

Obtención experimental y análisis del subenfriamiento en la cinética de congelación del nopal (*Opuntia spp*).

R. Román-Aguilar*², J. De Santiago-Herrera¹, W.M. Delgadillo-Ávila², J.E. Aparicio-Burgos² y J. Valle-Hernández²

1 Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería en Tecnología del Frío, Escuela Superior de Apan, UAEH. Carretera Apan-Calpulalpan Km8, Colonia Chimalpa Tlalayote, C.P. 43900 Apan, Hidalgo, México. **2** Profesor investigador de la Licenciatura en Ingeniería en Tecnología del Frío, Superior de Apan, UAEH. Carretera Apan-Calpulalpan Km8, Colonia Chimalpa Tlalayote, C.P. 43900 Apan, Hidalgo, México.

*raul_roman@uaeh.edu.mx

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se muestra la obtención de forma experimental de la sección correspondiente al subenfriamiento en la cinética de congelación del nopal (*Opuntia spp*) y se desarrolla un análisis del fenómeno. Para su desarrollo se utilizaron sensores de temperatura tipo PT100 y termistores adaptados a un adquisitor de datos marca Keysinght modelo 34972A, previa calibración de los sensores con un patrón con trazabilidad al NIST en el rango de temperaturas de -22 a 40°C. Se utilizó nopal (*Opuntia spp*) en muestras de 3 cm x 3 cm y se realizaron 3 pruebas con 3 muestras cada una, colocando un sensor de temperatura al centro. Las muestras se enfriaron a 4 °C y después se introdujeron a un congelador a -20°C. Los resultados muestran que el nopal tiene un punto inicial de congelación de alrededor de -0.5 a -1.2°C y coinciden con los reportados por otros autores de forma analítica. Los resultados del presente estudio pueden utilizarse en el desarrollo de estrategias para evitar problemas en la formación de cristales de hielo en el nopal, de gran importancia para la manipulación del producto durante su conservación a bajas temperaturas.

Palabras clave: nopal, cinética de congelamiento, subenfriamiento, punto de congelación.

ABSTRACT

In this research work, the experimental obtaining of the subcooling of the freezing kinetics of the nopal *Opuntia spp* is shown and an analysis is developed. PT100 temperature sensors and thermistors were used, adapted to a Keysinght model 34972A data logger, after calibration of the sensors with a pattern traceable to NIST in the temperature range of -22 to 40°C. Samples of 3 cm x 3 cm were used and 3 tests were carried out with 3 samples each, placing a temperature sensor in the center. Samples were cooled to 4°C and then placed in a -20°C freezer. The results show that the nopal has an initial freezing point between -0.5 to -1.2°C and coincides with that reported by other authors. The results of this study can be used in the development of strategies to avoid problems in the formation of crystals during the freezing of nopal, important for the handling of the product and its conservation at low temperatures.

Keywords: nopal, freezing kinetics, subcooling, freezing point.

INTRODUCCIÓN

El nopal (*Opuntia* spp), pertenece al género de las cactáceas. En México se producen anualmente más de 802 mil toneladas, teniendo un consumo per cápita de 6.4 kilogramos (Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2020). La composición química del nopal en base húmeda es de 91% agua, 0.66% proteínas, 0.11% grasas, 5.5% de carbohidratos, 1.15% celulosa y 1.58% cenizas (Torres-Ponce, Morales-Corral, Ballinas-Covarrubias, & Nevárez-Moorillon, 2015); sin embargo, los niveles pueden variar entre especies e incluso dentro de la misma especie dependiendo las características y el manejo del suelo y los nutrientes. (Osorio-Córdoba *et al*, 2011).

De acuerdo a la norma NMX-FF-068-SCFI-2006 se considera apto para consumo el nopal tierno o brote de 7 a 30 cm de longitud con una edad de 10 a 40 días. Luego de la cosecha, se empacan en canastas de plástico o se apilan en fardos cilíndricos y se envían a los puntos de compra o mercados de consumo, en donde puede presentar daño físico, aumentando los procesos metabólicos como la respiración, la degradación de los lípidos de la membrana, oxidación, la pérdida de firmeza y humedad, así como una acumulación de sustancias del metabolismo secundario, lo que lleva a la descomposición y a una vida útil reducida (Cantwell *et al*, 1992); por lo que un método eficaz para su conservación es la congelación.

El uso de bajas temperaturas es uno de los métodos más antiguos para la conservación de alimentos. Particularmente, en la congelación el agua contenida en el alimento se solidifica por el descenso de temperatura formando cristales de hielo y provocando un aumento en la concentración de solutos, disminuyendo la actividad de agua e imposibilitando las reacciones químicas y bioquímicas que deterioran los alimentos (Nieto, 2015). Durante este proceso, además, existe un descenso de la temperatura en el alimento por debajo de la temperatura de congelación del agua (0°C) debido a que los solutos descienden la temperatura de congelación de la solución, la cual se encuentra entre -2 y -5 °C dependiendo del tipo de alimento (Della Rocca *et al*, 2013).

Entender el comportamiento de los alimentos sometidos a congelación, permiten optimizar los procesos para su conservación, ya que se dispone de poca información sobre las propiedades físicas de los alimentos y aún más limitada sobre el comportamiento de alimentos congelados, es por ello que, el presente trabajo se centró en analizar el subenfriamiento durante la congelación de nopal (*Opuntia* spp), para hacer frente a una industria en constante evolución.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Se utilizó nopal (*Opuntia* spp) con apariencia fresca y sin indicios de deshidratación. Se tomaron muestras de 3 cm x 3 cm, registrando su espesor por esquina de cada lámina para obtener el espesor promedio, indicado en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones de materia prima.

No. muestra	Día	Espesor promedio
1M1	30/03/2022	5.25mm
2M2		5.85mm
1M3		6.175mm
2M1	01/04/2022	6.125mm
2M2		5.55mm
2M3		6.25mm
3M1	05/04/2022	5.5mm
3M2		5.75mm
3M3		5.2mm

Equipos e instrumentos

Los equipos e instrumentos que se utilizaron son dos sensores de temperatura tipo PT100 y un termistor, los cuales fueron adaptados a un adquisidor de datos marca Keysinght modelo 34972A. Los sensores fueron calibrados a diferentes temperaturas, recibiendo la señal de resistencia y comparando con un sensor patrón con trazabilidad al NIST, obteniendo las ecuaciones de calibración para cada sensor en el rango de temperaturas de -22 a 40°C.

Método para obtener la Cinética de congelación

El proceso de subenfriamiento de la cinética de congelación (Imagen 1) abarca las etapas: a) Etapa AS correspondiente al subenfriamiento; y b) Etapa SB, que indica la liberación de calor latente tras la formación del primer cristal de hielo; correspondiente al descenso de la temperatura del material biológico.

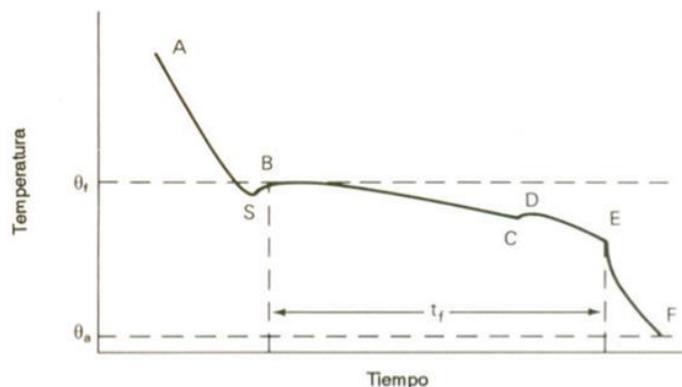


Figura 1. Cinética de congelación.

En la etapa AS: se reduce la temperatura del alimento por debajo de su punto de congelación, siempre inferior a la temperatura de congelación del agua (0°C). En el punto S el agua se mantiene en estado líquido a una temperatura inferior a su punto de congelación. A este fenómeno se lo conoce con el nombre de subenfriamiento.

Para la etapa SB: la temperatura aumenta rápidamente hasta alcanzar el punto de inicio de congelación, en donde se empiezan a formar los primeros cristales de hielo al liberarse el calor latente de congelación a una velocidad superior a la que se extrae el calor del alimento.

Para obtener el proceso de subenfriamiento, se realizaron 3 pruebas con 3 muestras cada una y a cada muestra se colocó un sensor de temperatura al centro. Se acondicionó una caja aislada donde se colocaron las muestras para controlar el comportamiento del deceso de la temperatura en cada una de las pruebas, en relación con el arranque y paro del compresor del sistema de refrigeración o congelación y no hubiera interferencia por parte del funcionamiento del equipo.

Durante un tiempo aproximado de 3 horas, las muestras en cada prueba se ingresaron primero a un refrigerador para establecer una temperatura de alrededor de los 4°C como temperatura de inicio hacia la fase de congelación. Tanto en la refrigeración como en el proceso de congelación para alcanzar el subenfriamiento se establecieron intervalos de 5 segundos para la prueba 1; 4 segundos para la prueba 2, y 3 segundos para la prueba 3. Una vez alcanzada la estabilidad en el refrigerador, se introdujeron rápidamente a un congelador Marca Scient Temp Modelo 34-25AS a temperatura de -20°C por un tiempo de 2 h 30 min con los mismos intervalos correspondientes; se registraron las temperaturas de las diferentes pruebas y se obtuvo el subenfriamiento en la cinética de congelación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las curvas del período de subenfriamiento del nopal se obtuvieron a partir del monitoreo de la temperatura en las muestras. En las Figuras 2, 3 y 4 se grafican las curvas de temperatura contra el tiempo. En las gráficas se puede apreciar que el nopal presenta el mismo comportamiento, pero con algunos desfases al alcanzar su punto de congelación en el centro térmico; atribuyéndose estos desfases a la forma en que se colocó cada muestra al interior de la caja aislada, ya que algunas muestras se encontraron unas más cerca que otras y /o más cerca de la superficie del aislante, por lo que la transferencia de calor no fue uniforme en cada cara y en cada muestra.

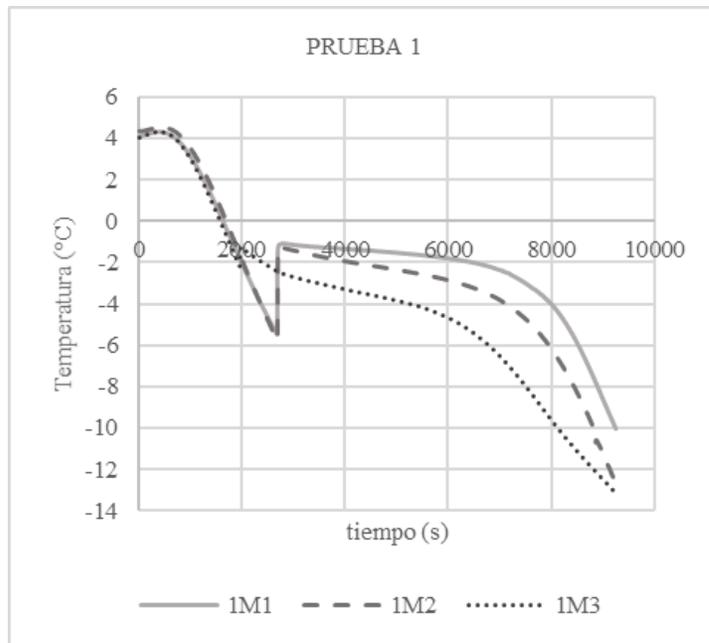


Figura 2. Temperatura contra tiempo del subenfriamiento en la cinética de congelación con tres muestras para la primera prueba.

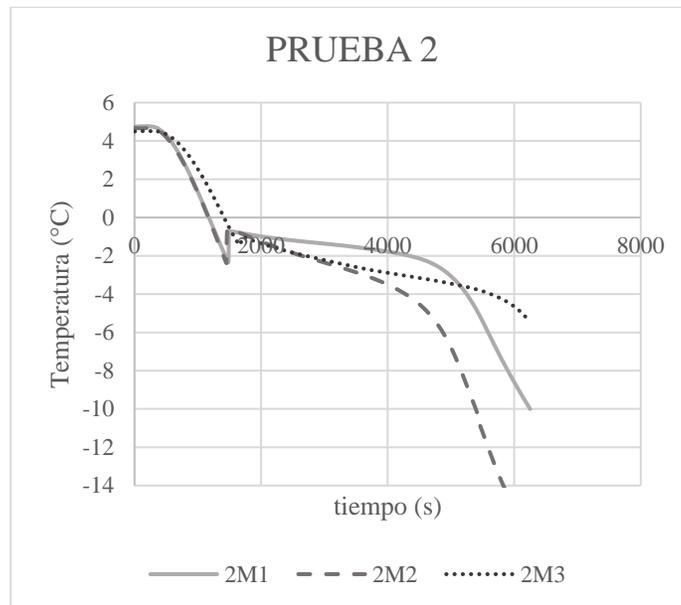


Figura 3. Temperatura contra tiempo del subenfriamiento en la cinética de congelación con tres muestras para la segunda prueba.

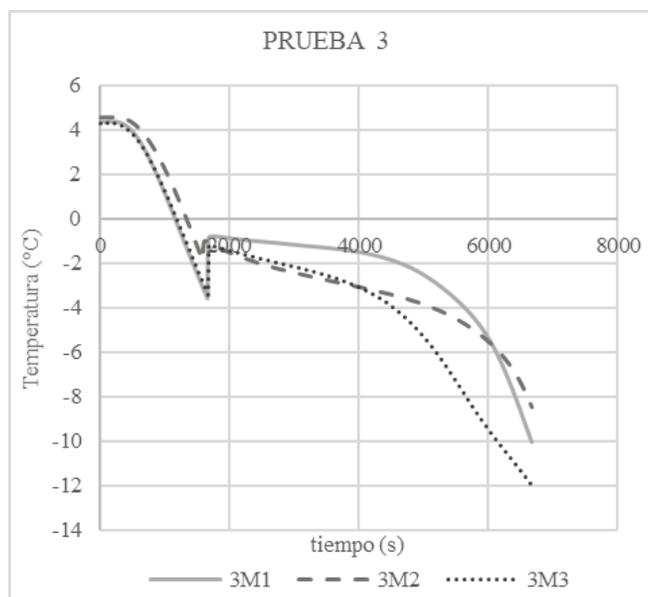


Figura 4. Temperatura contra tiempo del subenfriamiento en la cinética de congelación con tres muestras para la tercera prueba.

Utilizando las curvas experimentales de temperatura contra tiempo, se generó la Tabla 2 en donde se presentan el tiempo y el punto inicial de congelación posterior a introducir el nopal a 4°C en el congelador (-20°C).

Tabla 2. Puntos y tiempo de congelación (PC) de las muestras estudiadas.

	PC (°C)	Tiempo (min)
1M1	-1.118677631	45
1M2	-1.263217394	45
1M3	-1.2152642	33
2M1	-0.740853406	25
2M2	-0.572742219	24
2M3	-1.021432074	28

3M1	-0.761548833	28
3M2	-0.987532028	26
3M3	-1.153585172	28

Las muestras de nopal tienen un punto inicial de congelación de alrededor de -0.5 a -1.2°C , debido al alto contenido de humedad en el nopal; por lo que los sólidos solubles presentes en él no ocasionan una disminución del punto de congelación, obteniendo un valor cercano a cero. Esto coincide con lo reportado por Machado-Velasco & Vélez-Ruíz (2008) quienes evaluaron las propiedades físicas de alimentos mexicanos durante la congelación y el almacenamiento congelado, estimaron mediante un modelo experimental el valor para el punto de congelación en nopal de 0.978°C ; así mismo de acuerdo al modelo matemático reportado por Jie *et al* (2003) el punto de congelación de nopal es de -0.13°C , el cual es similar a los puntos de congelación de hortalizas como la col y lechuga, con valores de -0.56 y -0.20°C respectivamente. Otros estudios a través de modelos predictivos en alimentos como fresa, toronja, melón, pepino y apio han reportado puntos iniciales de congelación de -0.8 , -1.1 , -1.2 , -0.5 y -0.5°C respectivamente, todos ellos con un contenido de humedad mayor al 90% (ASHRAE, 2006).

CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se obtuvo de forma experimental una parte de la cinética de congelación del nopal (*Opuntia* spp), correspondiente a la sección del subenfriamiento donde termodinámicamente se abate la mayor cantidad de calor e inicia el proceso de cristalización del agua.

De las cinéticas se observó de forma experimental el punto inicial de congelación que oscilo entre -0.5 a -1.2°C , el cual corresponde a los reportados por otros autores de forma analítica.

Se destaca también que el punto inicial de congelación esta correlacionado con el contenido de humedad.

Los desfases al inicio del subenfriamiento se deben a la disposición de las muestras en el espacio de experimentación, ya que algunas estuvieron más cerca de la superficie aislante y no se tuvo una transferencia de calor uniforme.

La duración entre el inicio y el fin del subenfriamiento en algunas muestras fueron diferentes, atribuyéndose estos resultados al espesor de la muestra, colocación de los sensores y al intervalo de tiempo en la toma de datos, no obstante, el resultado final en el punto inicial de congelación tuvo semejanza.

Los resultados del presente estudio pueden utilizarse en el desarrollo de estrategias para evitar problemas en la formación de cristales de hielo en productos vegetales como el nopal.

Finalmente, esta investigación ilustra fenómenos como el periodo de subenfriamiento y punto de congelación, sumamente importantes y necesarios para su manipulación en la conservación a bajas temperaturas.

BIBLIOGRAFÍA

- ASHRAE. (2006). *Handbook. Refrigeration. SI Edition*.
- Cantwell, M., Rodríguez-Felix, A., & Robles- Contreras, F. (1992). Postharvest physiology of prickly pear cactus stems. *50*, 1-9.
- Della Rocca, P., Roche, L. A., & Mascheroni, R. (2013). Estudio comparativo de la congelación de papa (*Solanum tuberosum* L.) sometida a diferentes pretatamientos. *Proyecciones*, *11*(1), 31-45.
- Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero*. (22 de junio de 2020). Obtenido de <https://www.gob.mx/fnd/articulos/el-nopal-un-alimento-muy-mexicano?idiom=es>
- Jie, W., Lite, L., & Yang, D. (2003). The correlation between freezing point and soluble solids of fruits. *Journal of food Engineering*, *60*, 481-484.
- Machado-Velasco, K., & Vélez-Ruíz, J. (2008). Estudio de propiedades físicas de alimentos mexicanos durante la congelación y el almacenamiento congelado. *Revista Mexicana de Ingeniería química*, *7*(1), 41-54.
- Nieto, A. (2015). El Frío en la Conservación de Alimentos. *Mundo HVAC&R*.
- Osorio-Córdoba, J., Pelayo-Zaldivar, C., Verde-Calvo, J., Ponce-Valadez, M., Díaz de León-Sánchez, F., Bosquez-Molina, E., & Rodríguez-Huezo, M. (2011). Conservación de nopal verdura "Milpa Alta" (*Opuntia ficus indica*) desespinado en envases con atmósfera modificada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *10*(1), 93-104.
- Torres-Ponce, R., Morales-Corral, D., Ballinas-Covarrubias, M., & Nevárez-Moorillon, G. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *6*(5), 1129-1142.