (c_p) y conductividad térmica (k) de cada componente, respectivamente. m_i y Y_i son la fracción másica y la fracción volumétrica de cada componente.

*Modelo predictivo empleado cuando el rango de temperatura es de 0 a 150°C.

Anexo P*Composición proximal del puré*

Parámetro	Resultado (%)	Método de ensayo
Humedad	78,57 ± 0,80	NOM-116-SSA1-1994: Determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico
Cenizas	0,50 ± 0,00	NMX-F-607-NORMEX-2013: Determinación de cenizas en alimentos
Proteína total	0,73 ± 0,06	NMX-F-089-S-1978: Determinación de extracto etéreo (método Soxhlet) en alimentos
Grasa total	0,23 ± 0,06	NMX-F-068-S-1980: Determinación de proteínas (método Kjeldahl)
Carbohidratos totales	19,97 ± 0,85	Por diferencia

Fuente: Evaluación realizada por Ensayos de Laboratorios y Asesorías Pintado E.I.R.L.

Nota: Los análisis se realizaron por triplicado y los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar.

Mango

83

0.4

0.4

0.2

15.9

Mango ciruelo

84.5

0.4

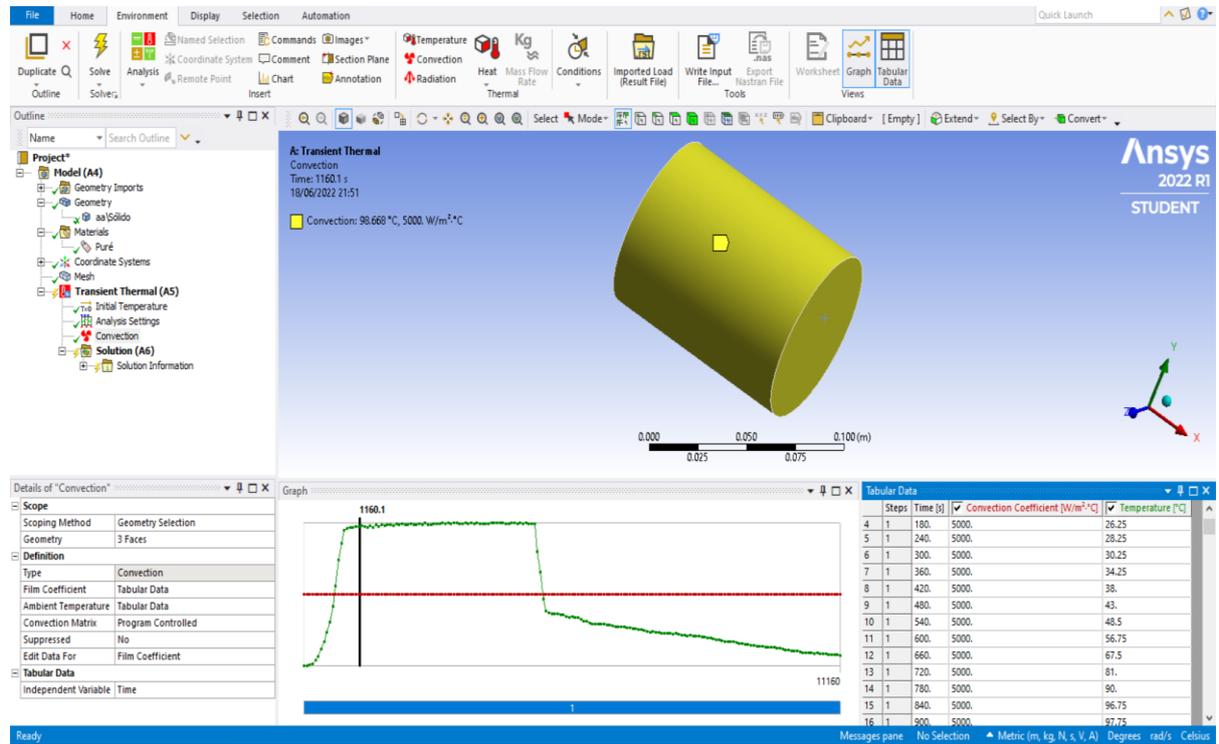
0.6

0.3

14.2

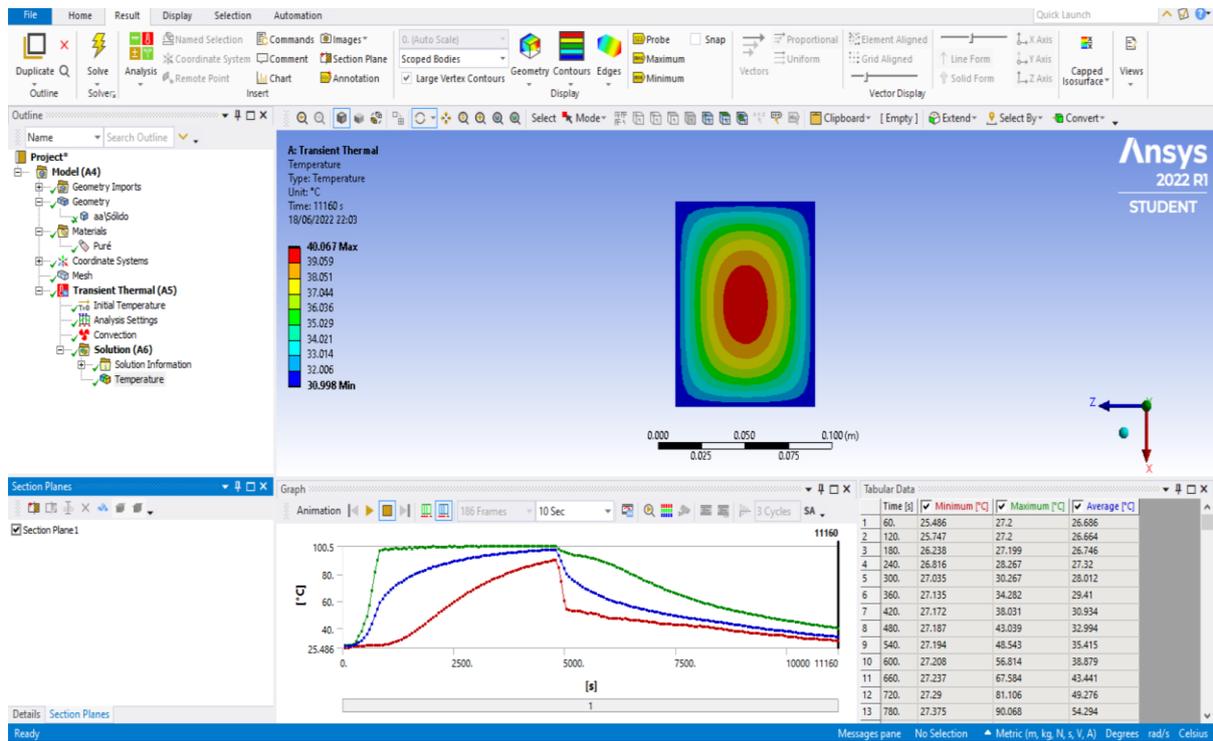
Anexo Q

Construcción del modelo matemático con las características de la retorta



Anexo R

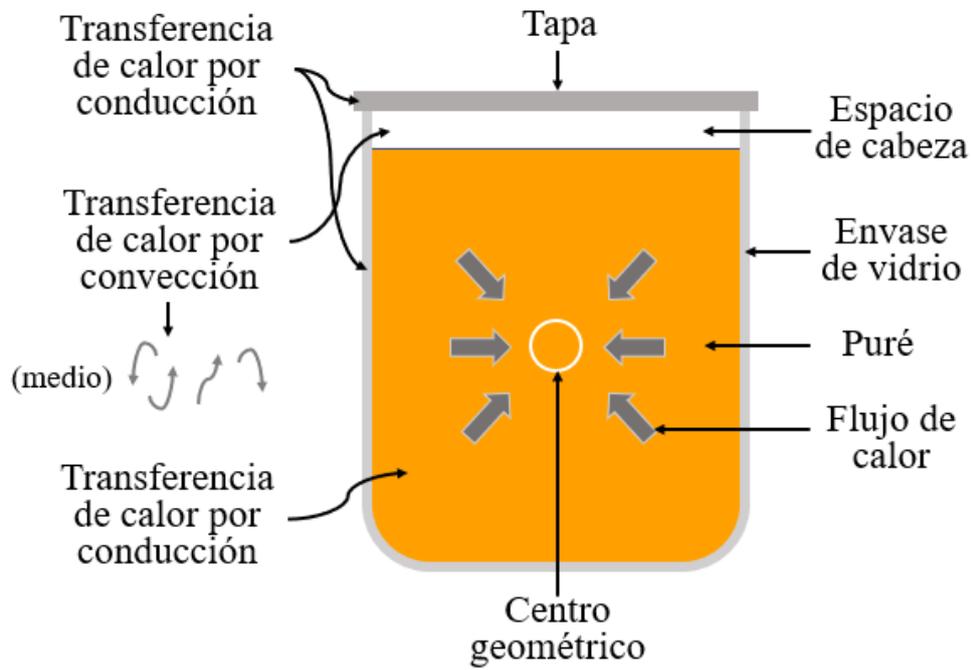
Simulación del perfil de tiempo-temperatura del alimento



Anexo S*Ficha de evaluación de la aceptabilidad del puré*

PURÉ MIXTO DE FRUTAS Y SUBPRODUCTOS					
Sexo:	Edad:				
<p>Deguste las muestras, las cuales son un puré natural a base de pulpa de banano, pulpa y cáscara de mango ciruelo, y pulpa y cáscara de mango Kent. Indique con puntajes del 1 al 9 su grado de satisfacción o preferencia en el código que corresponda. Cada vez que cambie de muestra, ingiera las galletas y beba el agua que tiene a su disposición.</p>					
	196	209	440	737	915
Color característico					
1 = Intensidad extremadamente baja	—	—	—	—	—
9 = Intensidad extremadamente alta					
Gusto por el color					
1 = Me disgusta extremadamente	—	—	—	—	—
9 = Me gusta extremadamente					
Consistencia					
1 = Ligera	—	—	—	—	—
9 = Espesa					
Gusto por la textura					
1 = Me disgusta extremadamente	—	—	—	—	—
9 = Me gusta extremadamente					
Olor característico					
1 = Intensidad extremadamente baja	—	—	—	—	—
9 = Intensidad extremadamente alta					
Gusto por el olor					
1 = Me disgusta extremadamente	—	—	—	—	—
9 = Me gusta extremadamente					
Sabor característico					
1 = Intensidad extremadamente baja	—	—	—	—	—
9 = Intensidad extremadamente alta					
Gusto por el sabor					
1 = Me disgusta extremadamente	—	—	—	—	—
9 = Me gusta extremadamente					
Aceptabilidad general					
1 = Me disgusta extremadamente	—	—	—	—	—
9 = Me gusta extremadamente					
Comentarios:					

¡MUCHAS GRACIAS!					

Anexo U*Transferencia de calor en el puré envasado en frasco de vidrio*

Fuente: Elaborada a partir de Lespinard (2012); Tucker y Featherstone (2021).

Anexo V

Color de las muestras de puré: a) T₀, b) T₁, c) T₂, d) T₃ y e) T₄

