

Estimación del coeficiente de difusión efectivo de humedad de vainas de vinal (*Prosopis ruscifolia*) a partir de la cinética de secado convectivo

Patricia A. Zurita Bianchini¹ & Myriam E. Villarreal¹

(1) Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Universidad Nacional de Santiago del Estero.

patriciazurita_87@hotmail.com & mevilla4@gmail.com

RESUMEN: El objetivo del presente trabajo fue determinar el coeficiente de difusión efectivo (D_{ef}) de *Prosopis ruscifolia* a partir de los datos experimentales de la cinética de secado convectivo de los frutos. Se aplicó un método basado en la solución analítica de la segunda ley de Fick para geometrías planas infinitas. La difusividad se obtuvo por regresión lineal de los datos experimentales de humedad adimensional en función del tiempo de secado. El secado se realizó en una estufa de aire forzado en la cual se controlaron la temperatura ($45\pm 1^\circ\text{C}$ y $60\pm 1^\circ\text{C}$) y la velocidad de aire (2m/s). Los frutos se dispusieron en bandejas formando una monocapa. Los resultados obtenidos mostraron que el secado de los frutos ocurre exclusivamente en el período de velocidad decreciente, por lo que puede afirmarse que la difusión es el principal mecanismo de migración de humedad, lo cual valida el uso de la solución analítica para la determinación del D_{ef} . Los D_{ef} incrementaron con el incremento de la temperatura, obteniéndose valores de $2,88 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ($R^2=0,87$) y $8,65 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ($R^2=0,91$) y m^2/s para 45 y 60°C, respectivamente. Los valores de los D_{ef} estuvieron en el rango de los informados en la literatura para la mayoría de los alimentos.

1. INTRODUCCION

Las vainas de *Prosopis ruscifolia*, comúnmente designadas como vinal, son frutos de leguminosas arbóreas, ampliamente difundidos en el monte Chaco-Santiagueño. Dadas las características de especie colonizadora, se destaca su abundancia en una vasta zona de distribución geográfica. El aprovechamiento alimentario de las vainas de esta especie de *Prosopis* se constituye en una alternativa promisoría para la recuperación productiva de las tierras colonizadas y en una fuente importante de proteínas, minerales (calcio, potasio y fósforo), fibras y grasas (Freire et al, 2003). En este sentido la producción de harinas a partir de las vainas deshidratadas es una opción atractiva.

El conocimiento del coeficiente efectivo de difusión de humedad (D_{ef}) es de primordial importancia en la simulación y optimización de los procesos de secado. En los alimentos, se asume

que la difusión de líquidos es el principal mecanismo de transporte de humedad en la primera etapa de velocidad decreciente de secado, mientras que la difusión de vapor es dominante en la segunda etapa de secado (Sharma & Prasad, 2004, Hassini et al, 2007).

Los métodos de determinación de los coeficientes de difusión se pueden clasificar en aquellos que se basan en la cinética de secado de los productos (Park et al, 2003, Hassini et al, 2007) y los que se basan en la determinación de los perfiles de temperatura en las muestras (Pel et al, 1996). En el primer caso la solución analítica parte de dos hipótesis restrictivas: la constancia del coeficiente de difusión efectivo y del volumen del producto durante el proceso de secado. Estas restricciones determinan que el método no sea matemáticamente riguroso pero es comparativamente más sencillo que otros métodos, a la vez que proporciona una buena estimación del coeficiente.



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



El objetivo del presente trabajo fue determinar el coeficiente de difusión efectivo de frutos de *Prosopis ruscifolia* a partir de los datos experimentales de la cinética de secado convectivo de las vainas.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1 Materiales

Se usaron frutos (vainas) seleccionados de vinal (*Prosopis ruscifolia*), recolectados en la localidad de Maco, departamento Capital de la provincia de Santiago del Estero, Argentina entre diciembre de 2011 y enero de 2012.

2.2 Limpieza y almacenaje de los frutos

Los frutos fueron separados de todo material extraño y/o dañado (hojas, ramas, frutos partidos y/o atacados por insectos con signos de invasión y deterioro), posteriormente se limpiaron por frotación con un paño seco y se almacenaron en bolsas doble de papel y en recipientes plásticos de cierre hermético y se conservaron en un ambiente seco, a temperatura ambiente.

2.3. Determinación de humedad inicial

El contenido de humedad inicial de los frutos se determinó a partir del método 934.06 de la Association of Official Analytical Chemists (1995). La experiencia se llevó adelante en una estufa de vacío (DALVO, VHI/20) a 120mmHg y 45°C hasta pesada constante. Las pesadas se realizaron diariamente en una balanza analítica Marca ADVENTURE, OHAUS de $\pm 0,0001g$ de precisión.

Los contenidos de humedad instantánea sobre base seca (bs) se calcularon conforme a la ecuación 1:

$$X_t(g \text{ agua}/g \text{ ss}) = \frac{M_0 - M(t)}{M_{ss}} \quad (1)$$

Donde X_t es el contenido de humedad al tiempo t en base seca (b.s.) expresado en (g agua/g sólidos secos), M_0 es el peso inicial en (g), $M(t)$ es el peso al tiempo t en (g) y M_{ss} es el peso de sólidos secos (ss) en (g).

2.4. Procedimiento de secado

El secado de los frutos de vinal se realizó en una estufa de laboratorio de aire forzado DALVO-DHR/F/I provista de bandejas construidas con marcos de madera y base de malla metálica de 68cm de largo x 48cm de ancho. Las bandejas fueron ubicadas en los rieles de la parte media del gabinete de la estufa y fueron rotadas de lugar durante todo el proceso de secado.

Se prepararon 5 muestras individuales de aproximadamente $15 \pm 0,5g$ de vinal cada una y se colocaron en bolsitas contenedoras confeccionadas con rectángulos de 20cm x 25cm de un tejido de seda ligero entrecruzado (tul) que formó un malla abierta. Las bolsitas fueron cuidadosamente identificadas con números y distribuidas aleatoriamente en las bandejas de la estufa. Se tomó la precaución de que los frutos estuvieran dispuestos en monocapa.

El secado se realizó a dos temperaturas, $45 \pm 1^\circ C$ y $60 \pm 1^\circ C$, y una velocidad de aire de $2 \pm 0,2m/s$. Se verificó periódicamente la temperatura y velocidad del aire con un termoanemómetro EXTECH, 407119A. Una vez alcanzadas y estabilizadas las condiciones de trabajo (régimen permanente), se introdujeron las bandejas y se inició la experiencia, este momento constituyó el tiempo cero de secado.

Se realizaron controles periódicos de peso según el detalle mostrado en la Tabla 1:

Tabla 1: Frecuencia de pesadas durante el ensayo de secado

Tiempo de secado (h)	Frecuencia control de peso
De 0 a 2	Cada 15min
De 2 a 4	Cada 30min
De 4 a 9	Cada 60 min
De 9 a 13	Cada 120min
De 13 a 37	Cada 4h
De 37 a 50	Cada 6h
De 50 a 130	Cada 12h
De 130 a 340	Cada 24h



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



Las pesadas se efectuaron en una balanza analítica ADVENTURE, OHAUS de $\pm 0,0001g$ de precisión.

Las curvas de secado, X^* versus t , se construyeron con los valores calculados de humedad adimensional a partir de aplicar la ecuación (2) a los datos experimentales:

$$X^* = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (2)$$

Donde X^* es la humedad adimensional, X_e es la humedad media de equilibrio en (kg agua/kg ss) y X_0 es la humedad media inicial en (kg agua/kg ss)

2.5. Determinación del coeficiente de difusión

El coeficiente efectivo de difusión de humedad (D_{ef}) se determinó a través de un método basado en la solución analítica de la segunda Ley de Fick, en el cual se asumen los siguientes supuestos: el proceso de difusión ocurre en estado inestable, el flujo de masa es unidimensional, la resistencia convectiva externa es despreciable comparativamente con la resistencia difusiva interna, el D_{ef} permanece constante al igual que el volumen de los frutos.

El D_{ef} de vinal se determinó a partir de las ecuación 3 propuesta por Tütüncü & Labuza (1996). Las vainas se asimilaron a una geometría de placa plana infinita.

$$X^* = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)\pi^2 D_{ef} t}{4L^2} \right] \quad (3)$$

Donde D_{ef} es el coeficiente de difusión efectivo de humedad en (m/s^2), t es el tiempo en (s) y L es el semiespesor de la lámina infinita en (m).

2.6. Análisis estadístico

Los datos experimentales que se informan corresponden a las medias de determinaciones realizadas por quintuplicado, los mismos se trabajaron matemáticamente a fin de aplicar una rutina de regresión lineal ejecutada en INFOSTAT. Se determinó el coeficiente de determinación lineal R^2 para establecer la bondad de los ajustes.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Secado

La Fig. 1 muestra la variación del contenido de humedad adimensional (X^*) de los frutos de vinal con el tiempo de secado a las temperaturas de 45 y 60°C a una velocidad de aire de 2m/s. En la curva de secado se observa un decrecimiento progresivo del contenido de humedad con el tiempo y una más rápida evaporación del agua a la mayor temperatura de secado.

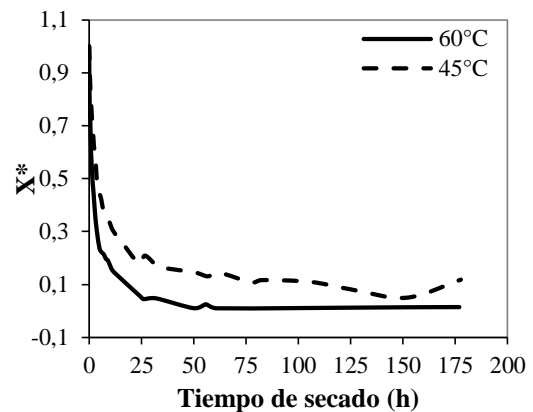


Figura 1. Efecto de la temperatura sobre la cinética de secado de vainas de *Prosopis ruscifolia* durante el secado convectivo.

Los frutos de *Prosopis ruscifolia* presentaron una humedad inicial de $9,08 \pm 0,42$ y de $6,24 \pm 0,42$ g agua/100g ss y una humedad de equilibrio de $8,07 \pm 0,34$ y de $6,24 \pm 0,2$ g agua/100g s.s. para las temperaturas de 60 y 45°C, respectivamente. En la Fig. 1 se pudo observar que el tiempo promedio en el que los frutos alcanzaron la humedad de equilibrio (X_{eq}) fue prolongado de aproximadamente 70 y 100 horas para 60 y 45°C, respectivamente, probablemente debido a la presencia de un epicarpio ceroso y resistente que dificulta la pérdida de humedad del fruto. Resultados similares fueron informados por Dadalis et al, (2007); Babalis et al, (2006) para ajíes e higos, respectivamente.



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



La variación de la velocidad de secado ($\Delta X_t/\Delta t$) con el tiempo de secado (t) se muestran en la Fig. 2. En ella se observa que el período de velocidad constante, característicos de frutos, no existió, por lo que los valores de X^* decrecieron rápidamente, con el consecuente incremento de la velocidad de secado cuando la temperatura del aire incrementó. El valor inicial de velocidad de secado incrementó a casi el doble cuando la temperatura del aire aumentó de 45 a 60°C y fue menos importante después de aproximadamente 15 a 20h. Resultados similares fueron obtenidos por Babalis & Belssiotis (2004) para secado de higos.

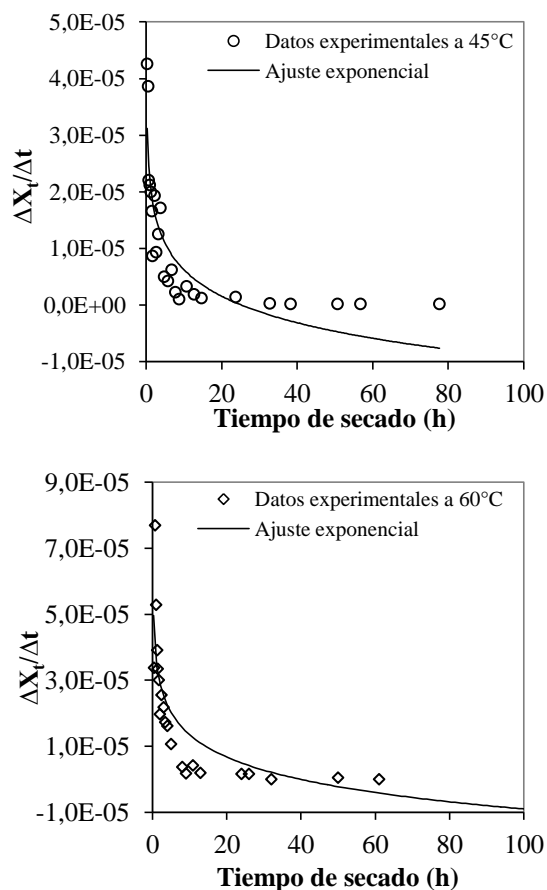


Figura 2. Variación de la velocidad de secado con el tiempo de secado de frutos de *Prosopis ruscifolia* a 45 y 60°C.

La velocidad de secado decreció exponencialmente con el tiempo de secado ($R^2=0,85$), en coincidencia a lo informado por otros autores en diversos frutos (Azzouz et al, 2002; Babalis & Velssiotis, 2004; Evin, 2012). Los resultados obtenidos nos permiten afirmar que todo el proceso de secado ocurrió durante el período de velocidad decreciente, es decir que el mecanismo de transporte predominante o controlante del proceso de secado es la resistencia a la transferencia interna de masa.

3.2. Determinación de D_{ef}

Para determinar el valor del coeficiente de difusión efectivo de humedad, D_{ef} , se graficaron en un diagrama semilogarítmico la humedad adimensional (X^*) versus el tiempo en segundos. Las curvas obtenidas son las que se representan en la Fig. 3. La forma de las curvas (cercanas a rectas) ratifican que el secado de las vainas de vinal se produce en la zona de velocidad decreciente. Esto significa que la difusión del líquido es la fuerza impulsora controlante del proceso de secado. Estos resultados permiten calcular el D_{ef} , definido a partir de la ec. 3, a partir de determinar la pendiente de las curvas.

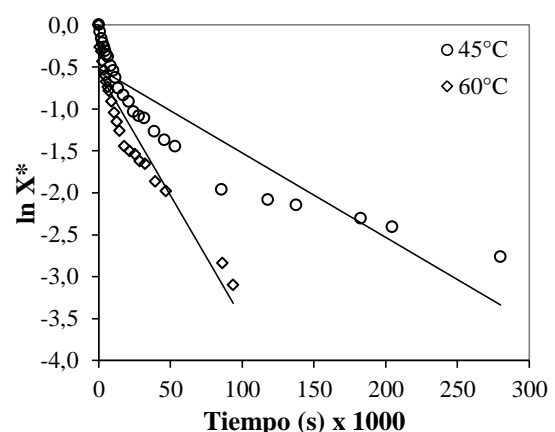


Figura 3. Linealización de la curva de secado a partir de una transformación logarítmica de X^* para las temperaturas de 45 y 60°C.

Las difusividades efectivas, D_{ef} , de las vainas de vinal fueron de $8,65 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ($R^2=0,91$) y



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



$2,88 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ($R^2 = 0,87$) para 60 y 45°C, respectivamente. Los valores determinados se encuentran en el rango general de 10^{-11} a $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ informados para materiales alimentarios (Zogzas et al, 1996).

4. CONCLUSIONES

Por lo expuesto, puede concluirse que el secado de los frutos de *Prosopis ruscifolia* ocurrió durante el período de velocidad decreciente, es decir que el mecanismo de transporte predominante o controlante del proceso de secado es la resistencia a la transferencia interna de masa. Esta cinética del proceso permitió calcular el D_{ef} a partir de la solución analítica de la ley de Fick. Las vainas de vinal presentaron D_{ef} de $8,65 \times 10^{-11}$ y $2,88 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ para 60 y 45°C, lo cual los ubica dentro del rango informado para alimentos

5. REFERENCIAS

- Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of analysis of the AOAC, 16th Edition. Arlington USA, 1995.
- Azzouz, S., Guizani, A., Jomaa, W. & A. Belghith, Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes, *Journal of Food Engineering*, 55, 323-330, 2002.
- Babalís, S.J. & V.G. Belessiotis, V.G., Influence of the drying conditions on the drying constants moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs, *Journal of Food Engineering*, 65, 449-458, 2004.
- Babalís, S.J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N. & V.G. Belessiotis, Evaluation of thin layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*), *Journal of Food Engineering*, 75, 205-214, 2006.
- Dadali, G., Apar, D.K. & B. Ozbek, Microwave drying kinetics of okara, *Drying Technology*, 25, 917-924, 2007.
- Evin, D., Thin layer kinetics of *Goundelia tournefortii* L. *Food and Bioproducts Processing*, 90, 323-332, 2012.
- Freyre, M., Astrada, D., Blasco, C., Baigorria, C.M. & C.M. Bernardi, Valores Nutricionales frutos de vinal (*Prosopis ruscifolia*): Consumo Humano y Animal, *Cienc. Tecnol. Aliment.* 4(1), 41-46, 2003.
- Hassini, L., Azzouz, S., Peczalski, R. & A. Belghith, Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage, *Journal of Food Engineering*, 79, 47-56, 2007.
- Park, K. J., Bin, A. & F.P.R. Brod, Drying of pear d'anjou with and without osmotic dehydration, *Journal of Food Engineering*, 56, 97-103, 2003.
- Pel, L., Brocken, H. & K. Kopinga, Determination of moisture diffusivity in porous media using moisture concentration profiles, *International Journal of Heat Mass Transfer*, 39, 1273-1280, 1996.
- Sharma, G. P. & S. Prasad, Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying, *Journal of Food Engineering*, 65, 609-617, 2004.
- Tütüncü, M.A. & T.P. Labuza, Effect of geometry on the effective moisture transfer diffusion coefficient, *Journal of Food Engineering*, 30, 443-447, 1996.
- Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B. & D. Maroulis-Kouris, Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs, *Drying Technology*, 14(10), 2225-2253, 1996.