

# ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TEMPERATURA, HUMEDAD, VELOCIDAD DEL AIRE O RADIACIÓN EN EL SECADO DE PIMIENTO

V. Passamai y L. Saravia

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional  
Facultad de Ciencias Exactas, Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta  
4400 - Salta - Argentina

## SUMMARY

*A model of drying red pepper is applied to study the comparative influence of air conditions around the product (temperature, humidity, speed) and the incident radiation on the process. The drying rate, or water content loss per unit area, is a function of the process parameters:  $n=n(X, T, H, v, I)$ . This equation is thoroughly analyzed and applied as an equation of state in Thermodynamics.*

## INTRODUCCIÓN

El secado solar de pimiento es un proceso de transferencia de calor y materia por el cual se produce pérdida de agua principalmente, la cual se manifiesta macroscópicamente a través de la disminución de peso del producto con el transcurso del tiempo.

En Termodinámica se establecen ecuaciones *constitutivas* para describir los estados de ciertos sistemas que difícilmente pueden ser hallados en forma teórica, o bien para caracterizar el comportamiento macroscópico que resulta de la constitución interna de los materiales. Ejemplos son los casos de la ecuación de estado de los fluidos ideales, las ecuaciones de Fourier o de Fick, etc. En forma similar, en este trabajo se presenta la descripción del proceso de secado solar de pimiento rojo para pimentón como si se tratara de un sistema termodinámico cuya ecuación de estado (cinética) se conoce.

Efectivamente, si el *estado* del proceso de secado se conoce a través de la cinética del mismo, es decir estableciendo la *velocidad de pérdida de agua* en un dado instante,  $n$ , y las variables que *controlan* dicho estado son la temperatura del aire que rodea el producto,  $T$ , la humedad relativa,  $H$ , la velocidad de flujo del aire,  $v$ , la radiación solar incidente,  $I$ , e indirectamente - como se ha demostrado (Passamai y Saravia, 1997)- el propio contenido de agua,  $X$ ; resultará que la ecuación del "*estado de secado*" estará dada por una expresión de la forma:

$$n = n(X, T, H, v, I).$$

En ésta, una de las cinco variables independientes es *interna* e inherente al sistema,  $X$ , y las otras cuatro son *externas*, correspondientes al medio ambiente que rodea al producto. La derivada de la variable  $X$  respecto al tiempo está vinculada con  $n$  a través de su definición, dada por:

$$n = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt}$$

siendo entonces proporcional a ella. La acción de las variables externas,  $T$ ,  $H$ ,  $v$  y la radiación  $I$  se pone de evidencia escribiendo explícitamente la expresión de la cinética, tal como fue presentada por Passamai y Saravia (1997):

$$n = c_p(X)P_s(T)(1-H)v^{0.5} + c_i(X)v^{0.2}I \quad (1)$$

En este trabajo se analizará y explicitará gráficamente la dependencia de  $n$  con las variables que la definen, dentro de los

rangos de aplicación de cada una, interpretándose las distintas consecuencias que se desprenden de cada caso.

## ANÁLISIS

Observando la expresión de la cinética, se puede interpretar que está constituida por dos términos, de modo que:

$$n = n_p(X, T, H, v) + n_i(X, v, I)$$

separándose de esta forma la acción debida al efecto térmico del aire, la presión de vapor del agua y humedad de la correspondiente a la radiación. En ambos casos existe influencia de la velocidad del aire, observándose claramente por la ecuación (1) la "imposibilidad" del secado en aire quieto.

Por su parte,  $n_p(X, T, H, v)$  es la expresión de la cinética del secado en ausencia de radiación incidente sobre el producto, mientras que  $n_i(X, v, I)$  es imposible que exista sin la presencia de la anterior, ya que es impensable la acción de radiación y velocidad del aire sin efectos higrótérmicos y de presión de vapor sobre el producto.

Para comenzar con el análisis de  $n$  en términos de sus variables independientes, se debe tener en cuenta que para graficar en tres dimensiones se deberán evaluar algunas de las diez funciones  $n_1(X, T)$ ,  $n_2(X, H)$ , ...,  $n_{10}(v, I)$  que se pueden obtener de las posibilidades establecidas mediante la ayuda de la siguiente matriz:

	$X$	$T$	$H$	$v$	$I$
$X$	7	$X, T$	$X, H$	$X, v$	$X, I$
$T$		40	$T, H$	$T, v$	$T, I$
$H$			0.3	$H, v$	$H, I$
$v$				0.3	$v, I$
$I$					800

Tabla 1: Variables involucradas en el proceso de secado.

en que se ha triangularizado para resaltar las posibilidades de pares de variables sin repetición y se han dado valores significativos o típicos a cada variable, según los siguientes criterios:  $X=7$  kg/kg, por ser un valor de contenido medio de agua

esperable para el producto que se está tratando;  $T=40^{\circ}\text{C}$ , temperatura típica para procesos de secado de pimiento;  $H=30\%$ , humedad relativa adecuada para el proceso;  $v=0.3\text{ m/s}$ , valor óptimo para la velocidad del aire e  $I=800\text{ W/m}^2$ , valor de radiación solar de un día de buenas condiciones atmosféricas, cerca del mediodía. Se dan los rangos en los ejes coordenados.

Empezando con la variación de  $n$  con  $X$  y  $T$ , de acuerdo con las expresiones de la tabla y haciendo uso de las correlaciones encontradas en el trabajo citado, el gráfico de  $n \cdot 10^5$  resulta como se indica en la figura 1.

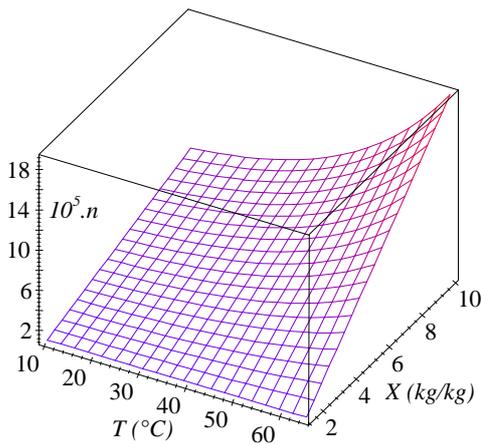


Figura 1 – Influencia de la temperatura y del contenido de agua en la velocidad del secado.

En ella se observa que la temperatura toma un valor máximo de  $65^{\circ}\text{C}$  y el contenido de humedad máximo se supone igual a  $10\text{ kg/kg}$ . Como era de esperar,  $n$  es máximo igualmente para estos valores, decreciendo en forma exponencial con la temperatura y en forma lineal con el contenido de agua.

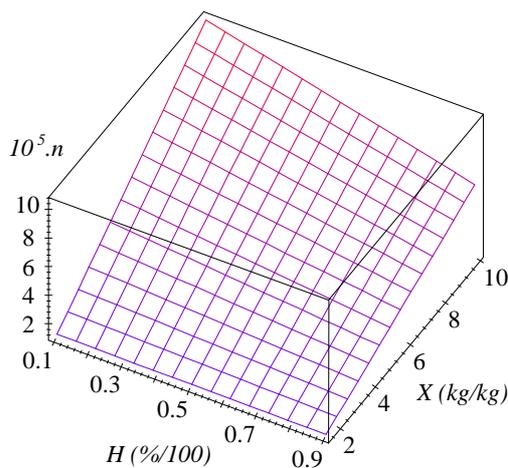


Figura 2 – Influencia de la humedad y del contenido de agua en la velocidad del secado.

En el caso de la figura 2 se observa la humedad relativa variando entre  $10$  y  $90\%$ , siendo la dependencia de  $n$  con  $X$  y con  $H$  de tipo lineal. El máximo de  $n$  se obtiene para el mínimo de humedad y máximo contenido de agua.

Por su parte, en la figura 3 se ha representado  $n(X,v)$ , y se observa la forma potencial de la dependencia de  $n$  con la velocidad del aire,  $v$ . El máximo para la velocidad del secado se da para el mayor contenido de agua del producto y mayor ventilación o velocidad del aire. Con esta última, la variación de  $n$  es de tipo potencial.

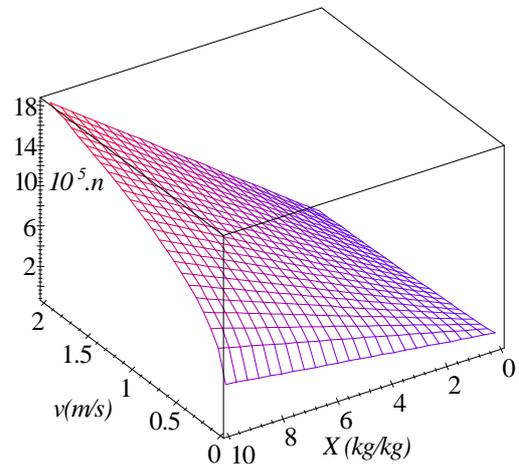


Figura 3 – Variación de  $n$  con  $X$  y con  $v$ .

Para finalizar, se obtiene la gráfica de  $n$  en términos de  $v$  e  $I$ , la que se muestra en la figura 4.

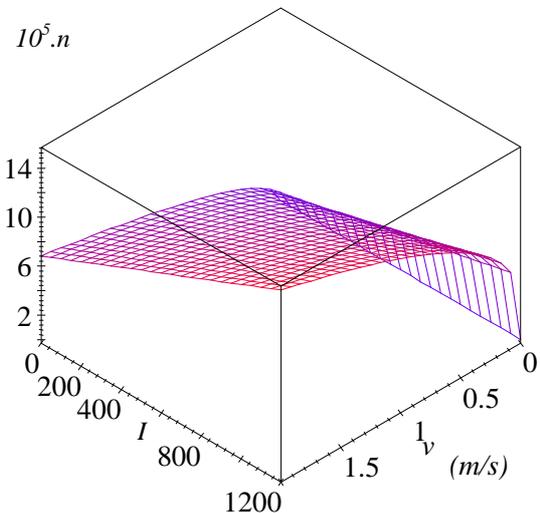


Figura 4 – Variación de  $n$  con la radiación incidente sobre el producto,  $I$  ( $\text{W/m}^2$ ), y con la velocidad  $v$  ( $\text{m/s}$ ) del aire.

### ANÁLISIS ALTERNATIVO

Una alternativa al análisis realizado anteriormente consiste en volcar los datos en dos dimensiones en lugar de tres.

También, con el objeto de comparar la influencia de la velocidad del aire sobre las componentes  $n_p$  y  $n_i$  de la velocidad de secado, para las mismas condiciones constantes que antes, es posible comparar uno y otro aporte mediante las ecuaciones:

$$n = n_p + n_i \quad \text{o bien} \quad 100 = 100 n_p/n + 100 n_i/n$$

como se ve reflejado en los gráficos de las figuras 5 a 14.

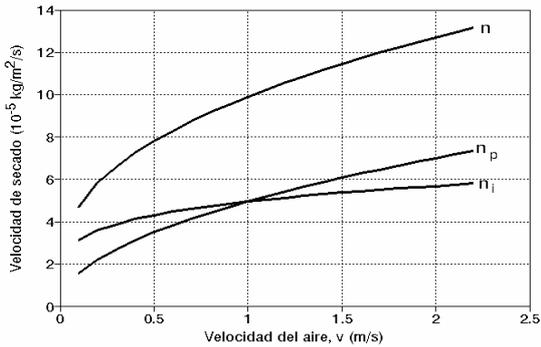


Figura 5: Variación de  $n$  y componentes  $n_p$  y  $n_i$  con la velocidad del aire.

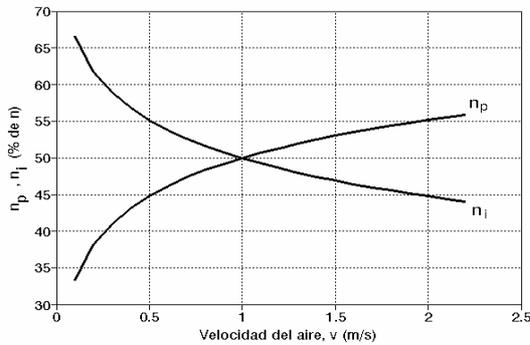


Figura 6: Variación relativa porcentual de las componentes  $n_p$  y  $n_i$  de  $n$  con la velocidad del aire.

Es notable de la figura 6 que la contribución de  $n_p$  es menor que la de  $n_i$  siempre que la velocidad del aire sea menor que  $1 \text{ m/s}$  (por lo que se la podría denominar "velocidad crítica"). Si se supera esta velocidad del aire, prevalece el efecto de la evaporación debido a las condiciones higrotérmicas y de presión del aire, de lo contrario, para el nivel establecido de radiación, contribuye mayormente el término  $n_i$ . Esto es válido, como se dijo, para esas condiciones constantes. Si cualquiera de ellas cambia, por ejemplo, si se aumenta la temperatura, la velocidad crítica disminuye. Ello se observa cuando se cambia la temperatura de  $40$  a  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ . En cambio el efecto es contrario si se baja dicha temperatura a  $38 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Para las condiciones constantes:  $v = 1 \text{ m/s}$ ,  $I = 800 \text{ W/m}^2$ ,  $X = 7 \text{ kg/kg}$  y  $H = 30 \%$  se obtiene el gráfico de la figura 7, es decir la variación de  $n$ ,  $n_p$  y  $n_i$  con la temperatura  $T$ . Se observa que solo la componente  $n_p$  acompaña a  $n$  ya que  $n_i$  no depende de la temperatura.

En cambio, la figura 8 muestra que al graficar en forma relativa porcentual el aporte de cada componente al total  $n$ , se encuentra una apariencia más pareja de los aportes relativos de  $n_p$  y  $n_i$  a  $n$ . La temperatura de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  establece un límite que divide la prevalencia de una sobre la otra, mostrando una gráfica muy simétrica en el rango de  $10$  a  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Las figuras 9 a 14 muestran, sucesivamente, la dependencia de  $n$  y sus componentes con la radiación incidente,  $I$ , el contenido de agua del producto,  $X$ , y la humedad relativa del ambiente,  $H$ ,

tanto para los valores absolutos como los relativos porcentuales.

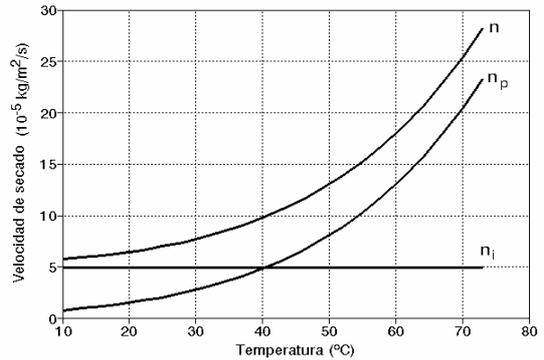


Figura 7: Variación de  $n$  y de las componentes  $n_p$  y  $n_i$  con la temperatura del aire.

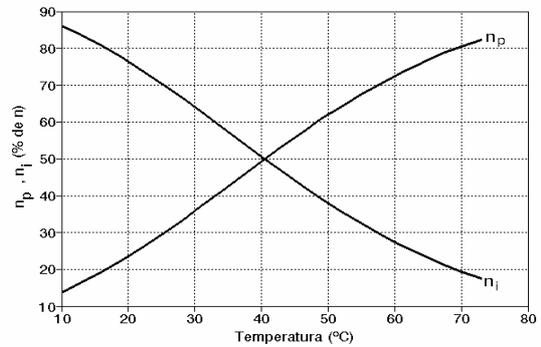


Figura 8: Variación relativa porcentual de las componentes  $n_p$  y  $n_i$  de  $n$  con la temperatura del aire.

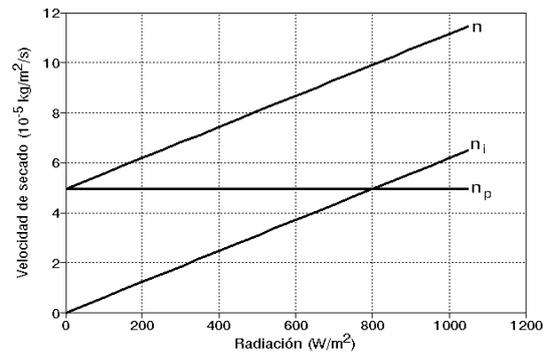


Figura 9: Variación de  $n$  y de  $n_p$  y  $n_i$  con la radiación.

La influencia del término de radiación  $n_i$  se hace sentir de manera importante cuando la radiación incidente es igual o mayor que  $800 \text{ W/m}^2$ , mostrando la figura 10 un gráfico asimétrico en el rango de radiaciones que van de  $0$  a  $1000 \text{ W/m}^2$ , con un aporte del término  $n_p$  que es mayor que el  $50 \%$  de  $n$  para el  $80 \%$  de las radiaciones esperables y siempre que las demás condiciones sean las establecidas en la Tabla 1. La figura 12 muestra en cambio una interpretación que favorece a la contribución que proviene de la incidencia de la radiación, pues para contenidos de agua menores que  $7 \text{ kg/kg}$ ,  $n_i > 0.5n > n_p$ .

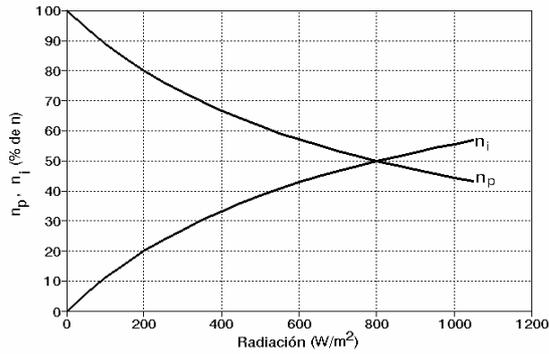


Figura 10: Variación porcentual de  $n_p$  y  $n_i$  con la radiación.

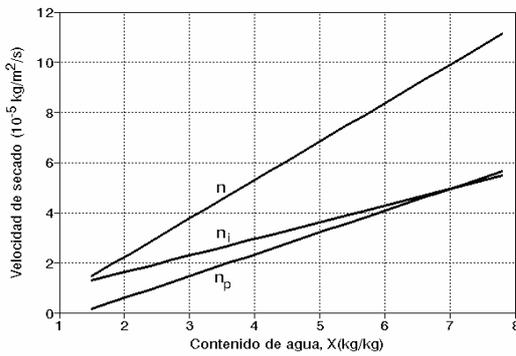


Figura 11: Variación de  $n$  y de  $n_p$  y  $n_i$  con  $X$ .

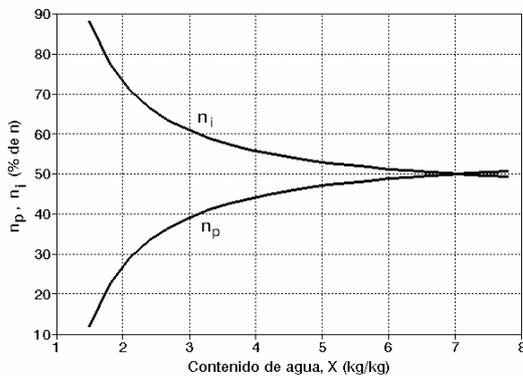


Figura 12: Variación porcentual de  $n_p$  y  $n_i$  con  $X$ .

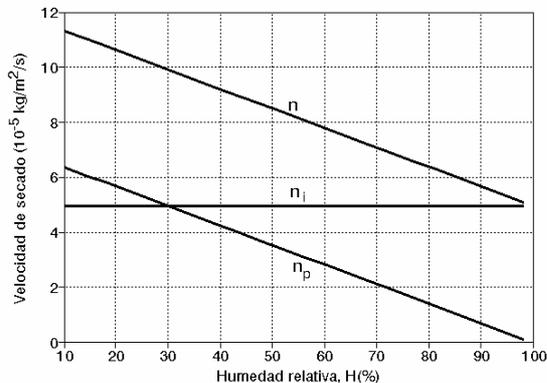


Figura 13: Variación de  $n$  y de  $n_p$  y  $n_i$  con  $H$

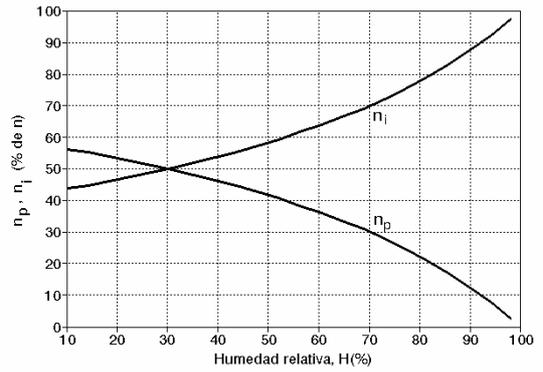


Figura 14: Variación porcentual de  $n_p$  y  $n_i$  con  $H$ .

Según las figuras 13 y 14, la contribución del término de radiación es más importante que el de presión para el rango de humedades del aire que va del 30 al 90 %, bajo el resto de condiciones constantes.

### CONCLUSIONES

La importancia relativa del término de radiación frente al de presión en la cinética del secado depende de las condiciones higrotérmicas del aire y de la radiación total incidente.

Para buenas condiciones de radiación incidente,  $n_i$  prevalece sobre  $n_p$  cuando las velocidades y temperaturas del aire son bajas, lo mismo que el contenido de agua del producto; en cambio su influencia es menor cuando la humedad del aire es baja.

Por todo lo antedicho, no se puede establecer una regla general que determine el porcentaje de influencia del aporte solar al secado de productos vegetales como el pimiento, frente al mismo proceso llevado a cabo en ausencia de radiación y por el único efecto del aire caliente.

### NOMENCLATURA

$A$  área,  $m^2$

$c_r(X) = (8,3X + 3,8) \cdot 10^{-9} (s/m)^{2,2}$  coeficiente variable (conductancia) que modifica el término de radiación en la ecuación de secado

$c_p(X) = 1,65 \cdot 10^{-9} (X - 1,3) (s/m)^{1,5}$  conductancia global que modifica el término de presión en la ecuación de secado

$H$  humedad relativa del aire, % o tanto por uno

$I$  radiación incidente superficial neta,  $W/m^2$

$m$ , peso seco,  $kg$

$n$  densidad superficial de pérdida de agua,  $kg/(s \cdot m^2)$

$P$ , presión parcial del vapor de aire húmedo,  $Pa$

$t$  tiempo,  $s$

$T$  temperatura del aire,  $K$

$v$  velocidad del aire,  $m/s$

$X$  contenido de agua en base seca,  $kg$  de agua/ $kg$  de masa seca

### REFERENCIA

Passamai, V. J. y Saravia, L.: "Relationship between a solar drying model of red pepper and the kinetics of pure water evaporation (part I y II), *Drying Technology*. An International Journal, Vol. 15, N. 5, pp. 1419-1455 (I) y 1433-1455 (II). 1997.