

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y DE LA CINÉTICA DE SECADO DE GRANOS DE MAIZ COLORADO DURO

STUDY ON PHYSICAL PROPERTIES AND THE KINETICS DRYING OF HARD-RED CORN GRAINS

Matías R. Ordóñez^{1,2}, María C. Gely^{1*}, Ana M. Pagano^{1*}

(1) Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN), Facultad de Ingeniería, Núcleo TECSE (Tecnología de Semillas y Alimentos), Av. del Valle 5737, (7400) Olavarría - Argentina

(2) CICPBA (Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires)

*autor de contacto (e-mail: apagano@fio.unicen.edu.ar, cgely@fio.unicen.edu.ar)

Recibido: 30/05/2011 - Evaluado: 20/07/2011 - Aceptado: 16/08/2011

RESUMEN

Se estudió el efecto de la humedad sobre propiedades físicas de granos de maíz Colorado Duro en el rango 17-35% base seca, y la cinética de secado a temperaturas entre 30-90°C y a velocidad de 0.43 m/s. El contenido de humedad tuvo efecto significativo sobre la longitud (12.059×10^{-3} - 12.91×10^{-3} m), diámetro geométrico (7.8×10^{-3} - 8.281×10^{-3} m), diámetro equivalente (8.18×10^{-3} - 8.63×10^{-3} m), peso de mil granos (363.6-421.9 g), ángulo de reposo (10.11 - 24.66°), y densidades aparente (0.801-0.684 g/mL) y real (1.339-1.170 g/mL); pero el ancho, espesor, porosidad y esfericidad no se vieron significativamente afectados. El secado ocurrió en el período de velocidad decreciente, siendo el tiempo de secado y la temperatura las variables significativas sobre la humedad del grano. Los modelos de Page, ecuación difusiva de "tiempos cortos" y una modificación introducida a éste último resultaron adecuados ($R^2 > 0.99$) para describir los datos. Los coeficientes de difusión de agua estuvieron entre 1.907×10^{-11} y 6.495×10^{-11} m²/s, y la energía de activación fue 17.74 kJ/mol.

ABSTRACT

The effect of moisture content on physical properties of Hard Red Corn grains in the range 17-35% dry basis, and the drying kinetics at temperatures between 30-90°C and velocity of 0.43 m/s was studied. Moisture content had significant effect on length (12.059×10^{-3} - 12.91×10^{-3} m), geometric diameter (7.8×10^{-3} - 8.281×10^{-3} m), equivalent diameter (8.18×10^{-3} - 8.63×10^{-3} m), weight of 1000 seeds (363.6-421.9 g), angle of repose (10.11 - 24.66°), apparent density (0.801-0.684 g/mL) and real density (1.339-1.170 g/mL); while width, thickness, porosity and sphericity were not significantly affected. The drying occurred in the falling rate period, being drying time and temperature the significant variables on the grain moisture content. The models of Page, Diffusive equation of "short-times" and a modification proposed to this last model were efficient ($R^2 > 0.99$) to describe the experimental data. The coefficients of water diffusion were between 1.907×10^{-11} and 6.495×10^{-11} m²/s, and the activation energy was 17.74 kJ/mol.

Palabras clave: secado; propiedades físicas; coeficiente de difusión; maíz colorado duro

Keywords: drying; physical properties; coefficient of diffusion; hard red corn

INTRODUCCIÓN

La producción estimada de maíz duro colorado en la Argentina es de un millón de toneladas, equivalente a un 10% de la producción total nacional de maíz, siendo materia prima de la industria alimentaria para la fabricación de "corn flakes", debido fundamentalmente a la predominancia del endosperma córneo frente al harinoso. En conjunto, las moliendas húmeda y seca utilizan el 13% de la producción nacional de maíz. En la industria de la molienda seca cobran importancia la dureza del endosperma del grano de maíz y la relación de tamaños de partículas que resulta de la molienda del grano. La dureza es una propiedad intrínseca del grano vinculada a la presencia de endosperma córneo y está asociada a su mayor densidad y vitrosidad (Cirilo, 2002). Esa mayor vitrosidad y densidad dependerían de un fuerte ligamento entre el almidón y las proteínas (esencialmente las zeínas ricas en aminoácidos azufrados) en la fracción córnea del endosperma (Cirilo, 2002).

Las características físicas de los granos de maíz dependen de la variedad (genotipo) y de las condiciones ambientales (humedad y temperatura) durante su desarrollo. El conocimiento de las propiedades físicas, químicas y de transporte de los granos, y su relación con el contenido de humedad son indispensables para el adecuado diseño del equipamiento para el manejo, transporte y acondicionamiento de los granos (Kachru *et al.*, 1994). Las propiedades gravimétricas son indispensables para diseñar los equipamientos de aireación, secado (Brooker *et al.*, 1992; Crozza & Pagano, 1998; Gely & Santalla, 2000; Pagano & Crozza, 2000; Pagano & Crozza, 2001; Canelli *et al.*, 2004), almacenamiento (Brooker *et al.*, 1992) y transporte de granos (McCabe *et al.*, 1991). La densidad aparente determina la capacidad de almacenamiento y de sistemas de transporte, mientras que la densidad real es útil para equipamientos de separación. La porosidad determina la pérdida de carga que debe vencer el aire en procesos tales como secado y aireación (Yanucci, 2002).

Las propiedades friccionales como el ángulo de reposo son propiedades relacionadas con el diseño de diferentes estructuras de almacenamiento y transporte.

Si bien se han encontrado en la literatura trabajos relacionados con el estudio de las propiedades físicas de maíz dulce (Coskun *et al.*, 2006), no se encuentran estudios relacionados con la determinación de las propiedades físicas de granos de maíz tipo duro colorado Flint, y su relación con el contenido de humedad, adecuados al diseño del equipamiento para el manejo, transporte y acondicionamiento de los granos.

En la actualidad, los contratos de producción de maíz colorado duro exigen cosechar el grano con bajo contenido de humedad (15% o menor), favoreciendo el grado de dureza alcanzable al permitir el desecamiento lento del endosperma en condiciones de campo. No obstante, la permanencia de las espigas en el campo por largo tiempo favorece la proliferación de hongos productores de micotoxinas. El anticipo de la cosecha reduce este riesgo, pero limita la calidad del grano. La cosecha con elevada humedad en el grano obliga al secado artificial hasta la humedad de seguridad (14.5% b.h., base húmeda) para asegurar la calidad durante el almacenamiento (Cirilo, 2002).

Los modelos de secado en capa delgada utilizados para describir la cinética de secado de los granos individuales (Parti, 1993), es decir, los cambios de contenido de humedad y temperatura del material sometido a condiciones de aire de secado constante, son una parte constitutiva fundamental de los programas de simulación de secadoras. Estos modelos representan un avance para pronosticar el comportamiento del proceso de secado, permitiendo de forma rápida explorar el efecto de diferentes condiciones operativas, además de analizar variantes operacionales a favor de mejores diseños, con menor consumo y menor daño a la calidad de los granos.

Existe poca información en la literatura referente a la influencia de la temperatura de secado y del contenido de humedad inicial del grano sobre la cinética de secado para granos de maíz colorado duro. Haros *et al.* (2003), estudiaron el efecto de la temperatura de secado sobre la cinética de secado para granos de maíz Flint y dentado en un rango entre 70 y 110°C para humedades iniciales en base seca de 27.7% b.s. (Flint) y 24.5 %

b.s. (dentado), observando una disminución en la velocidad de pérdida de agua al incrementarse la temperatura de secado, más acentuada en el Flint que en el maíz dentado. Ross y White (1972), estudiaron las características de secado de maíz blanco y maíz amarillo para temperaturas entre 100°F (37.78°C) y 200°F (93.33°C) y contenido de humedad inicial entre 25 b.s. y 43% b.s., verificándose diferencias significativas en las características de secado de ambas variedades de maíz.

Considerando estos antecedentes, en el presente trabajo se propone evaluar la influencia del contenido de humedad sobre las propiedades físicas de granos de maíz Colorado Duro *Hibrido NT 320* en el rango de 14.61% b.h. a 25.62% b.h., y estudiar la cinética de secado de los granos individuales en el rango de temperatura de aire de 30°C a 90°C, para una humedad inicial de 18.59% b.h. y una velocidad del flujo de aire constante de 0.43 m/s.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras

Se utilizaron granos de maíz Colorado Duro *Hibrido NT 320* producidos por el Semillero Don Mario, Chacabuco (34°38'6"S, 60°28'20"W), Provincia de Buenos Aires, Argentina. El contenido de humedad de cosecha de los granos en base húmeda fue 22% b.h., siendo secados en la planta de acopio mediante aireación a temperatura ambiente hasta alcanzar un contenido de humedad 11.4% b.h.

Una vez recepcionada la muestra de estudio, se dividió en sub-muestras que fueron acondicionadas a diferentes contenidos de humedad mediante humidificación. Se consideraron cinco niveles de humedad abarcando el rango comprendido entre la humedad máxima típica de cosecha (34.44% b.s.) y la humedad de seguridad (17.11% b.s.) (CABCUE, 2011). Los granos de maíz se pusieron en contacto con la cantidad exacta de agua destilada necesaria para alcanzar el contenido de humedad deseada. Las sub-muestras humectadas fueron almacenadas en recipientes herméticos a 4°C durante 72 h a fin de permitir la absorción y homogeneización de la humedad en el interior de los granos (Ruiz *et al.*, 2008). Antes de cada ensayo, las cantidades requeridas de semillas acondicionadas fueron sacadas del ambiente refrigerado a fin de equilibrar su temperatura con la temperatura ambiente (Desphande *et al.*, 1993).

El contenido de humedad se determinó por triplicado en estufa de aire forzado según el método de ASAE (ASAE, 1999).

Ángulo de reposo (AR)

El ángulo dinámico de reposo (AR) se determinó para cada contenido de humedad utilizando una caja de madera de 0.30 m x 0.13 m con un panel frontal removible. La caja se llenó completamente con las semillas de maíz, y luego el panel frontal fue removido rápidamente permitiendo que las semillas fluyeran asumiendo una pendiente natural (Dutta *et al.*, 1988). Se realizaron diez determinaciones del AR para cada contenido de humedad.

El ángulo de reposo fue calculado a partir de la medición de la altura vertical y el alcance del desplazamiento de la muestra sobre la base de madera con vetas paralelas al avance del material.

Dimensiones espaciales, tamaño y esfericidad

Para determinar las dimensiones promedio de las semillas, para cada contenido de humedad, se tomaron aleatoriamente 20 semillas y fueron medidas sus tres dimensiones principales, largo (a), ancho (b) y espesor (c), usando un micrómetro digital Mitutoyo con una exactitud de 0.001 mm. El diámetro geométrico medio (D_g) fue calculado como la media geométrica de las tres dimensiones utilizando la siguiente expresión (Mohsenin, 1986; Vilche *et al.*, 2003).

$$D_g = (a b c)^{1/3} \quad (1)$$

En tanto, el diámetro equivalente (D_e) se evaluó a partir del volumen real (V) de una semilla considerando una geometría esférica. El volumen real del grano se determinó por triplicado mediante picnometría líquida con xileno usando un picnómetro tipo Beckman (Modelo 930) de 25 mL a 20°C, pesando en balanza analítica (precisión 0.0001 g) (Kachru *et al.*, 1994; Vilche *et al.*, 2003).

$$D_e = 2 \left(V \frac{3}{4\pi} \right)^{1/3} \quad (2)$$

La esfericidad (ϕ) se determinó como la relación entre el diámetro de una esfera con el mismo volumen de la semilla (D_e) y el diámetro de la menor esfera circunscripta es decir, el mayor diámetro del objeto (a) (Mohsenin, 1986).

$$\phi = \frac{D_e}{a} \quad (3)$$

Propiedades gravimétricas

El peso de 1000 granos (P_{1000}) se determinó pesando 100 granos en balanza electrónica (precisión menor a 0.001 g) y luego extrapolando este peso a 1000 granos (Kachru *et al.*, 1994; Vilche *et al.*, 2003). Se realizaron diez determinaciones experimentales para cada contenido de humedad.

La densidad aparente ($\delta_{aparente}$), definida como la relación entre una masa de granos y el volumen total ocupado por los mismos, se determinó mediante una balanza estándar de peso hectolítrico (Balanza Schopper) de 250 mL de volumen total con pistón para el desplazamiento de aire (Kachru *et al.*, 1994; Vilche *et al.*, 2003). Se realizaron 10 replicados para cada contenido de humedad.

La densidad real (δ_{real}), definida como la relación de la masa de una muestra a su volumen real, se determinó por triplicado evaluando la masa de pequeñas muestras y su volumen mediante picnometría líquida con xileno (picnómetro tipo Beckman, Modelo 930, de 25 mL a 20°C, pesada en balanza analítica de precisión 0.0001 g) (Kachru *et al.*, 1994; Vilche *et al.*, 2003).

La porosidad (ϵ), definida como la fracción de huecos en el lecho de granos, se calculó mediante la Ec. (4) a partir de las densidades real y aparente, evaluadas para cada nivel de contenido de humedad (Gupta & Das, 1997).

$$\epsilon = \left(1 - \frac{\delta_{aparente}}{\delta_{real}} \right) 100 \quad (4)$$

Análisis estadístico

Para cuantificar el efecto del contenido de humedad sobre cada una de las diferentes propiedades estudiadas se empleó la técnica del análisis de la varianza (ANOVA) mediante el programa Systat (Wilkinson, 1990).

Análisis de la Cinética de Secado

La cinética de secado se estudió a partir de los resultados generados por ensayos de secado en capa delgada realizados en un equipo diseñado en la Facultad de Ingeniería (UNCPBA), compuesto por una cámara de secado cilíndrica con una bandeja extraíble de 0.0232 m², un ventilador que impulsa el aire a través de una tubería de 0.043 m de diámetro interno hacia un sistema de calentamiento (Gely & Santalla, 2007). Los ensayos se

realizaron por duplicado empleando tres niveles de temperatura: 30°C, 70°C y 90°C, para un contenido de humedad inicial de 18.59% b.s. y velocidad de aire constante de 0.43 m/s.

Las condiciones de secado se estabilizaron durante 60 min antes de la realización de cada experiencia disponiéndose muestras de aproximadamente 60 g de maíz en una capa delgada sobre la bandeja del equipo. Durante el proceso de secado, a intervalos regulares se realizaron periódicas pesadas en una balanza electrónica (Ohaus modelo Pioneer TM, capacidad 1510 g, sensibilidad 0.01 g) para cuantificar la pérdida de peso hasta obtener una humedad adimensional de 0.5. Las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire se registraron mediante un psicrómetro aspirado (Papst modelo ZP 611). Se utilizó la carta psicrométrica electrónica Akton Psychrometric Chart Version (Akton Associates Incorporated, 1996) para determinar las propiedades del aire de secado.

La cinética de secado fue estudiada ajustando los datos experimentales a los modelos de Lewis (Ec. 6) (Tiris *et al.*, 1994; Ayensu, 1997; Liu & Bakker-Arkema, 1997), Page (Ec. 7) (Sun & Woods, 1994; Karathanos & Belessiotis, 1999; Park *et al.*, 2002; Doymaz, 2004) y Difusivo de tiempos cortos para geometría esférica (Ec. 8) válido para una humedad adimensional entre 1 y 0.2 (Becker, 1959; Gely & Santalla, 2007). Los parámetros fueron calculados mediante el paquete Systat (Wilkinson, 1990).

$$MR = \exp(-k_L t) \quad (5)$$

$$MR = \exp(-k_p t^n) \quad (6)$$

$$MR = 1 - 2/\sqrt{\pi} (6/D) \sqrt{D_{ef} t} + 0.331 (6/D)^2 D_{ef} t \quad (7)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del efecto del contenido de humedad sobre las propiedades físicas de los granos

Los resultados experimentales del ángulo de reposo mostraron un incremento de un 143% desde un valor inicial de 10.11° (17.11% b.s.) hasta un valor de 24.66° (34.44% b.s.), inferiores a los 35° indicados por Brooker *et al.* (1992), para granos de maíz. El análisis de la varianza evidenció un efecto significativo del contenido de humedad sobre el ángulo de reposo tanto para un 99% como para un 95% de confianza. El valor F obtenido para analizar el efecto del contenido de humedad fue $F=933.37$ ($F_{4;45;0.99}=3.77$). El ángulo de reposo, coincidentemente con información publicada por otros autores (Dutta *et al.*, 1988; Joshi *et al.*, 1993; Gupta & Das, 1997; Vilche *et al.*, 2003), mostró una tendencia creciente con el contenido de humedad que pudo expresarse a través de la siguiente relación lineal (Ec. 8) con un coeficiente de determinación R^2 de 0.99.

$$AR = 0.855M - 4.577 \quad (8)$$

Los valores experimentales del AR para esta variedad de maíz resultaron inferiores a los valores reportados para girasol (Gupta & Das, 1997), semillas de calabaza (Joshi *et al.*, 1993), quinoa (Vilche *et al.*, 2003) y arvejas (Dutta *et al.*, 1988) (Fig. 1). Esta tendencia podría deberse a que la superficie del maíz Flint es muy lisa favoreciendo el deslizamiento de las semillas unas sobre otras.

Dimensiones Espaciales, Tamaño y Esfericidad

Las dimensiones características determinadas para la variedad estudiada de maíz colorado duro correspondientes al largo, ancho y espesor variaron respectivamente entre 12.059×10^{-3} y 12.916×10^{-3} m, 8.306×10^{-3} y 8.583×10^{-3} m, y 5.156×10^{-3} y 5.137×10^{-3} m al cambiar el contenido de humedad de 17.11% b.s. a 34.44% b.s. (Tabla 1). Los resultados experimentales mostraron un efecto significativo del contenido de

humedad sobre la longitud con un 99% de confianza, siendo $F=16.09$ ($F_{4;95;0.99}=3.52$), no observándose efecto significativo del contenido de humedad sobre el ancho o el espesor del grano. A partir de estos valores experimentales se determinó el diámetro medio geométrico (D_g) para cada contenido de humedad (Tabla 2).

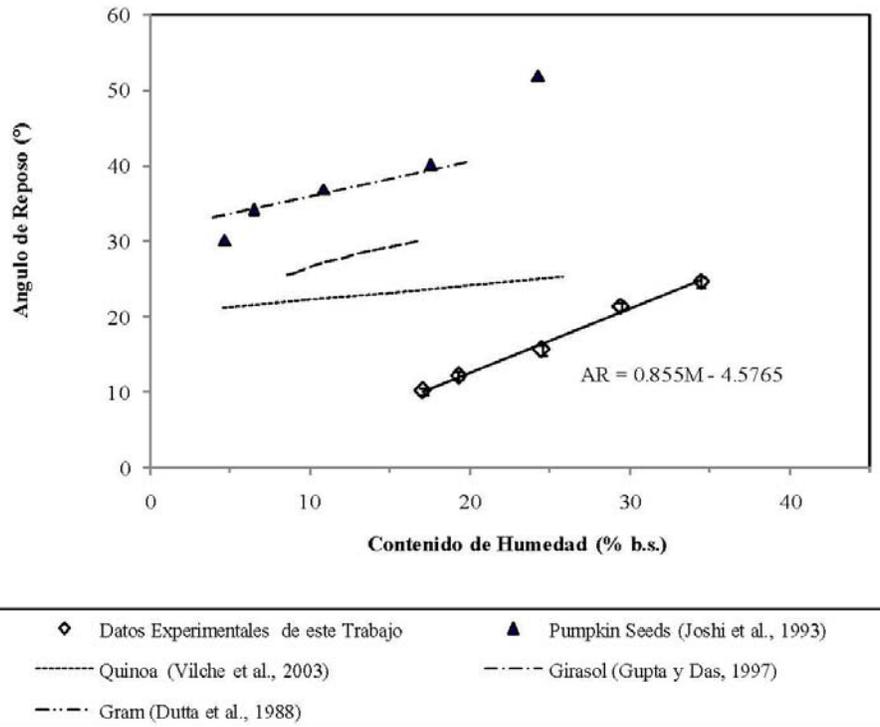


Fig. 1: Efecto del contenido de humedad sobre el ángulo de reposo (AR) para granos de maíz Colorado Duro Híbrido NT 320.

Tabla 1: Largo, ancho y espesor de semillas maíz Colorado Duro Híbrido NT 320 en el rango de contenido de humedad 17.11% b.s.–34.44% b.s.

Contenido de Humedad (% b.s.)	Longitud* (m)	Ancho* (m)	Espesor* (m)
17.11	0.012059 (4.35 x 10 ⁻⁴)	0.00830555 (5.26 x 10 ⁻⁴)	0.004820 (2.76 x 10 ⁻⁴)
19.29	0.011706 (6.33 x 10 ⁻⁴)	0.00823355 (6.11 x 10 ⁻⁴)	0.005156 (5.78 x 10 ⁻⁴)
24.52	0.012413 (4.56 x 10 ⁻⁴)	0.00835255 (6.15 x 10 ⁻⁴)	0.005063 (3.99 x 10 ⁻⁴)
29.48	0.012369 (4.95 x 10 ⁻⁴)	0.00862565 (4.12 x 10 ⁻⁴)	0.005094 (3.24 x 10 ⁻⁴)
34.44	0.012916 (4.59 x 10 ⁻⁴)	0.00858305 (5.29 x 10 ⁻⁴)	0.005137 (3.39 x 10 ⁻⁴)

*valores entre paréntesis representan el desvío estándar.

El análisis ANOVA indicó efecto significativo del contenido de humedad sobre el diámetro medio geométrico para un 99% de confianza con $F=13.176$ ($F_{(4;95;0.99)} = 3.523$), resultado que se correspondió con una tendencia lineal creciente de D_g con el contenido de humedad M (% b.s.) (Ec. 9) ($R^2=0.94$). Los resultados experimentales presentaron valores de diámetro medio geométrico superiores –aunque con la misma tendencia creciente con la humedad- a los del grano de soja (Deshpande *et al.*, 1993) y quinoa (Vilche *et al.*, 2003) (Fig. 2).

$$D_g = 3 \times 10^{-5} M + 0.0074 \quad (9)$$

Tabla 2: Diámetro geométrico, diámetro equivalente y esfericidad para semillas maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320* en el rango de contenido de humedad 17.11% b.s.–34.44% b.s.

Contenido de Humedad (% b.s.)	Diámetro geométrico* (m)	Diámetro equivalente* (m)	Esfericidad
17.11	0.007835 (1.32 x 10 ⁻⁴)	0.00818 (1.02 x 10 ⁻⁴)	0.679
19.29	0.007901 (2.89 x 10 ⁻⁴)	0.00824 (7.21 x 10 ⁻⁵)	0.704
24.52	0.008051 (1.38 x 10 ⁻⁴)	0.00863 (1.32 x 10 ⁻⁴)	0.695
29.48	0.008154 (2.43 x 10 ⁻⁴)	0.00863 (8.44 x 10 ⁻⁵)	0.698
34.44	0.008281 (2.69 x 10 ⁻⁴)	0.008526 (1.09 x 10 ⁻⁴)	0.660

*valores entre paréntesis representan el desvío estándar.

A partir de los volúmenes de granos individuales determinados por picnometría líquida con xileno y considerando geometría esférica (Ec. 2) se determinaron los valores de diámetro equivalente (D_e) mostrando valores comprendidos entre 8.18×10^{-3} m (17.11% b.s.) y 8.63×10^{-3} m (24.52% b.s.) con un desvío estándar inferior a 0.13×10^{-3} m (Tabla 2).

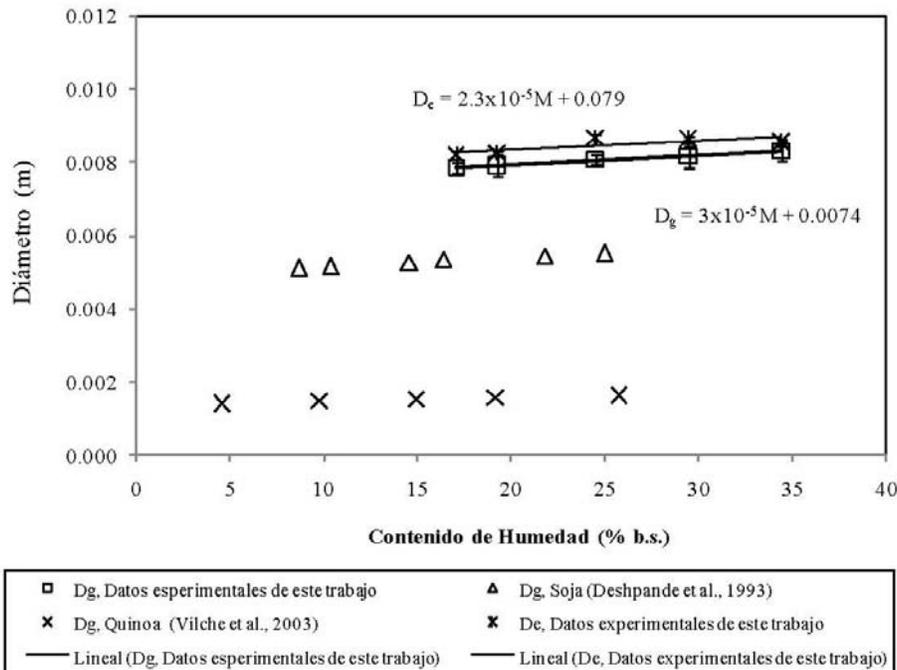


Fig 2: Efecto del contenido de humedad sobre el diámetro medio geométrico (D_g) y diámetro equivalente (D_e) para granos de maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320*.

El análisis ANOVA indicó un efecto significativo del contenido de humedad sobre el D_e con $F=22.03$ ($F_{(4;20;0.99)} = 4.43$). Se pudo verificar para el diámetro equivalente una correlación lineal positiva (Ec. 10) con el contenido de humedad, con un error estándar de la estimación (SE) de 1.56×10^{-4} m y un módulo de la desviación porcentual relativa de un 1.42%, inferior al 5% sugerido generalmente como aceptable (Tolaba *et al.*, 2004).

$$D_e = 2.3 \times 10^{-5} M + 0.0079 \quad (10)$$

Los valores experimentales de esfericidad (Tabla 2) presentaron un valor promedio de 0.687 ± 0.018 , resultando estos valores superiores a los informados por Coskun *et al.* (2006) para granos de para maíz dulce (11.54–19.74% b.s.) considerando geometría elipsoidal, y también mayores que los informados para semillas de girasol (Gupta & Das, 1997) y frijol africano (Oje & Ugbor, 1991), pero inferiores a los reportados por Vilche *et al.* (2003) para quinoa, arvejas (Dutta *et al.*, 1988) y soja (Desphande *et al.*, 1993). El análisis de la varianza demostró que la influencia del contenido de humedad sobre ϕ no fue significativo en el rango evaluado.

Propiedades gravimétricas

Los resultados experimentales del peso de 1000 granos (Tabla 3) mostraron un incremento de un 16.05% desde un valor de 363.6 g (17.11% b.s.) hasta 421.97 g (34.44% b.s.). Los valores experimentales resultaron superiores a los informados para soja (Desphande *et al.*, 1993), maíz dulce (Coskun *et al.*, 2006), quinoa (Vilche *et al.*, 2003) (Fig. 3). Los resultados experimentales evidenciaron un efecto significativo del contenido de humedad sobre el peso de 1000 granos para niveles de confianza tanto de un 95 como de un 99%, $F=668.85$ ($F_{4;45;0.99}=3.77$), presentando una clara tendencia lineal de P_{1000} con el contenido de humedad que pudo expresarse mediante la siguiente correlación, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.99.

$$P_{1000} = 3.14 M + 312.08 \quad (11)$$

La densidad aparente (δ_{aparente}) disminuyó en un 14.6% a partir de un valor de 0.801 g/mL en el rango de humedad considerado (Tabla 3). Similares tendencias decrecientes fueron reportadas por Coskun *et al.* (2006) para maíz dulce, Dutta *et al.* (1988) para arvejas, Desphande *et al.* (1993) para soja y Vilche *et al.* (2003) para quinoa. Se verificó mediante un ANOVA para un 99% de confianza el efecto significativo de la humedad sobre la densidad aparente con $F=1600.22$ ($F_{4;45;0.99}= 3.773$). Los datos experimentales mostraron una tendencia lineal decreciente (Fig. 4) con el contenido de humedad (Ec. 12) con un coeficiente de determinación de 0.99.

$$\delta_{\text{aparente}} = - 0.0066 M + 0.9135 \quad (12)$$

La reducción de la densidad aparente con la humedad del grano podría atribuirse a que este parámetro físico representa el peso de un hectolitro de grano incluyendo el volumen de aire que encierran los espacios intergranulares, siendo el porcentaje en volumen de aire intergranario superior en los granos de mayor tamaño y humedad por poseer menor capacidad de compactación que los pequeños y secos.

Tabla 3: Peso de mil granos, densidad aparente y real de semillas maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320* en el rango de contenido de humedad 17.11% b.s.–34.44% b.s.

Contenido de Humedad (% b.s.)	Peso de mil granos* (g)	Densidad aparente* (g/mL)	Densidad real* (g/mL)
17.11	363.5987 (2.4339)	0.801 (0.003)	1.339 (0.043)
19.29	376.6082 (3.4677)	0.783 (0.003)	1.314 (0.018)
24.52	388.4275 (2.5343)	0.753 (0.002)	1.279 (0.039)
29.48	402.1832 (2.1336)	0.720 (0.005)	1.229 (0.025)
34.44	421.9739 (3.0581)	0.684 (0.005)	1.170 (0.029)

*valores entre paréntesis representan el desvío estándar.

Se observó una disminución de la densidad real (δ_{real}) de un 12.6% (Fig. 5) desde un valor inicial de 1.339 g/mL al incrementarse el contenido de humedad desde 17.11% b.s. hasta 34.44% b.s.. Este efecto significativo del contenido de humedad se verificó mediante un ANOVA con $F=22.02$ para un 99% de confianza ($F_{4;20;0.99}= 4.431$). Esta tendencia no concuerda con los datos informados por Coskun *et al.* (2006) para maíz dulce en un rango de humedades de 11.54 a 19.74% b.h. en los cuales se presenta un incremento de la densidad real entre 1.133 (g/mL) y 1.225 (g/mL) al incrementarse la humedad.

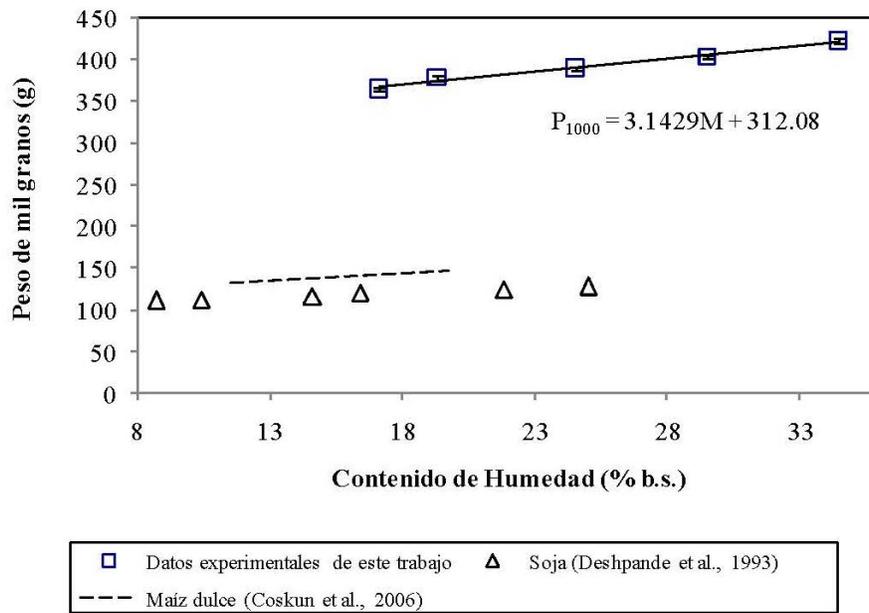


Fig. 3: Efecto del contenido de humedad sobre el peso de 1000 granos (P_{1000}) de maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320*.

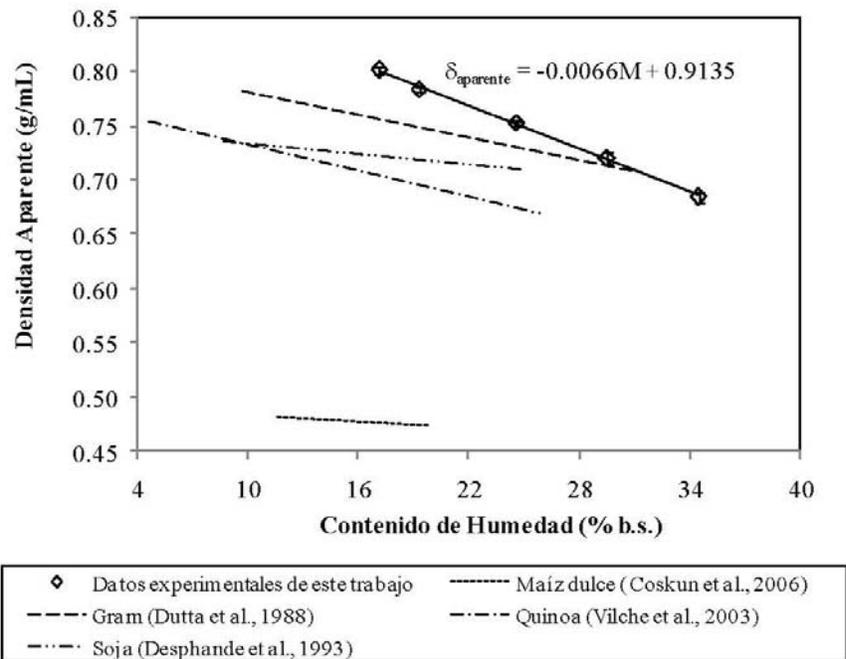


Fig. 4: Efecto del contenido de humedad sobre la densidad aparente ($\delta_{aparente}$) de maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320*.

Los resultados experimentales obtenidos en este trabajo exhibieron una tendencia lineal decreciente de la densidad real con el contenido de humedad (Ec. 13), con un coeficiente de determinación de 0.99.

$$\delta_{\text{real}} = -0.0094 M + 1.5016 \quad (13)$$

Los valores experimentales de porosidad presentaron un promedio de $40.927\% \pm 1.4\%$, no siendo significativas las diferencias por efecto del contenido de humedad del grano, con un F experimental de 0.831 frente a un valor de tabla $F_{(4;20;0.99)} = 4.431$ para un 99% de confianza. Estos valores de porosidad son inferiores a los informados por Coskun *et al.* (2006) para maíz dulce.

Análisis de la cinética de secado

La Fig. 6 muestra las curvas de secado obtenidas en las experiencias de secado en capa delgada para el conjunto completo de ensayos del diseño experimental, expresadas como humedad en base seca en el tiempo. Los desvíos estándar de los valores experimentales de humedad para cada tiempo en valor absoluto resultaron en promedio inferiores a 0.055.

Las curvas de secado respondieron al periodo de velocidad decreciente en todo el rango de humedad para todas las temperaturas ensayadas. Tal como era esperable, la mayor velocidad de secado se alcanzó para la condición de mayor temperatura (90°C), mientras que la menor velocidad de pérdida de agua se corresponde con la condición de menor temperatura de secado (30°C). Vale decir, los tiempos involucrados para disminuir el contenido de humedad a un nivel determinado resultan inversamente proporcionales a la temperatura de secado empleada. Así por ejemplo, bajar 3 puntos de humedad al grano desde su valor inicial M_0 de 18.59% b.s. requiere de 14 minutos a 90°C , mientras que son necesarios 23 minutos a 70°C y 145 minutos a 30°C .

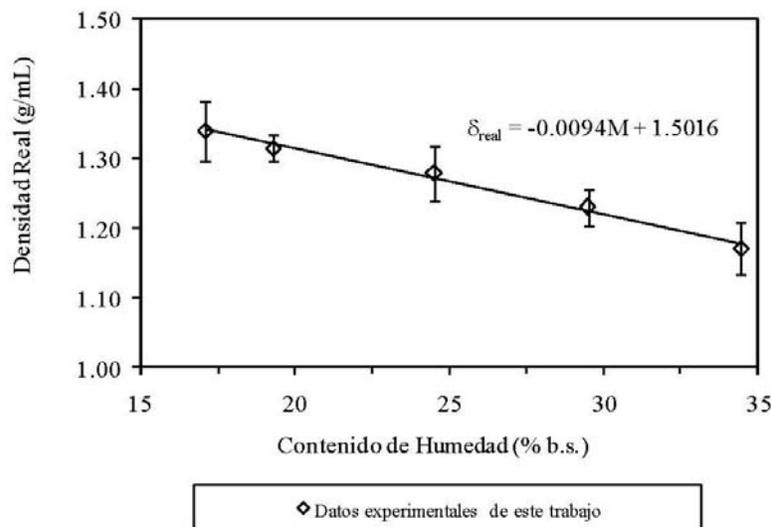


Fig. 5: Efecto del contenido de humedad sobre la densidad real (δ_{real}) de maíz Colorado Duro Híbrido NT 320.

Modelado matemático del proceso de secado

Los datos experimentales de contenido de humedad fueron expresados como humedad adimensional según $MR = (M - M_e) / (M_0 - M_e)$. El contenido de humedad de equilibrio para cada condición experimental se determinó mediante la isoterma de Henderson (ASAE, 1999).

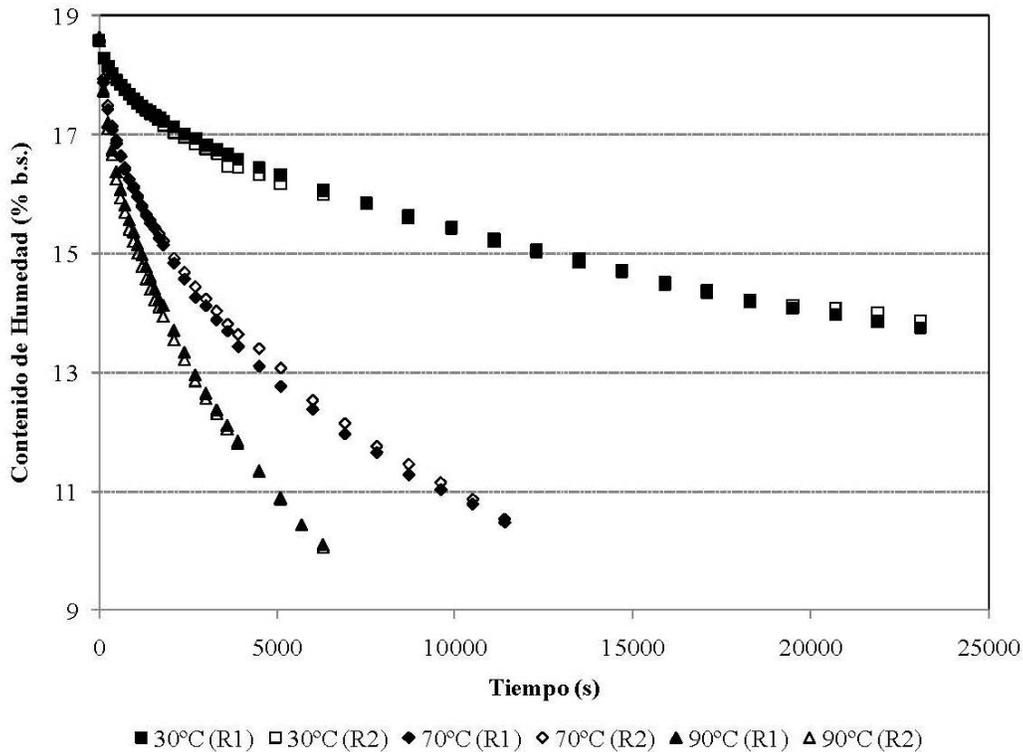


Fig. 6: Curvas experimentales de secado de maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320* (18.59% b.s.) a temperaturas de 30, 70 y 90 °C y velocidad de aire 0.43 m/s (R1: repetición 1; R2: repetición 2).

Los datos de humedad adimensional en el tiempo fueron ajustados por los modelos de Lewis, Page y Difusivo de tiempos cortos. Para este último modelo, en la Ec. (7) el parámetro geométrico D fue interpretado, en principio, considerando los dos diámetros característicos previamente analizados, diámetro medio geométrico D_g y el diámetro equivalente D_e , como representativos de la forma de la semilla, evaluados ambos para el contenido de humedad inicial $M_0=18.59\%$ b.s. mediante las Ecs. (9) y (10). Esta decisión fue tomada teniendo en cuenta las características morfológicas propias del grano de maíz que hacen que la esfericidad (Tabla 2) sea relativamente baja comparada con otros granos como soja, frente a lo cual resulta importante analizar si es apropiada la simplificación de una geometría esférica constante para describir la forma de la semilla en la simulación del secado.

Para analizar la calidad de ajuste de los modelos de secado planteados en las Ecs. (5), (6) y (7), los criterios estadísticos utilizados fueron el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar de la estimación (SE).

En la Tabla 4 se presentan los resultados de los ajustes de los modelos de Lewis y Page, mientras que en la Tabla 5 se muestra el ajuste del modelo Difusivo de tiempos cortos utilizando como parámetros geométricos constantes el diámetro geométrico promedio y el diámetro equivalente. Comparando estos resultados se observó que, si bien en general los modelos exhibieron adecuada capacidad para describir los datos, tanto las ecuaciones de Page como el modelo Difusivo de tiempos cortos presentaron los mayores coeficientes de determinación (superiores a 0.99). En tanto, en lo que respecta al error de la estimación, el modelo de Lewis aporta los valores superiores (aunque por debajo de 0.065).

Frente a estos resultados, se seleccionaron los modelos de Page y Difusivo de tiempos cortos como los más adecuados para predecir la cinética de secado de granos de maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320*.

En la Fig. 7 se comparan los resultados experimentales de este trabajo con los estimados a través de los diferentes ajustes para una temperatura de secado de 30°C, observándose la preponderancia de los modelos de Page y Difusivo de tiempos cortos para describir los datos.

Las difusividades de agua de los granos de maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320* representados por su diámetro medio geométrico y por su diámetro equivalente resultaron respectivamente entre 1.96×10^{-11} m²/s (30°C) y 6.81×10^{-11} m²/s (90°C) y entre 2.15×10^{-11} m²/s (30°C) y 7.46×10^{-11} m²/s (90°C). Estos valores del coeficiente de difusión están en el orden de los informados por Doymaz y Pala (2003) para maíz maduro (*Zea mays indentata*) y por Gastón *et al.* (2003) para granos de trigo (3.336×10^{-11} a 7.772×10^{-11} m²/s).

En la Tabla 5 puede observarse que los coeficientes de difusividad de humedad resultaron levemente menores (8.7%) cuando se utilizó como parámetro geométrico de la Ec. (7) el diámetro medio geométrico en lugar del diámetro equivalente.

Tabla 4: Resultado del ajuste de los Modelos de Lewis y Page para granos de maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320*.

T (°C)	Page				Lewis		
	k_p^*	n^*	R ²	SE	k_L^*	R ²	SE
30	0.00189 (9×10^{-5})	0.587 (5.68×10^{-4})	0.998	0.006	3.8×10^{-5} (3.95×10^{-22})	0.828	0.061
70	0.00314 (1.9×10^{-5})	0.576 (7.55×10^{-4})	0.999	0.004	8.1×10^{-5} (4.01×10^{-14})	0.759	0.065
90	0.00310 (2.3×10^{-5})	0.616 (9.74×10^{-4})	0.998	0.005	1.4×10^{-4} (8.35×10^{-10})	0.827	0.054

*valores entre paréntesis representan el desvío estándar.

Tabla 5: Resultado del ajuste del Modelo Difusivo de tiempos cortos para granos de maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320* para dos diámetros característicos del grano.

T (°C)	Diámetro característico D _g	Diámetro característico D _e	R ²	SE
	D _{ef} (m ² /s)	D _{ef} (m ² /s)		
30	1.96×10^{-11}	2.15×10^{-11}	0.995	0.010
70	3.97×10^{-11}	4.35×10^{-11}	0.997	0.008
90	6.81×10^{-11}	7.46×10^{-11}	0.990	0.013

El diámetro medio geométrico, como se demostró antes, resultó dependiente del contenido de humedad del grano, aunque dos de las dimensiones características (b, c) utilizadas para calcular D_g no fueron influenciadas por el cambio en el contenido de humedad. Esto pone de manifiesto que el agua en el grano no se distribuye equitativamente en todas sus longitudes características consideradas, sino que afecta más la longitud, y consecuentemente el diámetro medio geométrico. Asimismo, fue comprobado que el diámetro equivalente es función del contenido de humedad del grano.

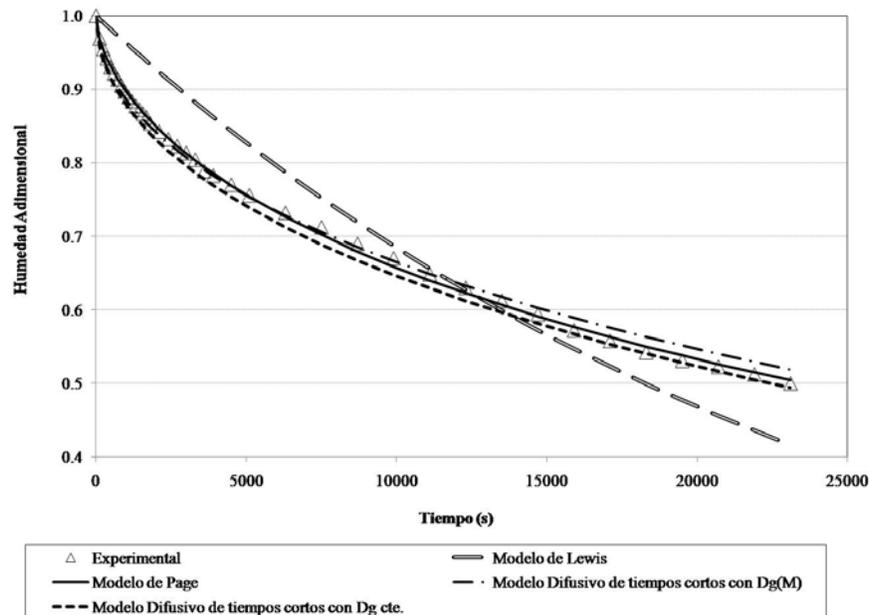


Fig. 7: Resultado de los ajustes de los modelos de Page, Lewis y Difusivo de tiempos cortos para granos de maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320* ($M_o = 18.59\%$ b.s., $T = 30^\circ\text{C}$ y $v = 0.43$ m/s).

Con la finalidad de analizar el efecto sobre la cinética de secado del cambio en la geometría del grano de maíz debida a la reducción de sus diámetros característicos durante la pérdida de humedad, se decidió reemplazar D en el Modelo Difusivo de tiempos cortos (Ec. 7) por la funcionalidades del diámetro medio geométrico y del diámetro equivalente con el contenido de humedad antes determinadas (Ecs. 9 y 10). Las expresiones resultantes que se presentan en las Ecs. (14) y (15) incorporan el efecto de la contracción volumétrica sufrida por el grano al disminuir el contenido de humedad en el interior del mismo durante el proceso de secado.

$$MR = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{6}{3 \times 10^{-5} M + 0.0074} \right) \sqrt{D_{ef} t} + 0.331 \left(\frac{6}{3 \times 10^{-5} M + 0.0074} \right)^2 D_{ef} t \quad (14)$$

$$MR = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{6}{2.3 \times 10^{-5} M + 0.0079} \right) \sqrt{D_{ef} t} + 0.331 \left(\frac{6}{2.3 \times 10^{-5} M + 0.0079} \right)^2 D_{ef} t \quad (15)$$

El ajuste de estos modelos permitió recalcular los coeficientes de difusividad de agua para cada temperatura, los cuales se muestran en la Tabla 6 junto con los estadísticos correspondientes.

La incorporación de la funcionalidad del diámetro medio geométrico y del diámetro equivalente con la humedad en el Modelo Difusivo de tiempos cortos permitió lograr una mejor calidad de ajuste de las ecuaciones a los datos observados, con una leve preponderancia de la Ec. (14) que fue seleccionada como la más apropiada, obteniéndose errores medios de la estimación inferiores a 0.011 (Tabla 6), todos por debajo de los obtenidos para el ajuste de este modelo para diámetro constante (Tabla 5 y Fig. 7).

Los coeficientes efectivos de difusividad de agua últimos, recalculados por el ajuste de la Ec. (14), resultaron en el rango 1.907×10^{-11} m²/s (30°C) a 6.495×10^{-11} m²/s (90°C), ligeramente inferiores (3-5%) a los calculados preliminarmente utilizando parámetros constantes.

A modo ilustrativo, en la Fig. 7 se ha incluido la predicción del Modelo Difusivo de tiempos cortos modificado planteado en la Ec. (14), donde se pone en evidencia que la capacidad de esta ecuación para representar los

resultados observados a 30°C resulta equiparable con la del modelo empírico de Page. Similares grados de concordancia con los resultados fueron obtenidos para las otras temperaturas.

Efecto de la temperatura sobre los parámetros cinéticos

Con el objeto de estudiar el efecto de la temperatura, tanto sobre los parámetros k_p y n del Modelo de Page, como sobre el coeficiente de difusión D_{ef} del Modelo Difusivo de tiempos cortos incorporando la funcionalidad del diámetro medio geométrico con el contenido de humedad (Ec. 14), se realizó un análisis de la varianza con un nivel de confianza del 99%. Los resultados no mostraron efecto significativo de la temperatura sobre el coeficiente k_p con $F=5.73$ ($F_{(2;3;0.99)}=30.81$), ni sobre n con $F=2.98$ ($F_{(2;3;0.99)}=30.81$). Pero sí se verificó un efecto significativo de la temperatura de secado sobre el coeficiente de difusión con $F=817.24$ ($F_{(2;3;0.99)}=30.82$).

La representación del logaritmo de los coeficientes de difusión determinados en función de la recíproca de la temperatura de secado absoluta (T_a) (Fig. 8) mostró una relación lineal inversa, tal como ha sido observada por numerosos investigadores para diversos materiales (Calzetta Resio *et al.*, 2005; Jayas *et al.*, 1991, Muthukumarappan & Gunasekaran, 1994), con un coeficiente de determinación R^2 de 0.97 por lo tanto D_{ef} podría ser expresada a través de una ecuación tipo Arrhenius.

$$D_{ef} = D_o \exp(-E_a / RT_a) \quad (16)$$

donde D_o es una difusividad infinita a alta temperatura, E_a es la energía de activación (kJ/mol), R es la constante de los gases ideales (8.314×10^{-3} kJ/mol°K) y T_a es la temperatura absoluta (°K).

Tabla 6: Resultado del ajuste del Modelo Difusivo de tiempos cortos para granos de maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320* considerando las funcionalidades de los diámetros medio geométrico y equivalente con la humedad.

T (°C)	Diámetro característico D_g (M)	R^2	SE	Diámetro característico D_e (M)	R^2	SE
	D_{ef} (m ² /s)			D_{ef} (m ² /s)		
30	1.907×10^{-11}	0.996	0.009	2.103×10^{-11}	0.996	0.010
70	3.793×10^{-11}	0.998	0.006	4.202×10^{-11}	0.997	0.007
90	6.495×10^{-11}	0.993	0.011	7.200×10^{-11}	0.992	0.012

El análisis de regresión no lineal de los coeficientes de difusividad de agua determinados por la Ec. (14) a distintas temperaturas (Tabla 6) condujo a la obtención de una energía de activación preliminar de 20.998 kJ/mol.

Verificada la validez de la funcionalidad $D_{ef} = f(T_a)$ de la Ec. (16), la misma fue incorporada al Modelo Difusivo de tiempos cortos que incluye la funcionalidad con el contenido de humedad el grano (Ec. 14), desarrollándose un modelo generalizado para la estimación de la humedad adimensional (MR) en función de la temperatura, de la humedad del grano y del tiempo de secado de los granos de maíz.

$$MR = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{6}{3 \times 10^{-5} M + 0.0074} \right) \sqrt{D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) t} + 0.331 \left(\frac{6}{3 \times 10^{-5} M + 0.0074} \right)^2 D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) t \quad (17)$$

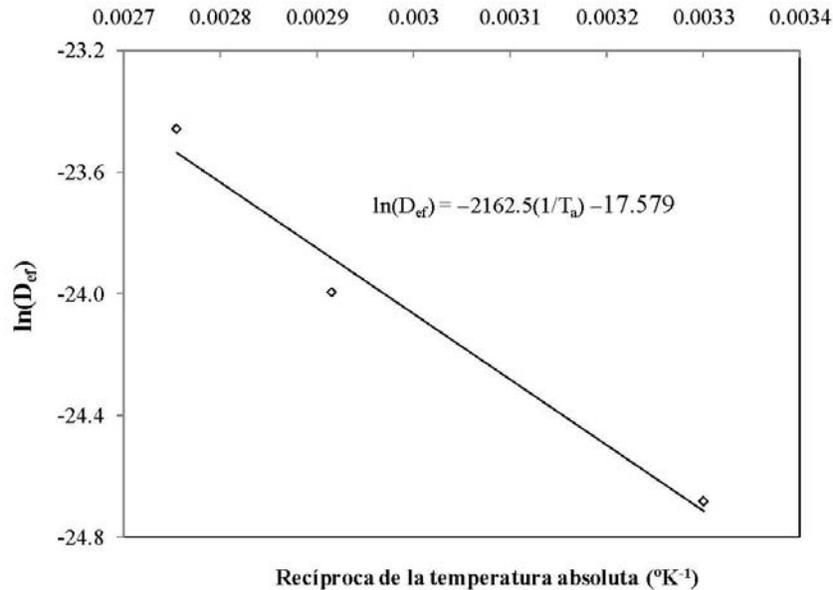


Fig. 8: Variación del coeficiente de difusión con la inversa de la temperatura absoluta para granos de maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320*.

Esta ecuación se ajustó al conjunto completo de datos experimentales mediante análisis de regresión no lineal, obteniéndose una energía de activación corregida E_a de 17.744 kJ/mol y un factor pre-exponencial D_0 de $2.125 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, con un elevado coeficiente de correlación R^2 de 0.991 y un error de la estimación SE menor de 0.013. La Fig. 9 demuestra que el modelo desarrollado es capaz de reproducir con adecuada exactitud los resultados experimentales para todas las temperaturas en el rango completo de humedades adimensionales evaluadas.

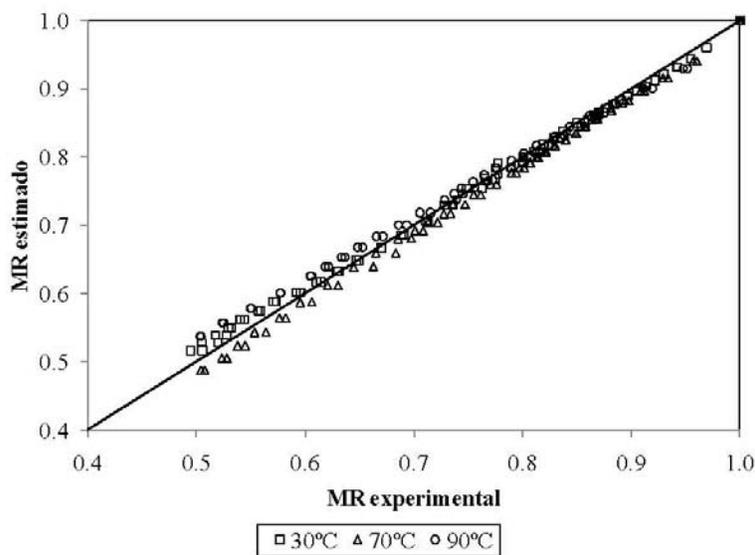


Fig. 9: Humedad adimensional experimental comparada con la estimada a partir del Modelo Difusivo de tiempos cortos generalizado (Ec. 17) para maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320* en el rango 30-90°C.

CONCLUSIONES

Se estudió el efecto del contenido de humedad sobre las propiedades físicas del maíz Colorado Duro *Híbrido NT 320*. Al incrementar la humedad desde 17 % b.s. a 34.4 % b.s. se incrementan el ángulo de reposo desde 10.11 a 24.66°, la longitud de la semilla desde 12.059×10^{-3} a 12.91×10^{-3} m, el diámetro geométrico desde 7.8×10^{-3} a 8.281×10^{-3} m, el diámetro equivalente desde 8.18×10^{-3} a 8.63×10^{-3} m y el peso de mil granos desde 363.6 a 421.9 g. El aumento de humedad tiene efecto negativo sobre las densidades aparente y real variando éstas de 0.801 a 0.684 g/mL y de 1.339 a 1.170 g/mL, respectivamente, mientras las dimensiones espaciales ancho, espesor y las propiedades físicas porosidad y esfericidad no son significativamente afectadas.

El secado sucede en el período de velocidad decreciente, con mayor velocidad de pérdida de agua a la mayor temperatura (90°C). Los modelos de Page y Difusivo de tiempos cortos brindan un adecuado ajuste de ($R^2 > 0.99$) de la humedad adimensional. El modelo Difusivo ajusta mejor cuando incluye una dependencia lineal del diámetro característico (medio geométrico) con la humedad, arrojando coeficientes de difusividad entre 1.907×10^{-11} m²/s (30°C) y 6.495×10^{-11} m²/s (90°C), que se correlacionan con la temperatura mediante una ecuación de tipo Arrhenius.

La inclusión en la ecuación de tiempos cortos de una funcionalidad del diámetro medio geométrico con el contenido de humedad, además de la dependencia exponencial con la temperatura, brinda un modelo más realista del proceso al incluir la contracción volumétrica del grano como producto del secado debido a la modificación en el contenido de humedad en el tiempo. El modelo Difusivo de tiempos cortos generalizado describe adecuadamente la cinética de secado de los granos de maíz ($R^2 > 0.99$), arrojando una energía de activación 17.74 kJ/mol y un factor pre-exponencial de 2.125×10^{-8} m²/s.

NOMENCLATURA

a	Longitud, m
AR	Angulo de Reposo, °
b	Ancho, m
b.h.	Base húmeda
b.s.	Base seca
c	Espesor, m
D	Diámetro característico, m
D _e	Diámetro equivalente, m
D _{ef}	Coefficiente de difusión, m ² /s
D _g	Diámetro medio geométrico, m
D _o	Factor pre-exponencial de Arrhenius, m ² /s
E _a	Energía de activación, kJ/mol
M	Contenido de humedad, % b.s.
M _e	Contenido de humedad de equilibrio, % b.s.
M _o	Contenido de humedad inicial, % b.s.
MR	Humedad adimensional
n, k _L , k _p	Constantes cinéticas
P ₁₀₀₀	Peso de mil granos, g
R	Constante de los gases (8.314×10^{-3} kJ/mol-K)
T	Temperatura centígrada, °C
t	Tiempo, s
T _a	Temperatura absoluta, K
V	Volumen de una semilla, L
v	Velocidad de aire de secado, m/s

Letras griegas

ϕ	Esfericidad
δ_{real}	Densidad real, g/mL
δ_{aparente}	Densidad aparente, g/mL
ε	Porosidad, %

REFERENCIAS

1. Akton Psychrometric Chart. (1996). Akton Associates Incorporated, CA, <http://www.aktonassoc.com>.
2. ASAE (1999). ASAE Standards Engineering Practices Data. 46th Ed. St. Joseph, MI, USA, American Society of Agricultural Engineers, pp. 567, 512-528.
3. Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59, 121-126.
4. Becker, H.A. (1959). A study of diffusion of solids of arbitrary shape with application to the drying of the wheat kernel. *J. Applied Polymer Science*, 1, 212-226.
5. Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F. & Hall, C.W. (1992). Drying and Storage of Grains and Oilseeds. 1st Ed., NY, USA, Van Nostrand Reinold, pp. 87-123 y 419-440.
6. CABCBUE (2011). Cámara Arbitral de la Bolsa de Cereales de Buenos Aires, República Argentina. <http://www.cabcbue.com.ar/camara/index.php>. Fecha de consulta: 1/4/2011.
7. Calzetta Resio, A.N., Aguerre, R.J. & Suárez, C. (2005). Analysis of simultaneous water absorption and water-starch reaction during soaking of amaranth grain. *Journal of Food Engineering*, 68, 265-270.
8. Canelli, N., Pagano, A.M. & Crozza, D.E. (2004). Modelado de propiedades de canola en función de la humedad del grano durante el secado en silo. Proceedings of the XXV Congreso Argentino de Química, Olavarría, Argentina, S5: Tecnología Química de los Alimentos, pp. 1109-1112.
9. Cirilo, A.G. (2002). Maíz colorado duro: el manejo del cultivo y la calidad comercial. EEA Pergamino-INTA. <http://www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/cereales/maiz/sis/cirilo.htm>. Fecha de consulta: 3/5/2011.
10. Coskun, B.M., Yalcin, I. & Ozarslan, C. (2006). Physical properties of sweet corn seed. *Journal of Food Engineering*, 74, 523-528.
11. Crozza, D.E. & Pagano, A.M. (1998). Lecho relleno: Análisis del efecto morfológico de granos de agropiro y maíz. Proceedings of Congreso ELAIQ'98, II Encuentro Latinoamericano de Ingeniería Química y XIII Congreso Chileno de Ingeniería Química, Antofagasta, Chile, pp. 501-509.
12. Desphande, S.D., Bal, S. & Ojha, T.P. (1993). Physical properties of soya bean. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 56 (1), 89-98.
13. Doymaz, I. (2004). Drying kinetics of white mulberry. *Journal of Food Engineering*, 61, 341-346.
14. Doymaz, I. & Pala, M. (2003). The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, 60, 125-130.

15. Dutta, S.K., Nema, V.K. & Bharddwaj, R.K. (1988). Physical properties of gram. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 39, 259-268.
16. Gastón, A.L., Abalone, A.M., Giner, S.A. & Bruce, D.M. (2003). Geometry effect on water diffusivity estimation in Pronta-Isla Verde and Broom wheat cultivars. *Latin American Applied Research*, 33, 327-331.
17. Gely, M.C. & Santalla, E.M. (2000). Effect some physical and chemical properties of oilseeds of drying kinetics parameters. *Drying Technology*, 18 (9), 2155-2166.
18. Gely, M.C. & Santalla, E.M. (2007). Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds: effect of air temperature and initial moisture content of seeds. *Journal of Food Engineering*, 78 (3), 1029-1033.
19. Gupta, R.K. & Das, S.K. (1997). Physical properties of sunflower seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66, 1-8.
20. Haros, M., Tolaba, M. & Suárez, C. (2003). Influence of corn drying on its quality for the wet-milling process. *Journal of Food Engineering*, 60, 177-184.
21. Jayas, D.S., Cenkowski, S., Pabis, S. & Muir, W.E. (1991). Review of thin-layer drying and wetting equations. *Drying Technology*, 9 (3), 551-588.
22. Joshi, D.C., Das, S.K. & Mukherjee, R.K. (1993). Physical properties of pumpkin seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 54, 219-229.
23. Kachru, R.R., Gupta, R.K. & Alam, A. (1994). Physico – Chemical Constituents & Engineering – Properties of food crops. 1st Ed., Editorial Scientific Publishers, Jodhpur, India, pp. 48, 69, 97.
24. Karathanos, V.T. & Belessiotis, V.G. (1999). Application of a thin layer equation to drying data of fresh and semi-ried fruits. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74, 355-361.
25. Liu, Q. & Bakker-Arkema, F.W. (1997). Stochastic modelling of grain drying: Part 2. Model development. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66, 275-280.
26. McCabe, W.L., Smith, J.C. & Harriot, P. (1991). Operaciones Básicas de Ingeniería Química. 4^{ta} Ed. Madrid, España (ISBN 84-7615-700-2), Editorial McGraw Hill Interamericana, 1121 p.
27. Mohsenin, N.N. (1986). Physical Properties of Plant and Animal Materials. 2nd Ec. NY, USA, Gordon and Breach Science Publishers, pp. 79-127.
28. Muthukumarappan, K. & Gunasekaran, S. (1994). Moisture diffusivity of corn kernel components during adsorption. Part I: germ. *Transactions of the ASAE*, 37 (4), 1263-1268.
29. Oje, K. & Ugbor, E.C. (1991). Some physical properties of oilbean seed. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 50, 305-313.
30. Pagano, A.M. & Crozza, D.E. (2000). Prediction of bulk density and bed porosity from data of bed depth and moisture content for two oilseeds. Proceedings of XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, XIX Interamerican Congress of Chemical Engineering and I Brazilian Congress of Phase Equilibrium and Fluid Properties for Chemical Process Design "COBEQ'2000", Aguas de Sao Pedro, Brazil (ISBN 85-9015-13-1).

31. Pagano, A.M. & Crozza, D.E. (2001). Modelling and simulation: bulk density, porosity and resistance to airflow on in-bulk oat Grains. Proceedings of Eight International Congress on Engineering and Food ICEF'8 (ISBN 1-56676-951-5), Ed. Tech. Publisher Co., Inc., Lancaster, PA, USA, pp. 1792-1796.
32. Park, K.S., Vohnikova, Z. & Brod, F.P.R. (2002). Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). *Journal of Food Engineering*, 51, 193-199.
33. Parti, M. (1993). Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 54, 339-352.
34. Ross, I.J. & White, G.M. (1972). Thin layer drying characteristics of white corn. *Transactions of the ASAE*, 5 (1), 175-179.
35. Ruiz, R.S., Vizcarra, M.G. & Martínez, C. (2008). Hydration of grain kernels and its effect on drying. *LWT Food Science and Technology*, 41, 1310-1316.
36. Sun, D.W. & Woods, J.L. (1994). Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers. *Transactions of the ASAE*, 37, 1919-1926.
37. Tiris, C., Ozbalta, N., Tiris, M. & Dincer, I. (1994). Experimental testing of a new solar dryer. *International Journal of Energy Research*, 18, 483-490.
38. Tolaba, M.P., Peltzer, M., Enríquez, N. & Pollio, M.L. (2004). Grain sorption equilibria of quinoa grains. *Journal of Food Engineering*, 61 (3), 365-371.
39. Vilche, C., Gely, M.C. & Santalla, E. (2003). Physical properties of quinoa seeds. *Biosystems Engineering*, 86 (1), 59-65.
40. Wilkinson, L. (1990). Systat: The System for Statistics, Systat, Inc., Evanston, IL.
41. Yanucci, D. (2002). El Granel: Factores que afectan su conservación. En: Conservación de Granos y Semillas en Post-cosecha. Granos y Postcosecha Latinoamericana, de la Semilla al Consumo. *Libro de Actualización Técnica*, 3 (1), 10-54.

