

# Efecto de la congelación en las propiedades termodinámicas de pasta de tomate



## Colaboración

Arely Cano Garay; Rosalía Cerecero Enríquez; José Manuel Tejero Andrade; Leticia López Zamora; Eusebio Bolaños Reynoso, Tecnológico Nacional de México Campus Orizaba

Fecha de recepción: 16 de noviembre de 2023

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2023

**RESUMEN:** El tomate (*Solanum lycopersicum*) es un alimento nutritivo que contiene agua, azúcares, vitaminas y compuestos bioactivos como el licopeno. Sin embargo, presenta pérdidas postcosechas de hasta el 50% de la producción total debido a su deterioro. [1].

El objetivo de este trabajo fue proponer la congelación de la pasta de tomate como método para conservar y extender su vida útil de anaquel. Se obtuvo pasta de tomate a partir del tomate licuado con concentraciones de 20, 25 y 30% (w/v). Las muestras se sometieron a  $-18^{\circ}\text{C}$  para evaluar las propiedades termodinámicas. Durante la congelación, parámetros clave son la temperatura de congelación inicial ( $T_{ci}$ ) y el tiempo requerido, el cual puede estimarse mediante la ecuación de Plank.

Ambos valores,  $T_{ci}$  y tiempo de congelación, se validaron a través de las curvas de enfriamiento de las diferentes concentraciones de pasta de tomate. Adicionalmente, se determinaron propiedades térmicas como la capacidad calorífica, densidad, conductividad y difusividad térmica utilizando correlaciones de Choi y Okos.

**PALABRAS CLAVE:** Pasta de tomate, congelación, propiedades termodinámicas, propiedades fisicoquímicas, condiciones de congelación.

**ABSTRACT:** Tomato (*Solanum lycopersicum*) is a nutritious food containing water, sugars, vitamins and bioactive compounds such as lycopene. However, it experiences post-harvest losses of up to 50% of the total production due to deterioration.

The objective of this study was to propose the freezing of tomato paste as a method to preserve and extend its shelf life. Tomato paste was obtained from liquefied tomatoes with concentrations of 20, 25 and 30% (w/v). The samples were subjected to  $-18^{\circ}\text{C}$  to evaluate thermodynamic properties. Key parameters include the initial freezing temperature ( $T_{ci}$ ) and the required time, which can be estimated using the Plank equation.

Both values,  $T_{ci}$  and freezing time, were validated through cooling curves for different concentrations of tomato paste. Additionally, thermal properties such as specific heat, density, conductivity and thermal diffusivity were determined using Choi and Okos correlations.

**KEYWORDS:** Tomato paste, freezing, thermal properties, physicochemical properties, freezing conditions

## INTRODUCCIÓN

En México se desperdician anualmente 20.4 millones de toneladas de tomate (*Solanum lycopersicum*) [2]. Este alimento contiene principalmente agua, vitamina C,  $\beta$ -carotenos y minerales como potasio [3]. A pesar de su amplio cultivo, su vida útil suele ser corta, aproximadamente 15 días, lo que reduce su disponibilidad e incrementa el desperdicio.

Alargar la vida útil de alimentos climatéricos como el tomate representa un desafío para su aprovechamiento. Diferentes

técnicas de preservación han permitido mantenerlos frescos y naturales por más tiempo, por ejemplo los deshidratados de aceite de oliva.

La congelación garantiza un nivel equivalente de seguridad e inocuidad que la refrigeración, implica exponer el producto a temperaturas inferiores a 0°C. Este proceso inactiva las enzimas y los microorganismos, deteniendo de esta manera los procesos bioquímicos y extendiendo a vida útil del anaquel.

Los avances tecnológicos han diversificado los métodos de congelación, logrando desde ahorros en los sistemas de refrigeración hasta una mayor rapidez en el proceso.

El presente trabajo consistió en evaluar las propiedades termodinámicas de la pasta de tomate al ser sometida a procesos de congelación en un congelador convencional.

El objetivo fue caracterizar los parámetros, incluyendo el punto de congelación inicial, los tiempos necesarios para incrementar la concentración de sólidos que incluye los cristales de hielo. Además, se evaluaron propiedades fisicoquímicas después del proceso de congelación, tales como contenido de humedad, sólidos solubles totales, grados Brix y color.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Obtención de la materia prima

La experimentación se llevó a cabo en el Laboratorio de Plantas Piloto del Instituto Tecnológico de Orizaba, en el Estado de Veracruz, México. Se adquirió tomate en el mercado Emiliano Zapata de dicha ciudad. Posteriormente, los frutos se lavaron y desinfectaron para luego retirar las partes no deseadas como la piel, semillas y placenta. Con la pulpa obtenida se preparó pasta de tomate mediante licuado, la cual, se almacenó en contenedores de plástico de 20 ml.

El almacenamiento en el periodo de tres meses en congelación se realizó empleando un congelador convencional a -18°C. Previo a los análisis, las muestras se descongelaron bajo refrigeración a 4°C y luego se llevaron a temperatura ambiente.

### Propiedades fisicoquímicas

Se realizaron análisis sobre muestras frescas a partir de la pulpa de tomate para obtener las siguientes propiedades:

#### Sólidos totales

Se determinaron mediante un refractómetro marca Hanna Instruments. Previamente se calibró el equipo con 3 gotas de agua destilada a temperatura ambiente como blanco. Luego se colocaron 3 gotas de cada muestra sobre el prisma refractómetro y se registraron los valores de sólidos totales expresados en °Brix.

### Porcentaje de humedad

Se pesaron 3 cápsulas de porcelana vacías y se colocaron en una estufa a 100°C durante 24, 28 y 72 h. Posteriormente, se trasladaron las cápsulas a un desecador por 2 h para enfriamiento y posteriormente pesarse. El porcentaje de humedad se calculó con la diferencia de peso entre la muestra fresca y seca.

### Determinación de color

Se utilizó un colorímetro Hunter Lab ColorQuest XE. Se colocaron las muestras sobre el equipo y se capturaron los valores L\*, a\* y b\* con el Software Universal versión 4.10 Con estos parámetros se calculó la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) mediante la Ec. (1):

$$\Delta E = \sqrt{[(\Delta L)]^2 + (\Delta a)^2 + [(\Delta b)]^2} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde L\* es la luminosidad (negro-blanco), a\* es (verde-rojo) y b\* (azul-amarillo).

### Propiedades térmicas

En la obtención de las propiedades, a partir de la curva de congelación, se realizó midiendo la temperatura en función del tiempo (Vélez y Torres, 1994), iniciando el monitoreo con respecto a la temperatura de laboratorio.[4]

Considerando la importancia de la temperatura para la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y térmicas a partir del estudio de Santes et al. (2019) [5], se determinaron tres muestras de pulpa de tomate, mezclas de agua a diferentes porcentajes de sólidos (20,25 y 30%), las cuales fueron colocadas en envases de 15 ml en forma de cilindro.

En la adquisición de datos continuos de temperatura se utilizó un multímetro Fluke modelo 289 con un termopar (Tipo J). El proceso se llevó a cabo dentro de un congelador a temperaturas hasta -18°C; se graficaron los datos obtenidos, y mediante un análisis de la curva, se determinó el punto de congelación inicial ( $T_{ci}$ ), continuando a incrementar la fracción de cristales de hielo, reduciendo la fracción de agua y los sólidos de la pasta que coexisten.

La determinación empírica de las propiedades térmicas de conductividad, capacidad calorífica, difusividad térmica, se obtuvieron a partir de la tabla de coeficientes de los alimentos (Choi y Oikos, 1986) y comparando estos con los resultados experimentales. [6]. Ecuaciones (2) y (3) en función del contenido de humedad del alimento ( $X_a$ ) y de la conductividad del sólido ( $K_s$ ), a temperatura del laboratorio:

$$K_{tomate} = K_a X_a + K_s (1 - X_a) \quad \text{Ec.(2)}$$

$$K_{tomate} = 0.056 + 0.57 K_s \quad \text{Ec.(3)}$$

En donde  $K_{tomate}$  es la conductividad termica del alimento ( $W/m^{\circ}C$ ),  $K_a$  corresponden la conductividad del

agua,  $K_s$  fracción sólida de pulpa de tomate es de 0.53  $W/m\ ^\circ C$ , significativamente similar a  $0.59\ W/m\ ^\circ C$  [7].

Para el cálculo del calor específico, se utilizó la ecuación dada por Siebel (1892) en base a los valores de humedad experimental [8].

$$Cp = 0.837 + 3.349 X_w \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde  $Cp$  es el calor específico ( $J/g\ ^\circ C$ ) y  $X_w$  es la cantidad de agua contenida expresada en fracción, para el tomate de  $3.85\ kJ/g\ ^\circ C$ .

En la difusividad térmica se emplearon los valores de densidad, conductividad térmica y calor específico del alimento:

$$\alpha = \frac{k}{\rho Cp} \quad \text{Ec. (5)}$$

### Cálculo para el tiempo de congelación

A partir de la determinación experimental del tiempo de congelación inicial, se realizó el siguiente cálculo mediante ecuaciones (6 y 7) dada por Orrego (2007) [9]:

$$t_c = \frac{\lambda_a \rho}{T_c - T_a} \left[ \frac{P \cdot a}{h} + \frac{R \cdot a^2}{k} \right] \quad \text{Ec. (6)}$$

$$\lambda_a = X_a \cdot \lambda \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde en la Ec. 6  $t_c$  es el tiempo de congelación del alimento,  $\rho$  es la densidad del alimento sin congelar,  $\lambda_a$  es calor latente de congelación de alimento ( $kJ/Kg$ ),  $a$  es espesor del recipiente,  $h$  es el coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $W/m^2\ ^\circ C$ ),  $P$  y  $R$  son las constantes de Plank,  $k$  es la conductividad térmica del alimento congelado ( $W/m\ ^\circ C$ ),  $T_c$  es la temperatura inicial de congelamiento ( $^\circ C$ ) y  $T_a$  del medio frío ( $^\circ C$ ). En la ec. 7,  $\lambda$  es el calor latente de fusión del agua ( $333\ kJ/kg$ ),  $X_a$  fracción agua en el alimento.

## RESULTADOS

### Propiedades fisicoquímicas

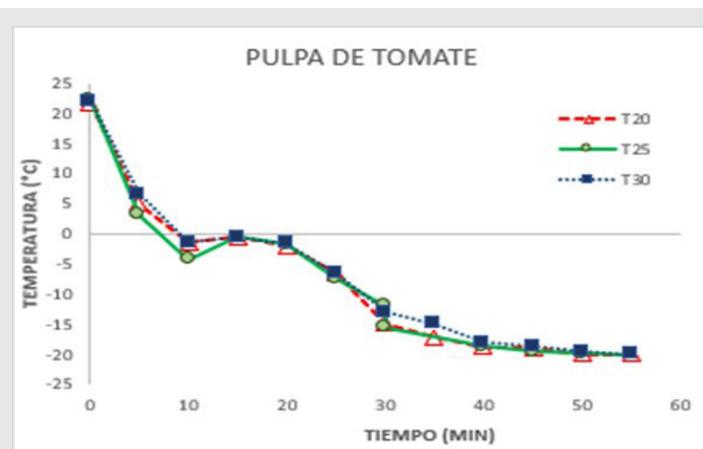
En la determinación de los sólidos totales en la pasta de tomate, se registró un valor en el rango del 4.7 al 8% ( $^\circ Brix$ ), cifra que tiene similitud de acuerdo con Ciruelos (2008), quien señala que el contenido de sólidos en tomates varía entre 8 y 12  $^\circ Brix$ . Por otro lado, Solórzano (2023), al referirse a salsa de tomate, reporta una concentración de sólidos totales de 4.68  $^\circ Brix$ . [10 y 11]. Estas variaciones podrían atribuirse a diferencia a la madurez del tomate y en la cantidad de agua presente en las muestras. A la variedad de tomate al grado de madurez del fruto y a la cantidad de agua presente.

Adicionalmente, se determinaron el porcentaje de humedad y densidad de la pasta de tomate de 92% y 1.92  $g/ml$ , antes de someterse a la congelación. Ortega et al. [12], reportaron un valor del 94.4% para el contenido de agua.

Por otro lado, Valle-Vargas et al. (2020) reportaron rangos de humedad que oscilan entre 85.27 y 95.05% en muestras frescas. Estos resultados ofrecen una perspectiva amplia sobre las variaciones en las propiedades del tomate, considerando distintas variedades [13].

### Curvas de congelación

Las curvas de congelación fueron generadas mediante el monitoreo de la temperatura en los recipientes cilíndricos. En la Gráfica 1, se aprecia un descenso de los  $0^\circ C$ , indicando el proceso de enfriamiento de las muestras.



Gráfica 1. Curva de congelación de pasta de tomate con 20, 25 y 30% sólidos.

Fuente: Elaboración propia.

Durante este proceso, el fenómeno se replica en las muestras tratadas en términos de tiempo y temperatura. A los 10 minutos, las muestras alcanzaron su punto de congelación, incrementando la temperatura hasta el punto inicial de congelación. Este intervalo corresponde a la surfusión. Cabe destacar que con un 20% de sólidos, el punto de congelación inicial se sitúa en  $-1.4 \pm 2^\circ C$ .

Mediante el análisis de la curva obtenida, se terminaron los puntos de congelación de cada muestra, expresados como valores promedio. Al comparar ambas muestras, se evidencia una notable proximidad entre sus respectivos puntos de congelación.

Es relevante destacar que los alimentos con un mayor contenido de sólidos solubles, permite que haya una depresión mayor del punto de congelación.

### Tiempo de congelación

Utilizando los datos recopilados de la curva experimental de congelación, se calculó el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de congelación. Este tiempo fue posteriormente comparado con los resultados obtenidos a través de la ecuación de Plank. En esta evaluación, se aprecian las propiedades experimentales previamente determinadas (Tabla 1), y se

calculó el porcentaje de error como indicador de la concordancia entre los datos experimentales y mediante la ecuación de Plank.

Tabla 1. Tiempo de congelación de pasta de tomate

Sólidos (%)	Tiempo de congelación (min)		
	Experimental	Plank	Error (%)
20	15	21.14	13.59
25	15	23.03	13.46
30	15	23.72	13.41

Fuente: Elaboración propia.

### Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas del alimento, tanto en su estado congelado, se muestran en la Tabla 2, respectivamente. Estas propiedades fueron evaluadas utilizando datos experimentales y se compararon con valores reportados.

Como menciona Telis et al. (2007), la conductividad en frutos enteros con un alto contenido de agua se ve afectada durante la congelación, donde la presencia de la fracción de agua congelada incrementa en volumen y la temperatura influyen en dicha conductividad térmica por debajo del punto de congelación [13]. Respecto al tomate, Orrego (2003) reporta valores que son comparables y cercanos a los datos obtenidos experimentalmente. Por otro lado, Geankpolis (2003) indica que la conductividad aumenta cuando hay una presencia significativa de sólidos. Wiles et al. (2020) señalan en su estudio comparativo entre la corteza y la pulpa de sandía que la corteza inhibe una mayor conductividad térmica. [14, 15 y 16].

La pasta de tomate con un 30% de sólidos exhibió el coeficiente de conductividad más alto, a comparación con el tomate que mostró una menor conductividad en la misma concentración de sólidos. Posteriormente, se llevó una comparativa de las ecuaciones empleadas (Ecs. (5) y (6)).

Tabla 2. Tiempo de congelación de pasta de tomate.

Pasta de tomate (%)	$C_p$ kJ/g °C	$\rho$ g/ml	$\alpha$ m <sup>2</sup> /s	$K$ (W / m°C)	$k$ calc. (W / m°C)	Error (%)
20	2.256	1.697	$2.33 \times 10^{-7}$	0.525	0.57	8.5
25	2.227	1.69	$2.32 \times 10^{-7}$	0.52	0.568	9.2
30	2.19	1.683	$2.31 \times 10^{-7}$	0.516	0.56	8.5

Fuente: Elaboración propia.

### Cambios físicos durante la congelación

Durante el almacenamiento y a bajas temperaturas en frutos y hortalizas, se observan cambios físicos por aumento de volumen con el riesgo de daños en

estructura y tejidos. Inocente et al. (2021) señalan que el proceso de congelación en almacenamiento provoca alteraciones, incluyendo un factor de deshidratación. Este impacta negativamente al alimento con pérdida de agua y afecta la transferencia de calor. [18], si es expuesto a refrigeración. Barankevicz et al. (2015) abordan el impacto de la congelación en la composición química del fruto, señalando la influencia del porcentaje de humedad [19].

Cuando un producto se congela y almacena en condiciones específicas, experimenta cambios en color. La coloración de los alimentos, es una característica física que puede describirse con parámetros cuantificables, antes y durante los procesos de congelación. Esto facilita el cálculo de tiempo, punto de congelación y propiedades físicas para conservar el color sin provocar daño por frío. Rikasa et al. (2021) [20] señala que al exponer trozos de tomate a bajas temperaturas, hay cambios en el color, destacando la necesidad de buscar métodos que preserven los parámetros fisicoquímicos y sensoriales durante la congelación. Aunque la determinación de color no reveló cambios significativos en esta investigación debido al estado físico de las muestras (pasta), esto no debe subestimarse en futuros estudios. Sin embargo, el estado de madurez en tomate natural para pasta puede ser un indicador en cuanto a su calidad y costo.

### CONCLUSIONES

En las muestras de pasta de tomate, a mayor concentración disminuyen las propiedades térmicas provocando que haya una menor transferencia de calor. En cuanto a la conductividad térmica, a menores concentraciones hay mayor conductividad por el contenido de agua presente. Por ende, las correlaciones de Cho y Oikos, permiten validar datos experimentales y esto puede ser aplicado para diferentes rangos de concentración.

El sistema por lotes de la cámara de congelación no permite una fracción de hielo y tamaño de cristal controlada. Por lo que, la capacidad para calcular con mayor precisión periodos de tiempo, el punto de congelación y validar las propiedades termodinámicas demanda un control fino de la temperatura, de velocidad de mezclado, número y formas de cuchillas para una fracción masa de hielo y tamaño de cristal controlado del sistema difásico. Sin embargo, este trabajo aporta un avance de la tecnología en la conservación de la pasta de tomate por congelación y para uso inmediato. Además, puede ser aplicado para otras pastas de hortalizas, proporcionando una base sólida para el desarrollo de estrategias de conservación más eficientes.

### AGRADECIMIENTOS

Gracias a CONAHCYT por el apoyo brindado al becario CVU 1180133.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Crecimiento, producción y exportación de tomate. Abril, 22, 2021. <https://www.gob.mx/siap>
- [2] Ruiz, J., Vicente, A., Montañez, R., Aguilar, C. (2012). Un tesoro perecedero em México: El tomate, tecnologías para prolongar su vida de anaquel. *Investigación y Ciencia*, 20 (54), 57-60.
- [3] Piqueras, M. (2016). Actualización en higiene alimentaria, manipulación, toxiinfecciones alimentarias y etiquetados de alimentos. 1ª Ed., *Medicina y Salud* (17-19). España.
- [4] Velez, J.F., (1994). Evaluación de propiedades físicas de frutas: Melón, papaya, plátano y sandía. *Revista información Tecnológica*, 5 (1), 39-42.
- [5] Santes, M., Villaseñor, M., Tejero, J. y Cerecero R. (2019). Retention of Phenolic Compounds in Slices of Watermelon Dried By Refractance Window. 3 (3), 28.
- [6] Singh, P. (1984). *Introduction to Food Engineering*. 4a Ed., *Food Science and Technology*, (20-25, 257-262).
- [7] Siebel, J. (1892). Specific heat of various products, *Ice Refrigeration*, 2(256).
- [8] Ciruelos, A., Carreras, R., González, C. ( ). Parámetros de calidad en el tomate para industria. 13 (1), 157.
- [9] Solórzano, B. (2023). Estudio potencial industrial de cinco variedades de tomate (*Lycopersicum esculentum* Miller) cultivadas en condiciones de fertilizante foliar quelatado. *Ciudad universitaria*.
- [10] Ortega-Martínez, L., Sánchez-Olarte, J., Ocampo-Mendoza, J., Sandoval-Castro, Salcido-Ramos, B. y Manzo-Ramos, F. (2010). Efectos de diferentes sustratos en crecimiento y rendimiento de tomate (*Lycopersicum esculentum* mili) bajo condiciones de invernadero. *Revista Ximhai*, 6(3), 339-34.
- [11] Alvarado, E., Ramírez, G., Martínez, E., Piña, C., De la Cruz, B. y Chablé, F. (2019). Calidad de Fruto de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de generaciones S2 y F4. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 7(2), 1-9.
- [12] Valle-Vargas, M., Durán-Barón, R., Quintero-Gamero, G. y Valera, R. (2020). Caracterización fisicoquímica, químico proximal, compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de pulpa y corteza de sandía (*Citrullus lanatus*). *Inf. Tecn*, 31(1), 21-28.
- [13] Telis-Romero, J., Sobral, J. y Gabas, P. (2007). Punto de congelación y conductividad térmica de pulpas de frutas tropicales: Mango y papaya. *Revista internacional Propiedades de alimentos*. 10 (1), 73-84.
- [14] Orrego, C. (2003). Congelación y Liofilización de alimentos. 2ª Ed., *Ciencia y Tecnología* (49-54).
- [15] Geankpolis, C.J.(1998). *Proceso de transporte y operaciones unitarias*. 3ª Ed. University of Minnesota. (309-312).
- [16] Wiles, C., Kooklal, V., Hanseul, K. y Kitchel, J. (2020). The influence of Rind of Watermelon in The Heat Transfer Calculation. *American Society Thermal and Fluids Engineers*.
- [17] Inocente, Q., Sota, A.E. y Paz, S. (2021). Alimentos mínimamente procesados: Generalidades, procesamiento, consumo y cambios físicos, químicos y biológicos. 11 (1), 117-126.
- [18] Barankeviccz, G.B., Novello, G.B., Resende, J. y Santo, E. (2015). Características físicas e químicas da polpa de híbridos de tomateiro, durante o armazenamento congelado. *Horticultura Brasileira*, 33, 7-11.
- [19] Velasco, M., Morales, S., Rahman, ME. Y Vélez, J.F. (2007). Freezing point: Measurement data and prediction. *Properties handbook*.
- [20] Rikasa, A.M., Senarathne, Wimalisiri, K. (2022). Determination of the effect of freezing methods on the quality of frozen tomato pieces. *Asian Journal of Dairy and Food Research*. 41 (3), 317-322