

Mecanismo y cinética del secado de zanahorias con aire caliente

A. Mulet (I), C. Rosselló (I), F. Piñaga (II), J. V. Carbonell (II) y A. Berna (II)*

(I) Cátedra de Química Técnica. Facultad de Químicas. Universidad de Palma de Mallorca. España.

(II) Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos (C.S.I.C.). Jaime Roig, 11. Valencia. España

RESUMEN

Se estudia el efecto de tres temperaturas del aire, 50, 60 y 70° C y tres densidades de carga, 10, 20 y 30 Kg producto/m², sobre el secado de zanahorias en piezas de 10 × 10 × 8 mm. Utilizando los datos experimentales, y considerando que el transporte de humedad tiene lugar por un mecanismo de difusión, se han caracterizado los parámetros de una ecuación descriptiva del comportamiento cinético del proceso de secado.

En el intervalo de temperaturas de ensayo, 50-70° C, el modelo reproduce satisfactoriamente el comportamiento de las zanahorias durante el secado en el caso de las densidades de 10 y 20 Kg/m²; la capacidad del modelo en la predicción de los resultados experimentales es inferior en el caso de la densidad de 30 Kg/m².

ABSTRACT

Mechanism and kinetics of carrot drying with heated air

The effect of three temperatures, 50, 60 and 70° C, and three loading rates, 10, 20 and 30 Kg/m² on drying of diced carrots is studied. From experimental results, an equation describing kinetic behaviour of the drying process has been deduced.

The equation predicts satisfactorily experimental results for a 10 Kg/m² loading rate and the whole range of temperatures under study; agreement between experimental and theoretical results diminishes as loading rate increases owing to an effect of reduction of evaporation surface.

INTRODUCCION

En un estudio sobre las repercusiones futuras del aumento del coste del petróleo en las prácticas de producción agrícola, la FAO (1976) apunta la conveniencia de restringir el empleo de aquellos procesos que suponen un gasto considerable de energía. En el citado estudio, aquella organización

sitúa a la deshidratación artificial en la categoría de este tipo de procesos de elevado consumo energético. Como un eco a esta llamada de atención, las revistas técnicas recogen, cada vez en número más grande, trabajos de investigación sobre procesos de secado con aire ambiente (Morey *et al.*, 1979; Madarro *et al.*, 1981) y por energía solar (Bolin y Salunkhe,

* Dirección actual: Cátedra de Química Técnica. Facultad de Química. Valencia. España.

1982; Carbonell *et al.*, 1981), de reducido consumo de energía. La optimización de procesos constituye un primer paso hacia una meta de ahorro energético (Flink, 1977, Singh, 1978).

Algunos productos deshidratados, ya tradicionales en el mercado, gozan hoy de gran interés comercial, y no es previsible, por ello, pese a las sobradas razones que apoyan los consejos de la FAO, que la producción de aquellos deshidratados de mayor aceptación se vea mermada seriamente en un futuro más o menos próximo. En apoyo de este punto de vista hay que citar (Bolin y Salunkhe, 1982) que los sistemas experimentales de secado solar poseen todavía una baja capacidad de producción. Entre los deshidratados de interés en el mercado hay que destacar las zanahorias; su calidad y valor nutritivo atraen la atención industrial.

En este trabajo se dan a conocer los resultados obtenidos en el secado con aire caliente y en condiciones constantes de zanahorias troceadas y se presenta un modelo cinético, el que brinda la información necesaria para el diseño de secaderos mecánicos donde deshidratar aquel producto.

MATERIAL Y METODOS

Material

Se utilizan zanahorias de la variedad Chantenay en forma de dados de $10 \times 10 \times 8$ mm. Para la obtención de éstos, las zanahorias se pelan, se escaldan seguidamente durante 8 minutos con vapor de agua a presión atmosférica y se enfrían, a continuación, por inmersión en una solución acuosa de NaSO_3H ; la solución posee un contenido teórico de 900 ppm de SO_2 . El producto así tratado se corta finalmente en piezas de la geometría y dimensiones indicadas.

Para asegurar la estabilidad del producto hasta el momento de proceder a los ensayos de secado, los dados de zanahoria se almacenan en un frigorífico a 4°C y en recipientes herméticamente cerrados, durante un período máximo de 5 días.

Secado

Se ha realizado en una unidad modular tipo R&D de la firma Sargent's Sons Corp. (EE.UU.). Es un secadero de armario experimental en el que es posible la regulación de la temperatura, velocidad, dirección y recirculación del aire de secado. La medida y gobierno de las temperaturas seca y húmeda del aire se realizan en un controlador neumático de banda proporcional Modelo 40 de la firma Foxboro (EE.UU.). La velocidad del aire se mide con un termoanemómetro de hilo caliente Wallac de la casa Thies (Alemania Federal).

La pérdida de humedad durante el secado se determina pesando periódicamente la bandeja con el producto.

Contenido en humedad

La determinación de este contenido se realiza tanto en el producto deshidratado como en el fresco escaldado utilizado como materia prima.

Se recurre en esta determinación al método oficial de secado a vacío (A.O.A.C., 1970). Este se realiza en un liofilizador experimental y las condiciones de trabajo son las siguientes: temperatura de placas radiantes, 65°C , presión absoluta, 0'3 Torr, y tiempo de secado, 8 horas.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la tabla I se indican las condiciones medias del aire utilizado en las experiencias de secado.

En un estudio sobre el mecanismo del secado de frutas y hortalizas, Saravacos y

Charm (1962) han puesto de manifiesto que para velocidades del aire superiores a 2'03 m/s (400 pies/min), la velocidad de secado de zanahorias resulta poco afectada por cambios de aquella variable. En un estudio anterior, Mitchell y Potts (1958) afirman que no parece existir ventaja adicional alguna en el secado de este producto al utilizar velocidades másicas del aire superiores a 14 lb/pie².min. (4.145 Kg/hr m²). Es decir, la transferencia de materia está controlada por el mecanismo de desplazamiento del agua en el interior del sólido. En este estudio, tal como se observa en la tabla I, las experiencias se han realizado con una velocidad del aire superior a aquel valor.

Descartada, por estas razones, la velocidad del aire como variable de operación, se ha decidido centrar las experiencias en el estudio de la influencia de la temperatura del aire y de la densidad de carga. El campo de variación de estas variables, según la bibliografía (Van Arsdel y Copley, 1964; Von Loesecke, 1955), abarca aproximadamente el intervalo de temperaturas de 50 a 70° C, y el de cargas de 10 a 30 Kg/m². Los ensayos de secado se han realizado de forma que cubren uniformemente los intervalos señalados.

En las figuras 1, 2 y 3 se ha representado, para las condiciones ensayadas, la variación del contenido en humedad de

Tabla I

CONDICIONES MEDIAS DEL AIRE DE SECADO

Temperatura (°C)	50	60	70
Velocidad (m/s)	2'3	2'3	2'3
Humedad relativa (%)	25	14	6
Velocidad másica (Kg/hm ²)	9048	8785	8520

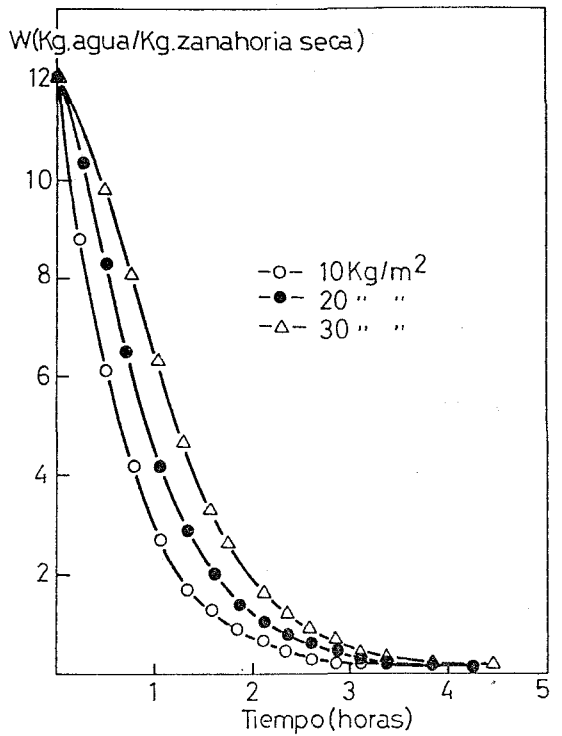


Fig. 1.—Curvas de secado a 50° C de las zanahorias troceadas.

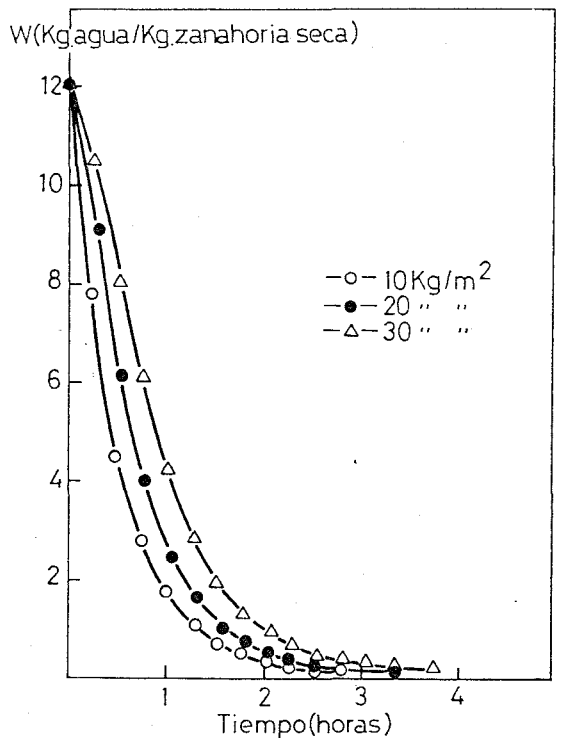


Fig. 2.—Curvas de secado a 60° C de las zanahorias troceadas.

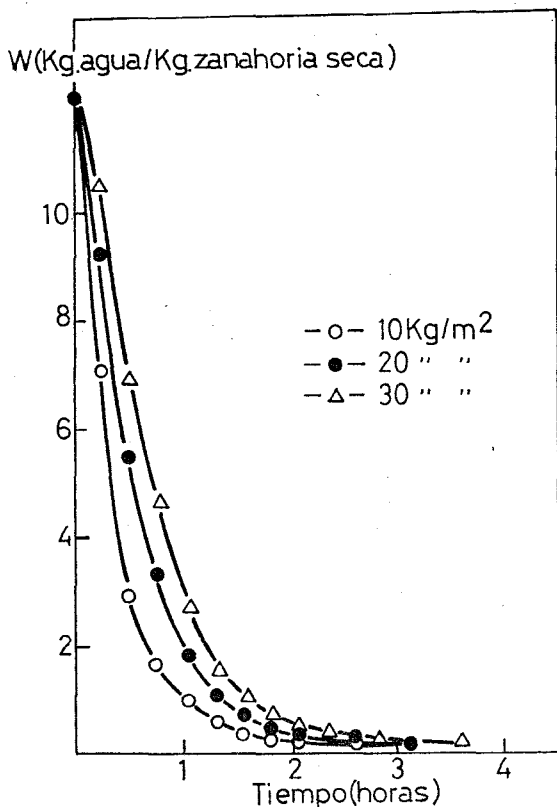


Fig. 3.—Curvas de secado a 70° C de las zanahorias troceadas.

las zanahorias frente al tiempo transcurrido desde el inicio de la operación.

Las curvas de secado indican que la mayor parte del proceso transcurre dentro del período de velocidad decreciente.

El análisis de los resultados ha puesto de manifiesto que tan sólo en el caso del proceso a 50° C y para la densidad de carga de 30 Kg/m², el secado tiene lugar según dos períodos de velocidad decreciente; por ello, en este trabajo, se proyecta obtener únicamente la cinética del primer período de velocidad decreciente, que ha sido la habitual. El estudio supone, apoyándose en los resultados de Saravacos y Charm (1962), que la transferencia de materia en el sólido tiene lugar según un mecanismo de difusión molecular.

Admitiendo un comportamiento isotrópico del sólido respecto a la difusión

del agua y considerando que el movimiento de ésta tiene lugar según un mismo mecanismo durante el período objeto de estudio (Jason, 1958), el proceso puede describirse por la ecuación de Fick:

$$\frac{\partial W_p}{\partial \theta} = -D \left[\frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_z}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

La solución de esta ecuación requiere que la humedad del sólido al iniciarse la difusión (humedad crítica) sea uniforme o bien que pueda expresarse como un producto $X_i(x) \cdot Y_i(y) \cdot Z_i(z)$. Puesto que la extensión del período de secado de velocidad constante es despreciable en todos los casos encontrados en este estudio, se puede aceptar como correcta la primera de aquellas condiciones, de forma que:

$$\text{para } \theta = 0, \quad W_p = W_e$$

Por otra parte, las condiciones del contorno son las siguientes:

$$\begin{aligned} x = L_x & \quad W_{px} = W_e \\ y = L_y & \quad W_{py} = W_e \\ z = L_z & \quad W_{pz} = W_e \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x = 0 & \quad \partial W_x / \partial x = 0 \\ y = 0 & \quad \partial W_y / \partial y = 0 \\ z = 0 & \quad \partial W_z / \partial z = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Expresando la ecuación (1) y las condiciones de contorno en forma adimensional y recurriendo al método de separación de variables, se puede resolver aquella ecuación, la solución para la dirección x adopta la forma:

$$\frac{W_{px} - W_e}{W_c - W_e} = \frac{4}{\pi} \left[\cos\left(\frac{\pi x}{2L_x}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 D \theta}{4L_x^2}\right) + \dots \right]$$

$$+ \frac{1}{3} \cos\left(\frac{3\pi x}{2L_x}\right) \exp\left(-\frac{9\pi^2 D\theta}{4L_x^2}\right) + \left. + \frac{1}{5} \cos\left(\frac{5\pi x}{2L_x}\right) \exp\left(-\frac{25\pi^2 D\theta}{4L_x^2}\right) + \dots \right] \quad (4)$$

La solución para el problema tridimensional se obtiene como producto de las tres soluciones unidimensionales.

Para facilidad de manejo de aquella ecuación puede suponerse (con un error menor que el 10 % en este estudio) que frente al primer término del desarrollo en serie, los restantes son despreciables en cada una de las soluciones unidimensionales.

Con el fin de operar con valores medios de la humedad, que son los obtenidos en las medidas de secado, se ha integrado la ecuación representativa del problema unidimensional respecto al volumen total del sistema; se ha supuesto para ello que $L_x = L_y = L_z = r_m$. Asimismo, con vistas a que la ecuación cinética satisfaga la condición inicial ($\theta = 0, W_p = W_c$), se ha supuesto que el factor que multiplica a la exponencial es aproximadamente la unidad. Se puede comprobar fácilmente que la ecuación en forma de serie tiende hacia ese valor.

Introducidas las suposiciones anteriores, se obtiene para el cálculo del valor medio de la humedad:

$$\frac{W - W_e}{W_c - W_e} = \exp\left(-\frac{3\pi^2 D}{4r_m^2} \theta\right) \quad (5)$$

Esta ecuación debe cumplirse teóricamente para cualquier temperatura. No puede esperarse en principio que ocurra lo mismo en el caso de las densidades de carga, ya que las condiciones de contorno consideradas en la deducción de la ecuación requieren que toda la superficie exterior del producto sometido a secado esté en contacto con el aire. Esta condición sólo se cumplirá para valores de aquella variable en los que

las piezas de zanahorias están separadas; en caso contrario resulta más adecuado hablar de difusividades aparentes.

Para comprobar si la ecuación (5) se adapta a los resultados experimentales, se ha representado gráficamente, como sugiere la citada ecuación, el valor del $\ln[(W - W_e)/(W_c - W_e)]$ frente al tiempo; la figura 4 muestra este tipo de representación para una densidad de carga de 10 Kg/m² y las tres temperaturas de ensayo.

Tal como puede observarse en la citada figura, para valores de $(W - W_e)/(W_c - W_e) < 0.6$ los puntos obtenidos se ajustan perfectamente a una línea recta. Este resultado es coherente con la existencia de un mecanismo de difusión de agua en el sólido (Perry y Chilton, 1973). De la pendiente de aquellos tramos rectos, cuyo valor es $(-3\pi^2 D/4 r_m^2)$, es posible deducir los valores de D/r_m^2 . Los resultados obtenidos se exponen en la tabla II.

La figura 5 muestra la variación del término D/r_m^2 con la temperatura. Se ha representado también el valor obtenido por Madarro (1983) a temperatura ambiente (22° C). Como puede observarse, los valores de aquel coeficiente se ajustan perfectamente a una línea recta representativa de una relación tipo Arrhenius:

$$D = D_0 \cdot \exp(-E/RT) \quad (6)$$

la que, por regresión lineal, adopta, en el caso de este estudio, la forma:

$$\ln(D/r_m^2) = 7.2865 - 2848.5/T \quad (7)$$

De la pendiente de la recta así obtenida se ha deducido el valor de la energía de activación para la difusión del agua. Esta

ha resultado ser de 1.314 KJ/Kg, valor muy similar al de 1.200 KJ/Kg obtenido por Mazza y Le Maguer (1978) para el caso del secado de cebollas.

En la tabla II se exponen los valores del coeficiente de difusión del agua calculados utilizando un valor medio de r_m igual a 9'283, éste corresponde a la dimen-

sión de un cubo perfecto del mismo volumen que el de las piezas sometidas a secado.

A partir de la expresión (7) se puede ya plantear una ecuación cinética del tipo de la indicada en (5), la que toma la forma siguiente:

$$\ln \frac{W - W_e}{W_c - W_e} = -\frac{3\pi^2}{4} \theta \exp(7'2865 - 2848'5/T) \quad (8)$$

Esta ecuación ofrece una descripción analítica del proceso de secado de zanahorias en dados, para el primer período de difusión y para densidades de carga tales

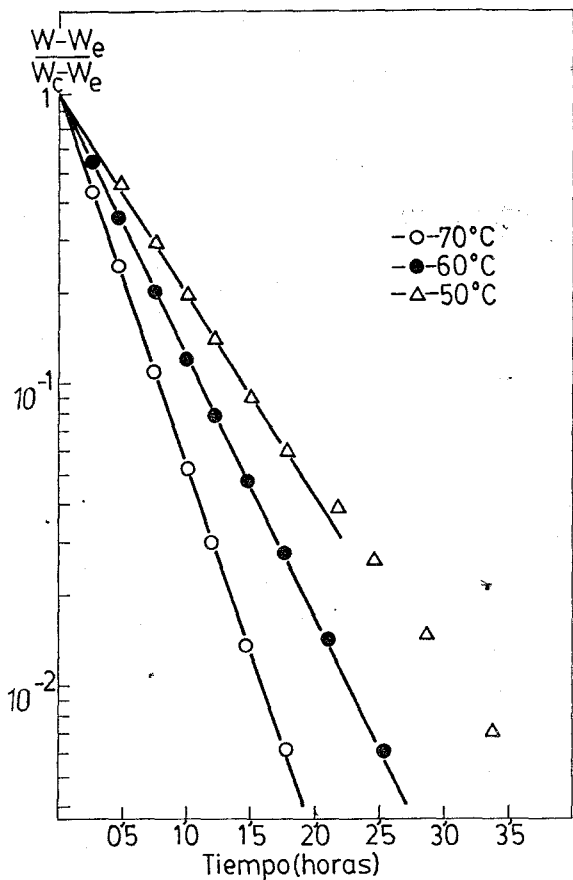


Fig. 4.—Variación en el curso del proceso de secado de zanahorias de la razón humedad libre/humedad total (densidad de carga: 10 Kg/m²).

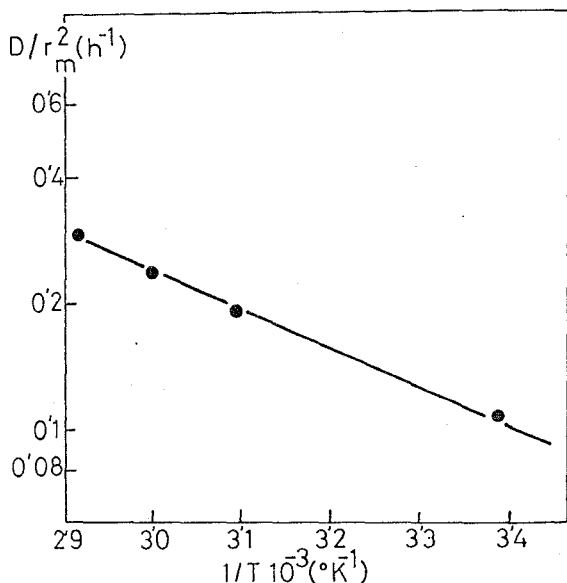


Fig. 5.—Variación del coeficiente de difusión con la temperatura.

Tabla II

VALORES DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DEL AGUA PARA LA DENSIDAD DE CARGA DE 10 Kg/m²

Temperatura (°C)	50	60	70
Pendiente de las rectas de la fig. 4.	-1'4599	-2'0547	-2'8638
D/r_m^2 (hr ⁻¹)	0'1972	0'2772	0'3868
Intervalo experimental de W (Kg agua/Kg m.s.)	8'5-0'63	7'5-0'30	6'5-0'08
Coefficiente de difusión (m ² /hr)	$1'69 \cdot 10^{-5}$	$2'38 \cdot 10^{-5}$	$3'33 \cdot 10^{-5}$

que las piezas de producto se mantengan separadas entre sí.

Con el fin de comprobar la validez del modelo definido por (8), se ha procedido, haciendo uso del mismo, al cálculo de los valores de W para distintos tiempos y a la

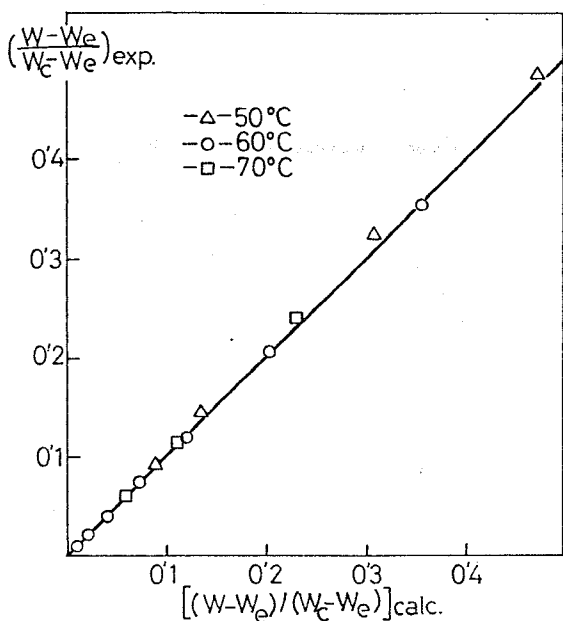


Fig. 6.—Valores experimentales de la razón $(W - W_e)/(W_c - W_e)$ frente a los calculados por la ecuación (12) (densidad de carga: 10 Kg/m²).

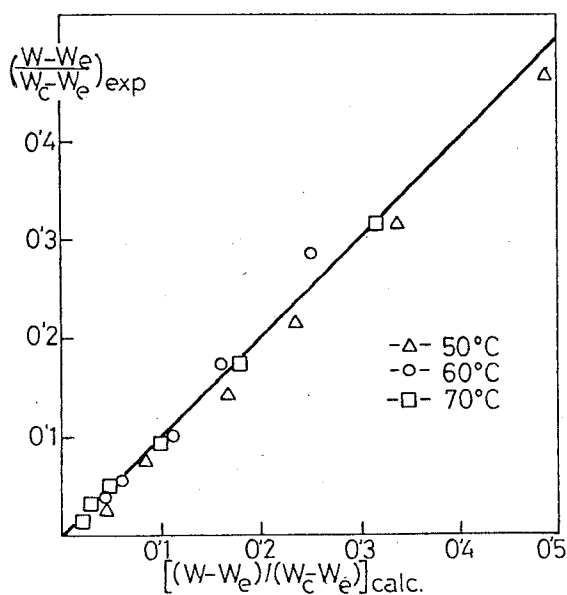


Fig. 7.—Valores experimentales de la razón $(W - W_e)/(W_c - W_e)$ frente a los calculados por la ecuación (13) (densidad de carga: 20 Kg/m²).

comparación de éstos con los correspondientes valores experimentales. Los resultados obtenidos se muestran gráficamente en la figura 6, en la que se pone de manifiesto la excelente concordancia entre ambas series de valores. Este resultado no debe, sin embargo, olvidar que el coeficiente de difusión se ha calculado suponiendo un cuerpo rígido.

Operando de modo análogo al descrito para la densidad de carga de 10 Kg/m², se obtienen sendas expresiones del tipo (8) para los dos restantes valores de aquella variable. Las ecuaciones son:

$$\ln \frac{W - W_e}{W_c - W_e} = -\frac{3\pi^2}{4} \theta \exp(6'1248 - 2503'5/T) \quad (9)$$

para la densidad de carga de 20 Kg/m², y

$$\ln \frac{W - W_e}{W_c - W_e} = -\frac{3\pi^2}{4} \theta \exp(9'032 - 3474'7/T) \quad (10)$$

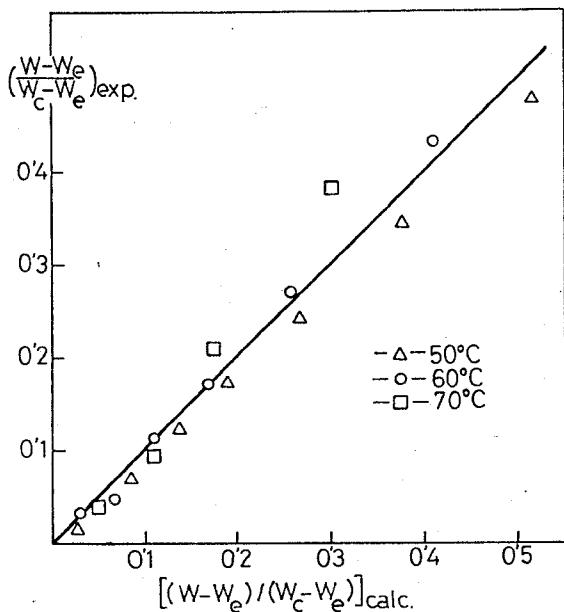


Fig. 8.—Valores experimentales de la razón $(W - W_e)/(W_c - W_e)$ frente a los calculados por la ecuación (14) (densidad de carga: 30 Kg/m²).

Tabla III

ANÁLISIS ESTADÍSTICO CORRESPONDIENTE A LOS RESULTADOS DE LAS FIGURAS 6, 7 Y 8

	10	20	30
Densidad de carga (Kg/m ²)	10	20	30
Coefficiente de correlación	0'999308	0'993611	0'981068
Varianza residual	30 × 10 ⁻⁶	226 × 10 ⁻⁶	866 × 10 ⁻⁶
Ordenada en origen	-0'00028*	-0'00224*	-0'00408*
Pendiente	1'0191**	0'9732**	1'0072**

* No existen diferencias significativas a un nivel de probabilidad del 95 % respecto al valor teórico ($b=0$).

** No existen diferencias significativas a un nivel de probabilidad del 95 % respecto al valor teórico ($a=1$).

para la de 30 Kg/m².

En las figuras 7 y 8 se han representado finalmente los valores experimentales de la razón $(W - W_e)/(W_c - W_e)$ frente a los calculados por las ecuaciones (9) y (10) para los valores respectivos de 20 y 30 Kg/m² de la densidad de carga.

En la tabla III se resume el análisis estadístico de los valores representado en las figuras 6, 7 y 8. Se ha efectuado el ajuste lineal de los datos experimentales y se han comparado los parámetros que definen las rectas resultantes con los de la teórica recta bisectriz. En ningún caso se han detectado diferencias significativas, lo que indica que las ecuaciones (8), (9) y (10) son válidas para explicar el comportamiento en el secado de las zanahorias cortadas en dados y distribuidas en bandejas con densidades de carga de 10, 20 y 30 Kg/m², respectivamente. No obstante, puede observarse una mayor dispersión de los datos experimentales —véase las variaciones del coeficiente de correlación y de la varianza residual— a medida que aumenta la densidad de carga, debido, tal como se ha explicado anteriormente, a las desviaciones del modelo respecto a la condición impuesta en su deducción de un contacto total aire-producto.

NOMENCLATURA

- D Difusividad del agua a través del sólido (m²/hr).
- E Energía de activación (KJ/Kg).
- r_m Longitud característica (m).
- T Temperatura absoluta (°K).
- W Humedad media (Kg agua/Kg m.s.).
- W_c Humedad crítica. "
- W_e Humedad de equilibrio. "
- W_p Humedad puntual. "
- x Distancia sobre el eje ox (m).
- y Distancia sobre el eje oy (m).
- z Distancia sobre el eje oz (m).
- L Semiespesor del cuerpo geométrico sometido a secado (m).

BIBLIOGRAFIA

- AOAC (1970). *Official Methods of Analysis*. (11th ed.). Pág. 876, 45.031.
- BOLIN, H. R. y SALUNKHE, D. K. (1982). "Food dehydration by solar energy." *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 16, 327-354.
- CARBONELL, J. V., PINAGA, F., MIQUEL, J. J. y PEÑA, J. L. (1981). "Deshidratación de alimentos por energía solar. I. Funcionamiento de un secadero con almacenamiento de energía en lecho adsorbente de humedad y selección de sustancias adsorbentes." *Rev. Agroquím. Tecnol. Aliment.*, 21(3), 395-410.
- FAO (1976). "Energía para la agricultura en los

- países en desarrollo." *Boletín Mensual de Economía y Estadística Agrícolas*, 25(2), 1-8.
- FLINK, J. M. (1977). "Energy analysis in dehydration processes." *Food Technol.*, 31(3), 77-84.
- JASON, A. C. (1958). "A study of evaporation and diffusion processes in the drying of fish muscle." En *Fundamental aspects of the dehydration of foodstuffs*. 103-135. Soc. Chem. Ind. Londres.
- MADARRO, A. (1983). Comunicación interna.
- MADARRO, A., PINAGA, F., CARBONELL, J. V. y PEÑA, J. L. (1981). "Deshidratación de frutas y hortalizas con aire ambiente. I. Ensayos exploratorios con zanahorias." *Rev. Agroquím. Tecnol. Aliment.*, 21(4), 525-533.
- MAZZA, G. y LE MAGUER, M. (1978). "Water sorption properties of yellow globe onion." *Can. Inst. Food Sci. Technol.*, 11(4), 183-188.
- MITCHELL, T. J. y POTTS, C. S. (1958). "Through-circulation drying of vegetables. III. Carrots." *J. Sci. Food Agric.*, 9, 93-98.
- MOREY, R. V., CLGUD, H. A., GUSTAFSON, R. J. y PETERSEN, D. W. (1979). "Management of ambient air drying system." *Transactions of the ASAE*, 22, 1.418-1.425.
- PERRY, J. H. y CHILTON, C. H. (1973). *Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill Book Co., Nueva York.
- SARAVACOS, G. D. y CHARM, S. E. (1962). "A study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration." *Food Technol.*, 16(1), 78-81.
- SINGH, R. P. (1978). "Energy accounting in food process operations." *Food Technol.*, 32(4), 40-44, 46.
- VAN ARSDEL, W. B. y COPLEY, M. J. (1964). *Food dehydration. Vol. II. Products and Technology*. The Avi Pub. Co., Inc. Westport, Co. (EE.UU.).
- VON LOESECKE, H. W. (1955). *Drying and dehydration of foods*. Reinhold Pub. Co., Nueva York.