

MODELO MATEMATICO SEMI-EMPIRICO CINÉTICA DE SECADO DE TRIGO (*Triticum aestivum*)

Vázquez Chávez L^{a,*}, Vizcarra Mendoza MG^b y Villagómez Moreno A^a

Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. San Rafael Atlixco No 186 Col.Vicentina Iztapalapa México D.F. 09340.
^aDepto de Biotecnología, ^bDepto de Ing. de Procesos e Hidráulica, *lvch@xanum.uam.mx

RESUMEN:

Se hace un análisis de las curvas de secado de 2 variedades de trigo, una de textura dura y gluten fuerte y otra de textura suave y gluten débil, con el fin de mostrar si existe relación entre el valor de la energía de activación del proceso de secado y la naturaleza interna del grano. Las curvas de secado para cada variedad de trigo, fueron obtenidas en un secador de lecho fluidizado, operado por lotes, a diferentes temperaturas (40, 60, 70, 80 y 100 °C) y 2 niveles de contenido inicial de humedad (15 y 20 % b.s.). Para el análisis de estas curvas, se propone un modelo matemático semi-empírico lineal de secado del trigo, análogo a una cinética de reacción de primer orden, y los valores de la constante de secado en función de la temperatura, son tratados de acuerdo a una ley exponencial del tipo Arrhenius, donde se calculan valores de la energía de activación del proceso de secado. Se encontró que no hay una influencia definida de la variedad de trigo sobre el valor de la energía de activación, pero en cambio, si puede notarse a que ésta disminuye con el aumento del contenido inicial de humedad.

ABSTRACT:

An analysis of the drying curves 2 varieties of wheat, hard texture and a strong gluten and other soft texture and weak gluten, in order to show the correlation between the value of the activation energy of the drying process and the internal nature of the grain. Drying curves for each wheat variety, were obtained on a fluidized bed drier, operated batch at different temperatures (40, 60, 70, 80 and 100 ° C) and two levels of initial moisture content (15 and 20 % bs). For analysis of these curves, a linear semi-empirical mathematical model drying wheat, analogous to reaction kinetics of the first order, and the values of the constant drying in function of temperature, are treated according to Arrhenius law of exponential type, where values of the activation energy of the drying process are calculated. It was found that there is no definite influence of these wheat varieties of the value of the activation energy, but instead if it can be noticed that this decreases with increasing initial moisture content

Palabras clave:

Cinética de secado, trigo, modelo semi-empírico

Keyword:

Drying kinetics, wheat, semi-empirical model

Área: Cereales

INTRODUCCION

El trigo, puede ser cosechado con niveles de humedad que varían entre 10 y 40% en base húmeda (Contreras y col., 1993). No obstante, es necesario deshidratarlo para poder conservarlo durante el almacenamiento (Ghaly y Taylor, 1982; Giner y Calvelo, 1987). Dependiendo del destino que se le dará a la semilla, los tratamientos térmicos son sumamente críticos, sobre todo si se quiere conservar su poder germinativo. En este sentido, el secado en lecho fluidizado presenta una alternativa atractiva, debido a que los granos son

tratados uniformemente evitando las zonas calientes que suelen presentarse cuando son deshidratados en camas fijas (Kirleis y col., 1982; Pomeranz, 1988). Diferentes investigadores (Baker-Arkema y col., 1978; Sutherland, 1984) han destacado la importancia tanto de la textura del grano como de las propiedades del gluten, durante el secado, por lo que en este trabajo se analiza el comportamiento de 2 variedades comerciales de trigo, con textura y gluten diferentes: textura dura, gluten fuerte y textura suave, gluten débil, que son ampliamente usadas en la industria molinera para producir harinas panificables, se rehidratan las muestras de trigo hasta alcanzar contenidos de humedad del 15 y 20% en base seca y se evalúa el efecto de 5 niveles de temperatura sobre la cinética de secado, calculando los niveles de energía de activación en cada corrida.

MATERIALES Y METODOS

Se trabajó con dos variedades de trigo de uso comercial trigo textura suave y gluten débil, de la región del Bajío, Guanajuato y la otra, de un trigo duro de gluten fuerte, de la región de Sonora. Se tomaron muestras representativas de 1kg de cada variedad de trigo, se limpiaron y se les determinó el contenido de humedad (método 44-15 AACC 1986). Las humedades iniciales se determinaron utilizando la ecuación empírica de secado de trigo propuesta por Tosi et al. (1984), Debido a que las muestras de trigo tenían contenidos de humedad entre 11 y 13%, fue necesario calcular la cantidad de agua necesaria para llevarlas a contenidos de iniciales de humedad del 15 y 20% respectivamente. El agua para rehumectar los granos se adicionaba por medio de un pulverizador y el conjunto se mantuvo a 25° C durante 48 horas con agitación periódica; el tiempo de estancia se determinó en ensayos preliminares, estos mostraron que las diferencias entre las curvas de secado de granos rehumectados durante 48 horas y con humedad natural no eran estadísticamente significativas.

Caracterización física del trigo. El diámetro promedio d_p , se obtuvo colocando una muestra de trigo de 0.15kg en un juego de tamices apilados desde el de mayor abertura (malla 4) hasta el de menor tamaño (malla 20). El conjunto de tamices se agitó por espacio de 10 minutos. Al final, se pesaron las cantidades retenidas en cada tamiz y se aplicó la fórmula 1:

$$d_p = \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i} \right)^{-1} \quad (1)$$

donde x_i representa la fracción en peso de trigo retenido en el tamiz i y d_i representa el promedio aritmético correspondiente a las aberturas de los tamices, superior e inferior; esta prueba se realizó por triplicado (Tosi y col., 1988; Mendoza y col., 1985; Kunii y Levenspiel, 1991). La esfericidad se determinó aplicando la fórmula 2 a volumen del sólido constante (Kunii y Levenspiel, 1991)

$$\phi_s = \left(\frac{\text{superficie de la esfera}}{\text{superficie de la partícula}} \right) \quad (2)$$

Las densidades se determinan considerando un volumen de referencia (probeta de 250 ml), se introduce el trigo hasta llenarlo completamente. La densidad empacada se calculo, dividiendo la masa de sólidos introducida, entre el volumen de referencia. Para el cálculo de la densidad aparente, se tomo el mismo experimento anterior y con ayuda de una bureta, se

midió la cantidad de líquido que se puede introducir, cuidando de no rebasar el límite del volumen de referencia. Entonces, la masa de sólidos se divide por el volumen de la probeta corregido por el volumen de líquido introducido (Aragón y Ocaña, 1988; Mendoza y col., 1985) Para calcular la fracción de espacios vacíos del empaque, se aplicó la fórmula 3 que relaciona los inversos de las densidades empacada y aparente del sólido:

$$\varepsilon_e = \frac{\rho_e^{-1} - \rho_a^{-1}}{\rho_e^{-1}} \quad (3)$$

Equipo experimental.- Para obtener las curvas de secado de los granos, se usó un secador de lecho fluidizado de laboratorio

Curvas de secado.- Una vez alcanzadas las condiciones de operación estables (10 minutos aproximadamente) al gasto y temperatura de entrada de aire de secado, el equipo se cargó con 1kg de muestra de trigo húmedo, para proceder así a obtener las curvas de secado. Cada corrida, para cada variedad, humedad y temperatura, se realizó por duplicado. Durante el proceso de secado se tomaron muestras por triplicado de entre 0.001 y 0.002kg en frascos puestos previamente a peso constante, a partir del tiempo cero y durante cada 10 minutos, para cada tiempo previamente establecido, según el bloque experimental. La determinación de la pérdida de humedad de los granos se calculó en base seca midiendo la pérdida de humedad de los granos por diferencia de peso secando a 110 °C en estufa por 24 horas. En base a lo anterior, se estableció el diseño experimental que se presenta en la tabla I.

Tabla I.- Parámetros estudiados en el secado de trigo.

Variedad	Trigo duro gluten fuerte	Trigo suave gluten débil
% Humedad inicial (b.s.)	15, 20	15, 20
Temperatura (°C)	40, 60, 70, 80,100	40, 60, 70, 80,100

Establecimiento del modelo matemático.- Durante el periodo de secado decreciente, la velocidad de secado depende de las condiciones de humedad interna y de las propiedades de transporte del agua en el seno del material o bien a través de la capa periférica. Esto naturalmente dificulta la elaboración de modelos matemáticos que tomen en cuenta tales parámetros. Debido a esta dificultad, en este estudio se propone un modelo semi-empírico (análogo a modelos de cinética química), que supone que durante este periodo, existe una correlación entre la velocidad de secado y el contenido de humedad promedio del producto: $dX/dt = f(X)$. Esta correlación puede simplificarse aún más, proponiendo una relación lineal entre la rapidez de secado y el contenido de humedad libre en el sólido, tal que:

$$\frac{dX}{dt} = k(X - X^*) \quad (4)$$

En esta ecuación 4, X^* es el contenido promedio de humedad en equilibrio con el medio ambiente y k , puede considerarse un coeficiente promedio de transferencia de masa.

Ecuación de Arrhenius.- La velocidad de secado depende fuertemente de la temperatura del aire, lo cual permite proponer una dependencia de k con este parámetro del tipo ley Arrhenius, de acuerdo a la ecuación 5:

$$k = k_0 \text{EXP}\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

Donde E puede considerarse la energía de activación o barrera energética que las moléculas de agua deben vencer para difundirse a través del material que las contiene.

RESULTADOS Y DISCUSION

En las tablas II y III se muestran los resultados obtenidos que corresponden con la caracterización física e hidrodinámica de los granos de trigo.

Tabla II.- Propiedades físicas del trigo

Variedad	$d_p(m)$	$\phi(-)$	$\rho_e(kg/m^3)$	$\rho_a(kg/m^3)$
Trigo gluten fuerte	0.004	0.83	794	1323
Trigo gluten debil	0.0038	0.80	774	1315

Tabla 3.- Valores hidrodinámicos del trigo

$\epsilon_{mf}(-)$	$L_{mf}(m)$	$U_{mf}(m/s)$	$U_f(m/s)$	$U_t(m/s)$
0.45	0.10	1.3	1.5	7.68

Del análisis de estos resultados no fue posible establecer diferencias significativas entre los parámetros físicos e hidrodinámicos de ambas variedades de trigo.

Cinética de secado de las dos variedades de trigo.- En las figuras 2 y 3 se presentan, respectivamente, las curvas de secado de las 2 variedades de trigo estudiadas.

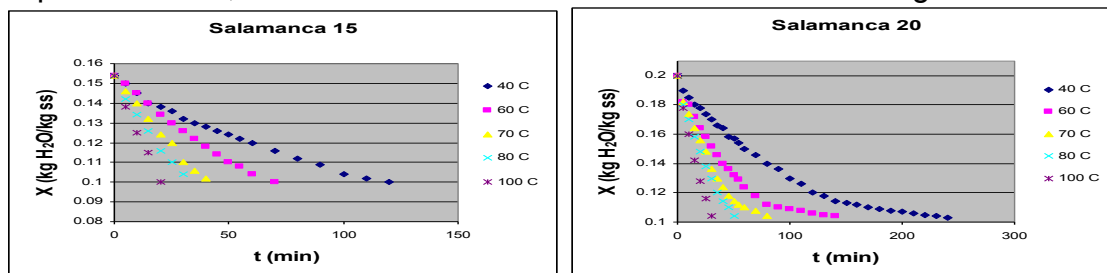


Figura 2.- Curvas de secado de la variedad trigo suave gluten débil a 2 niveles de contenido de humedad (15 y 20% b.s.) y diferentes temperaturas.

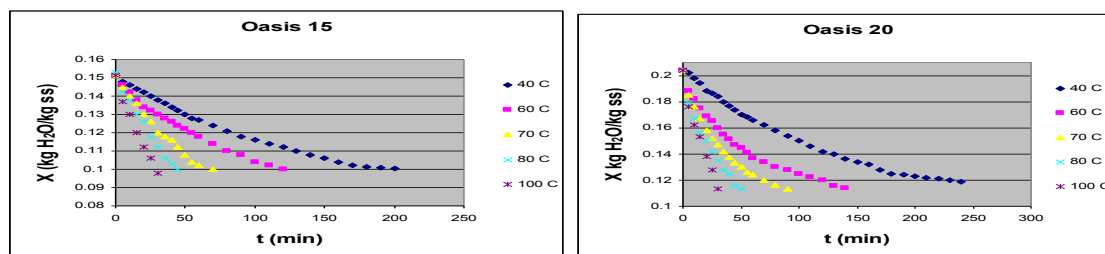


Figura 3.- Curvas de secado de la variedad trigo duro gluten fuerte a 2 niveles de contenido de humedad (15 y 20% b.s.) y diferentes temperaturas.

Se puede observar que conforme aumenta la temperatura, se manifiesta un aumento en la rapidez de secado y a niveles bajos de temperatura, 40 a 70 °C, a tiempos prolongados de secado, se presenta al menos, un periodo de secado decreciente más. Esto no sucede en el caso de las curvas correspondientes a los niveles de temperatura de 80 y 100 °C. Este comportamiento se presenta independientemente de la variedad de trigo y es más manifiesto

al contenido inicial de humedad del 20%. De acuerdo al modelo propuesto en la ecuación 4, se presenta la forma integrada de la ecuación cinética, que corresponde a la expresión mostrada en la ecuación 6:

$$\ln(X_0 / X) = kt$$

Con el fin de homogenizar el análisis y hacer comparativos los resultados, se estableció el criterio de considerar, para todos los casos, las primeras etapas del secado, respetando al máximo la mas alta correlación ($r^2 > 0.99$) alcanzable. Del modelo integrado, resulta importante señalar que la pendiente de las líneas obtenidas en estas figuras, representa el valor de la constante de secado. De esta forma se obtienen, para cada variedad y contenido de humedad inicial, los valores de k en función de la temperatura. Estos valores son los que se presentan en la tabla 3. También es necesario señalar, que por ser tan bajos los contenidos de humedad de equilibrio, estos fueron despreciables.

Tabla III.- valores de la constante de velocidad de secado, a diferentes temperaturas, para las dos variedades de trigo estudiadas.

T (°C)	k (min ⁻¹)			
	S - 15	S - 20	O - 15	O - 20
40	0.0036	0.0039	0.0026	0.0036
60	0.0064	0.0076	0.0035	0.0068
70	0.0106	0.0112	0.0065	0.0100
80	0.0131	0.0129	0.0096	0.0110
100	0.0209	0.0217	0.0140	0.0184

Asociando la constante, a la relación lineal que plantea la ecuación de Arrhenius de acuerdo la ecuación 5, se obtienen las energías de activación para cada variedad y nivel de contenido de humedad, tal y como se muestra en la tabla IV. De estos resultados se puede ver que existe una ligera tendencia a que la energía de activación disminuya con el aumento en el contenido inicial de humedad, lo cual indica que el agua, tiende a salir más fácilmente cuando hay mas humedad en la estructura interna de los granos. Tal comportamiento se presenta indistintamente de la variedad de trigo

Tabla IV.- Valores de la energía de activación para las dos variedades de trigo estudiadas y dos niveles de contenido de humedad inicial.

	S - 15	S - 20	O - 15	O - 20
E (KJ/mol K)	29.155	27.652	29.318	26.182

También se puede observar que prácticamente no hay cambios en los valores de la energía de activación al compararlas con las diferentes variedades al mismo contenido de humedad inicial, lo cual indica que la estructura interna (gluten y textura) no influyen en la cinética de secado. Esto último podría explicarse en el sentido de que los granos fueron humectados siguiendo el mismo procedimiento, por lo que el agua pudo haberse alojado de manera similar en ambas variedades.

CONCLUSIÓN

Se demuestra que la temperatura de operación del secador, afecta directamente la cinética de secado y que el contenido inicial de humedad, afecta ligeramente la cinética de secado, al

disminuir la energía de activación cuando aumenta el contenido inicial de humedad, lo cual indica que a mayor contenido inicial de humedad, el agua sale más fácilmente del grano durante el proceso de secado. En cambio, la naturaleza interna de los granos de estas variedades de trigo, no influye apreciablemente en la cinética de secado.

BIBLIOGRAFÍA

- Aragón M. J. y Ocaña A. *Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment.*, 1988, 28 (3), 357-369
- Bakker-Arkema, F. W., Brooker, R. C. y Lerew, L. E.. Cereal grain drying. Ch.1. In. *Advances of Cereal Science and Technology.*, 1978, Vol II, 219-328.
- Contreras, R. M., Zarate V. J., Santoya C. H y Pérez B. R. Perspectivas de la producción de trigo en la región del sur de Sonora frente al Tratado Trilateral de Libre Comercio, Universidad Autónoma Chapingo Centro de Investigaciones Económica, México, 1993, 24-25.
- Fellow, P. *Tecnología del Procesamiento de los Alimentos*, Ed. Acribia: Zaragoza, España, 1994, 287-323.
- Ghaly, T. F., y Taylor, P. A. *J. Agric. Eng. Res.* 1982, 27:227-234
- Giner, A. S. y Calvelo A. *J. Food Sci.* 1987, 52(5):1358-1363
- Kunii, D. y Levenspiel O. *Fluidization Engineering*. Butterworth-Heinennon 2ª Ed. Series in Chem. Eng. USA, 1991, 61-94
- Mendoza, A. M., Vernon, E. J. y Vizcarra, G. M. *Tecnol. Aliment. (Mex)*, 1985, 20(2):20-26
- Pomeranz, Y. *Wheat Chemistry and Technology* .Vol I and II. 3rd Ed. 1988.
- Tosi, E., Masciarelli, E. Tapiz, L. y Ciappini *Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment.* 1988, 28(2) 221-232