

Víctor Adrián Reale^{1,2} (victor.adrian.reale@gmail.com); Sergio A. Giner^{1,2,3}

¹ Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), CONICET-CIC-UNLP, La Plata, Argentina.

² Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), Provincia de Buenos Aires, La Plata, Argentina.

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.



INTRODUCCIÓN

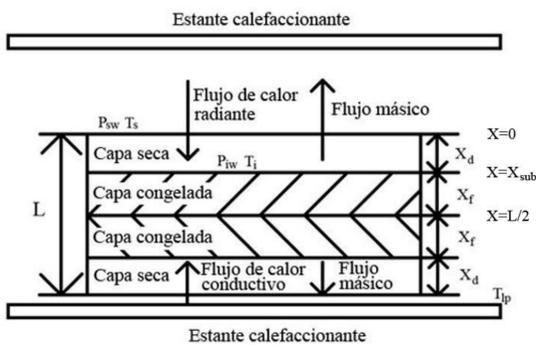
La liofilización es un proceso físico que consiste en la eliminación del agua de un producto -previamente congelado- mediante una etapa de secado por sublimación, denominada secado primario, y luego por una etapa de secado por desorción, denominada secado secundario. Los productos liofilizados se caracterizan por presentar la mayor calidad en cuanto a preservación de atributos sensoriales y de los componentes bioactivos. Por ello resulta útil el modelado matemático del proceso de liofilización, ya sea con el objetivo de predecir y comprender lo que ocurre con las variables fisicoquímicas y parámetros de calidad de las muestras durante el proceso, o bien para contribuir a recolectar información útil que permita el diseño óptimo de equipos. Este trabajo tiene como objetivos modelar el período de secado primario durante la liofilización de frutilla empleando el método numérico de diferencias finitas; determinar el coeficiente de difusión de vapor de agua a través de la capa seca creciente; los perfiles de temperatura y presión de vapor de agua dentro del producto, y contenido de humedad promedio; y estimar el tiempo mínimo de proceso de la etapa de sublimación.

MATERIALES Y MÉTODOS



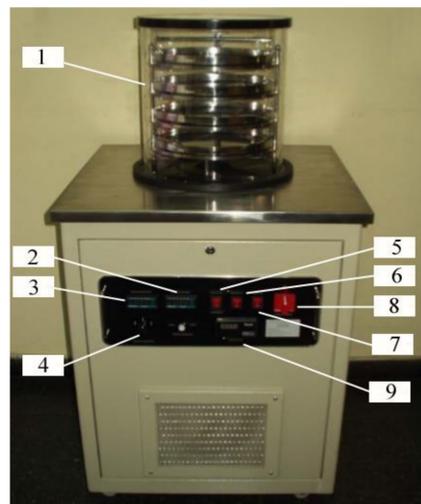
Corte en rodajas de 0,01 m de espesor

Liofilización (temperatura de estante de 40°C y presión absoluta de 30 Pa)



Perfil de la muestra durante la sublimación:

Equipo: Liofilizador Rificor® L-A-B4-C (Argentina)



1. Cámara de vacío;
2. Control de temperatura de estante;
3. Visor de temperatura de estante-producto-condensador;
4. Selector de temperaturas: estante-producto-condensador;
5. Interruptor del condensador y del medidor de temperatura;
6. Interruptor de la bomba de vacío y del medidor de presión;
7. Interruptor de calefacción;
8. Interruptor general del equipo;
9. Indicador de presión.

La cinética de secado se registró por triplicado. La humedad se determinó por el método AOAC 934.06.

Ecuaciones para el cálculo del perfil de presión de vapor

Capa seca

$$\frac{\partial P_v}{\partial t} = D_{sp} \frac{\partial^2 P_v}{\partial x^2}$$

Condiciones de contorno

$$D_{sp} \frac{\partial P_v}{\partial x} = k_m (P_v - P_v^{amb}) \quad x = L/2$$

Transferencia de vapor por difusión en el interior, y convectiva en el exterior

$$P_v = P_v^{sat}(T) \quad x = x_{sub} \quad \text{Flujo nulo de vapor en el centro}$$

Ecuaciones para el cálculo del contenido de humedad promedio

$$m_e = m_0 (1 - F_{ice}) \quad \text{Contenido de humedad no congelada}$$

$$m_{prom} = m_e + \left(1 - \frac{x_d}{L/2}\right) (m_0 - m_e) \quad \text{Contenido de humedad promedio}$$

Ecuaciones para el cálculo del perfil de temperatura

Capa seca

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_d \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \alpha_d = \frac{k_d}{\rho_d C_{pd}}$$

Capa congelada

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_f \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \alpha_f = \frac{k_f}{\rho_f C_{pf}}$$

Condiciones iniciales y de contorno

$$T = T_0 \quad t = 0 \quad 0 < x < L/2 \quad \text{Temperatura uniforme al inicio}$$

$$-k_d \frac{\partial T}{\partial x} = h_T (T_{amb} - T) \quad t > 0 \quad x = 0$$

Transferencia de calor radiante y convectiva desde el exterior, y conductiva en el interior de la rodaja

$$h_T = h_{rad} + h_{conv} = \sigma \varepsilon F (T_{amb}^2 - T^2) (T_{amb} - T) + h_{conv}$$

$$G \Delta H_{sub} = -k_d \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_{sub}} + k_f \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_{sub}} \quad t > 0 \quad x = x_{sub} \quad \text{Interfase de sublimación}$$

$$-k_f \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad t > 0 \quad x = \frac{L}{2} \quad \text{Flujo nulo de calor en el centro}$$

Cálculo del flujo de vapor sublimado

$$G = \frac{k_m}{R_g} \left(\frac{P_v}{T} \Big|_{x=0} - \frac{P_v^{amb}}{T^{amb}} \right)$$

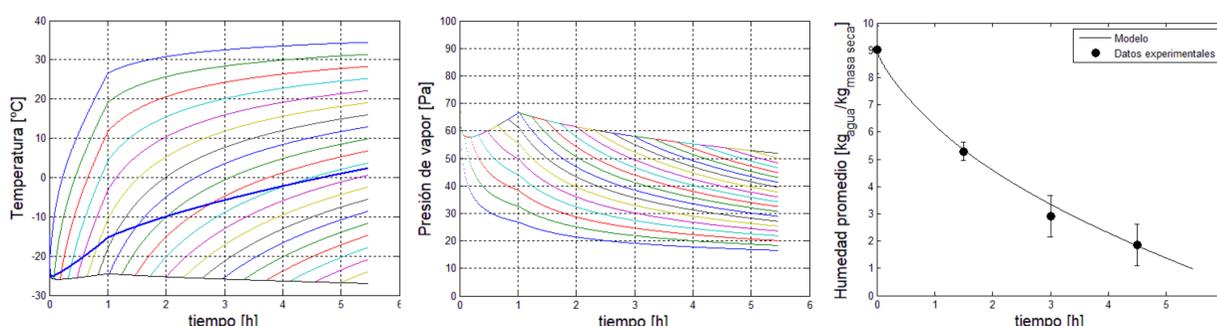
Cálculo del espesor de la capa seca

$$x_d^{actual} = x_d^{previo} + \frac{G \Delta t}{\rho_d (m_0 - m_e)}$$

Cálculo de la fracción de hielo

$$F_{ice} = \frac{1.105}{1 + \ln(T_f - T_{af} + 1)}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Humedad inicial [kg agua/kg materia seca]	9,021
Humedad al final de la sublimación [kg agua/kg materia seca]	0,9814
Duración de la etapa de sublimación [h]	5,5
Coefficiente de difusión de vapor efectivo D [m²/s]	1,576x10 ⁻³
Coefficiente de transferencia de masa convectiva k _m [m/s]	2,438
Coefficiente de transferencia de energía radiante y convectivo h _T [W/(m² K)]	78,615
Coefficiente de determinación r ²	0,951

CONCLUSIONES

Los modelos aplicados predicen un comportamiento razonable para los perfiles de temperatura de producto y presión de vapor de agua dentro de la capa seca. El contenido de humedad predicho se ajusta muy bien a los datos experimentales de humedad en función del tiempo durante la etapa de sublimación. El coeficiente de difusión obtenido por ajuste fue similar a los reportados por otros autores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Khalloufi, S., Robert, J. L. & Ratti, C. (2004). Solid foods freeze-drying simulation and experimental data. *Journal of Food Process Engineering*, 28, 107 – 132.
- Hua, T. C., Liu, B. L. & Zhang, H. (2010). *Freeze-Drying of pharmaceutical and food products*. Science Press, 3, 74–86.