

# Determinación de constantes de velocidad de rehidratación y cambios sobre algunas propiedades físicas en semillas de arveja (*Pisum sativum L.*)\*

Andrés Felipe Cerón Cárdenas\*\*, Laura Inés Latorre Vásquez\*\*\*, Mauricio Alexander Bucheli Jurado\*\*\*\*, Oswaldo Osorio Mora\*\*\*\*\*, Diego Fernando Mejía España\*\*\*\*\*, Luis Fernando Garcés Giraldo\*\*\*\*\*

## Resumen

**Introducción.** La rehidratación por inmersión en agua es una operación compleja que pretende reconstituir productos; sin embargo, aún son escasas las investigaciones referentes a características físicas dependientes de la humedad en semillas de arveja. La investigación se ha enfocado en la obtención de nuevos materiales, uso de tutores y manejo del cultivo. **Objetivo.** Determinar el efecto de la temperatura sobre las constantes de velocidad de rehidratación (absorción de agua) y el efecto de la humedad ganada sobre algunas propiedades físicas en semillas de arveja (*Pisum sativum L.*), variedad San Isidro. **Materiales y métodos.** La rehidratación se realizó a tres temperaturas (6, 18 y 30°C), empleando una relación semillas/agua 1:4 (p/v); se tomaron mediciones a 0, 3, 6, 9, 12 y 24 horas. Se utilizó un diseño experimental unifactorial completamente aleatorizado con diez repeticiones, mediante el cual se estudió la influencia de la temperatura sobre las constantes de velocidad de absorción de agua y la ganancia de humedad sobre algunas propiedades físicas (peso de mil semillas, esfericidad, densidad real, densidad aparente y porosidad). **Resultados.** Las constantes de velocidad de absorción de agua de cada temperatura

fueron: 6 °C ( $2,308 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ), 18°C ( $2,511 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ) y 30°C ( $4,154 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ); la ganancia de humedad ocasionó aumentos en peso de mil semillas y porosidad, mientras que la esfericidad y densidad real y aparente disminuyen. **Conclusión.** La temperatura y la humedad presentan efecto significativo sobre la velocidad de rehidratación y las propiedades físicas estudiadas.

**Palabras clave:** semillas, arvejas, temperatura, tiempo, humedad.

## Determination of re-hydration velocity constants and changes on some physical properties of pea seeds arveja (*Pisum sativum L.*)

### Abstract

**Introduction.** Rehydration by immersion in water is a complex operation that aims to reconstitute products. However, research works about the physical characteristics that depend on humidity in pea seeds, are still scarce. Research so far has been focused on obtaining new materials, the use of tutors and on crop management. **Objective.** Determine the

\* Este artículo se deriva del proyecto de investigación "Evaluación de la aptitud de nuevas líneas de arveja (*Pisumsativum L.*), para procesamiento agroindustrial actualmente aptas agrónomicamente en el departamento de Nariño". En la etapa titulada "Determinación del efecto de diferentes niveles de rehidratación sobre algunas propiedades de calidad, durante el enlatado y esterilización de arveja (*Pisumsativum L.*). Desarrollado por la Universidad de Nariño y financiado con recursos del Sistema General de Regalías (SGR).

\*\* Ingeniero Agroindustrial, Candidato a magister en Innovación Alimentaria y Nutrición, Corporación Universitaria Lasallista. Caldas-Antioquia, Colombia. Grupo de Investigación Tecnologías Emergentes en Agroindustria (TEA) de la Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.

\*\*\* Ingeniera Agroindustrial, Grupo de Investigación Tecnologías Emergentes en Agroindustria (TEA), Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.

\*\*\*\* Profesor Asociado magister en Ingeniería de Alimentos, Universidad del Valle. Grupo de Investigación Tecnologías Emergentes en Agroindustria (TEA), Universidad de Nariño. Pasto, Colombia.

\*\*\*\*\* Profesor Asociado Doctor; Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Grupo de Investigación Tecnologías Emergentes en Agroindustria (TEA), Universidad de Nariño. Pasto, Colombia.

\*\*\*\*\* Profesor Asociado magister. Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Grupo de Investigación Tecnologías Emergentes en Agroindustria (TEA), Universidad de Nariño. Pasto, Colombia.

\*\*\*\*\* Ph.D. Filosofía Universidad Pontificia Bolivariana. Vicerrector de Investigación de la Corporación Universitaria Lasallista. Caldas-Antioquia, Colombia.

effect of temperature on the rehydration velocity constants (water absorption) and the effect of the humidity gained on some of the physical properties of pea seeds (*Pisum sativum* L.) of the San Isidro variety. **Materials and methods.** The rehydration process was performed at three temperatures (6, 18 and 30 °C), using a 1:4 (p/v) seeds/water ratio. Three measures were made at 0, 3, 6, 9, 12 and 24 hours. A unifactorial experimental and totally randomized design with three repetitions was used to study the influence of the temperature on the water absorption velocity constants and the humidity gain on some of the physical properties (the weight of a thousand seeds, sphericity, real density, apparent density and porosity). **Results.** The water absorption velocities at every temperature were: 6 °C ( $2,308 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ), 18 °C ( $2,511 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ) and 30 °C ( $4,154 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ); the humidity gain caused increase in the weight of a thousand seeds and the porosity, while the sphericity and the real and apparent densities decrease. **Conclusion.** The temperature and the humidity have a significant effect on the rehydration velocity and on the physical properties studied.

**Key words:** seeds, peas, temperature, time, humidity.

**Determinación de constantes de velocidad de rehidratación e mudanças sobre algumas propriedades físicas em sementes de ervilha (*Pisum sativum* L.)**

**Abstrato**

**Introdução.** A rehidratación por imersão em água é uma operação complexa que pretende reconsti-

tuir produtos; no entanto, ainda são escassas as investigações referentes a características físicas dependentes da umidade em sementes de ervilha. A investigação se enfocou na obtenção de novos materiais, uso de tutores e manejo do cultivo. **Objetivo.** Determinar o efeito da temperatura sobre as constantes de velocidade de rehidratación (absorção de água) e o efeito da umidade ganha sobre algumas propriedades físicas em sementes de ervilha (*Pisumsativum* L.), variedade San Isidro. **Materiais e métodos.** A rehidratación se realizou a três temperaturas (6, 18 e 30 °C), empregando uma relação sementes/água 1:4 (p/v); tomaram-se medições a 0, 3, 6, 9, 12 e 24 horas. Utilizou-se um desenho experimental unifatorial completamente aleatorizado com dez repetições, mediante o qual se estudou a influência da temperatura sobre as constantes de velocidade de absorção de água e o ganho de umidade sobre algumas propriedades físicas (peso de mil sementes, esfericidade, densidade real, densidade aparente e porosidade). **Resultados.** As constantes de velocidade de absorção de água de cada temperatura foram: 6 °C ( $2,308 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ), 18 °C ( $2,511 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ) e 30 °C ( $4,154 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ); o ganho de umidade ocasionou aumentos em peso de mil sementes e porosidade, em quanto a esfericidade e densidade real e aparente diminuem. **Conclusão.** A temperatura e a umidade apresentam efeito significativo sobre a velocidade de rehidratación e as propriedades físicas estudadas.

**Palavras chaves:** sementes, ervilha, temperatura, tempo, umidade.

---

## Introducción

La arveja (*Pisum sativum* L.) es fuente importante de proteínas, carbohidratos y vitaminas (Barac, Cabrilo, Pesi, et al, 2010, 4514; Alasino, Andrich, Sabbag, et al, 2008, 397; Paksoy y Aydin, 2006, 26); su composición química, en estado fresco, proporciona: proteína 6.7 %, carbohidratos 13.9 % y grasa 0.5 % (Yalcin, Ozarslan y Akba, 2007, 731), mientras, que en estado seco, proteína 24 %, carbohidratos 60.3 % y grasa 1.16 % (Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá-Incap, 2012, 29).

En Colombia la producción se concentra en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Tolima (Zamorano, López y Álzate, 2008, 443); de estos, el mayor productor es Nariño,

con una participación del 50 %, seguido de Cundinamarca con el 20 % y Boyacá con el 16 % (Osorio y Castaño, 2011, 34). La diversidad es amplia, con un gran número de variedades que se han mejorado por rendimiento y por calidad del producto fresco o como materia prima para la agroindustria (Ligarreto y Ospina, 2009, 334). Las variedades más cultivadas en el país son: Santa Isabel, Piquinegra, Guatecana, Sindamanoy, San Isidro, y Obonuco Andina, las cuales se consumen frescas y en estado seco (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas-Fenalce, 2010).

En el caso de las arvejas secas, deben ser rehidratadas para su consumo o uso agroindustrial; este es un proceso complejo (Brousse, Nieto, Linares y Vergara, 2012, 82), que me-

rece especial atención. Según Marín, Lemus, Flores y Vega (2006, 2) la rehidratación no es el proceso inverso a la deshidratación, ya que ambos fenómenos tienen diferentes mecanismos de transferencia de materia, y dependen de factores distintos; sin embargo, al rehidratar se pretende obtener productos con características similares a los productos frescos (Melquíades, López y Rosas, 2009, 66).

Entre las propiedades de calidad más importantes de un alimento que ha sido rehidratado, están las estructurales, las ópticas, las texturales, las mecánicas, las sensoriales y las nutricionales (Marín et al, 2006, 7). El conocimiento de estas propiedades proporciona datos de ingeniería para el diseño de equipos y procesos (Sessiz, Esgici y Kizil, 2007, 1426; Altuntas, 2008, 63; Ordóñez, Gely y Pagano, 2012, 154; Pradhan, Said y Singh, 2013, 107); tales son los casos de equipos de clasificación, separación, transporte, entre otros, que se diseñan en función del contenido de agua (Sharma et al, 2011, 441). Sin embargo, aún son escasas las investigaciones referente a características físicas dependientes de la humedad en semillas de arveja, como lo reportan Yalcin et al. (2007, 731). La investigación en el país se ha enfocado hacia la obtención de nuevos materiales, uso de tutores y manejo del cultivo (Fenalce, 2010, 34).

Dentro de este contexto, el objetivo de investigación fue determinar el efecto de la temperatura sobre las constantes de velocidad de rehidratación (absorción de agua) y el efecto de la humedad ganada sobre algunas propiedades físicas (peso de mil semillas, esfericidad, densidad real, densidad a granel y porosidad), en semillas de arveja (*Pisum sativum* L.), variedad San Isidro, y recopilar datos que permitan el diseño y desarrollo de procesos agroindustriales con este material.

## Materiales y métodos

**Localización.** La investigación se llevó a cabo en los laboratorios de calidad y conservación de alimentos de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial (Universidad de Nariño) sede Torobajo Pasto, (Nariño), localizada a 2527 msnm, con temperatura promedio de 14 °C y una humedad relativa de 70 %.

**Material de estudio.** Se utilizaron semillas de arvejas (*Pisum sativum* L.) de la variedad San Isidro (semilla verde, hilum blanco, lisa). El material se recolectó al sexto mes de establecido el cultivo en la granja del Centro Internacional de Producción Limpia LOPE, Sena Regional Nariño, ubicada a 2650 msnm, temperatura promedio 13 °C y precipitación promedio anual de 700 mm, condiciones favorables para el cultivo. El material fue clasificado de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 791 (Dp > 6.35 mm) arveja seca grande. La humedad de las semillas base húmeda fue de 16,756 ± 2,323 %.

**Rehidratación del material.** La humedad de los materiales se llevó hasta un 14,211 ± 1,184 % (base húmeda), empleando un secador de bandejas construido por Industrias Químicas-Fiq LTDA, a una temperatura de 45 °C con velocidad de aire de 2 m/s durante 6 horas; posteriormente se llevó a cabo una rehidratación por inmersión en recipientes de polietileno de alta densidad (capacidad 3 L) utilizando agua relación semillas/agua 1:4 (p/v), por espacio de 24 horas a tres diferentes temperaturas (6 °C, temperatura ambiente 18 °C y 30 °C); para el control de la temperatura se utilizó un baño termostático Eyelaosb2000, con precisión de ± 0.1 °C y un equipo de enfriamiento Chiller-polyscience SD28R, con precisión ± 0,1 °C; el registro de la temperatura se realizó utilizando un Datalogger Oakton Temp 10T.

**Diseño experimental.** El factor de estudio evaluado fue el contenido de humedad de las semillas de arvejas. Para ello se tomó como base el contenido inicial (14,211 %), para posteriormente someterlas a rehidratación bajo las condiciones descritas anteriormente, tomando datos a las 0, 3, 6, 9, 12 y 24 horas. Se utilizó un diseño unifactorial completamente aleatorizado (DCA), con diez repeticiones, con el fin de determinar el efecto de temperatura sobre la velocidad de absorción de agua y el efecto de la humedad ganada sobre algunas propiedades físicas (peso de mil semillas, esfericidad, densidad real, densidad a granel y porosidad a granel).

El análisis de los resultados se realizó con ayuda del programa Sigma plot 10,0, mediante el cual se efectuó el análisis de varianza y prueba

de comparación mediante la mínima diferencia significativa (LSD de Fisher) a un 5 % de nivel de significancia.

**Determinación humedad.** Se eliminó la humedad superficial de las semillas mediante el uso de toallas de papel; posteriormente se utilizó la metodología descrita por Bernal (1998, 60), empleando un horno eléctrico (Thermolab-dies) a 100 °C, por un tiempo de 24 horas; posteriormente el material se pasó a un desecador hasta lograr un peso constante; la humedad se expresó en base húmeda.

**Determinación constante de velocidad de rehidratación.** Las constantes cinéticas de velocidad de rehidratación se determinaron mediante la metodología descrita por Brousse et al. (2012, 84), quienes proponen el modelo exponencial (ecuación 1).

$$C_{(t)} = C_{\infty} (1 - \exp^{-kt}) \text{ Ecuación 1}$$

Donde:  $C_{(t)}$ : contenido de agua en el equilibrio a tiempo  $t$ , g de agua/g de sólido seco;  $C_{\infty}$ : contenido de agua en el equilibrio a tiempo infinito, g de agua/g de sólido seco;  $K$ : constante de velocidad de absorción de agua,  $\text{min}^{-1}$ ;  $t$ : tiempo de adsorción de agua, min. Los parámetros cinéticos  $C_{\infty}$  y  $K$  se obtuvieron a partir de los datos experimentales mediante regresión no lineal.

**Peso de mil semillas.** El peso de mil semillas secas y rehidratadas se determinó por medio de una balanza analítica Ohaus Apx-200 de 200 g con precisión de  $\pm 0,0001\text{g}$  (Yalcin et al. 2007, 732).

**Determinación esfericidad.** Se midieron las tres dimensiones lineales (longitud (L), anchura (W) y grueso (T), utilizando un calibrador con precisión de 0,05 milímetros; posteriormente se aplicó la ecuación 2 (Mohsenin, 1970):

$$\emptyset = \frac{(LWT)^{\frac{1}{3}}}{L} \text{ Ecuación 2}$$

**Densidad aparente.** Se determinó utilizando el procedimiento de prueba de peso estándar (Singh y Goswami, 1996, 94); se utilizó una probeta de 250 mL, en la cual se dejaron caer,

a velocidad constante, arvejas desde una altura de 10 cm tomada desde la abertura. Este proceso se realizó hasta alcanzar la línea que representa los 200 mL. La masa de las arvejas contenidas en el recipiente fue dividida por el volumen del cilindro representado por la probeta (ecuación 3).

$$\rho_b = \frac{M_{rl} - M_{rv}}{V_r} \text{ Ecuación 3}$$

Donde:  $M_{rl}$ : Masa del recipiente lleno;  $M_{rv}$ : Masa del recipiente vacío;  $V_r$ : Volumen del recipiente

**Densidad real.** La densidad real se determinó empleando el método propuesto por Yalcin et al. (2007, 732). Se utilizó etanol al 99,8 % y densidad 0,790 g/mL, un picnómetro de 50 mL. Para el cálculo de la densidad real se empleó la ecuación 4:

$$\rho_s = \frac{(w_{ps} - w_p)}{(w_{pl} - w_p) - (w_{pls} - w_{ps})} \rho_l \text{ Ecuación 4}$$

Donde:  $w_{ps}$ : Masa del picnómetro con la muestra;  $w_p$ : Masa del picnómetro vacío;  $w_{pl}$ : Masa del picnómetro con el líquido;  $w_{pls}$ : Masa del picnómetro con la muestra y el líquido;  $\rho_l$ : Densidad del líquido.

**Cálculo de la porosidad.** Se calculó a partir de los valores de la densidad real y la densidad aparente, con la relación dada por Mohsenin (1970), ecuación 5:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_t}\right) * 100 \text{ Ecuación 5}$$

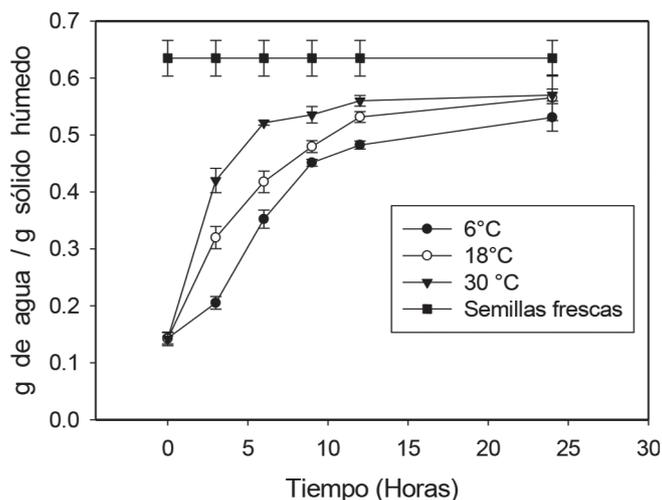
Donde  $\varepsilon$  es la porosidad en %;  $\rho_b$ : densidad aparente en g/mL; y  $\rho_t$ : densidad real en g/mL.

## Resultados

**Ganancia de humedad.** En la figura 1 se muestra el comportamiento cinético de la rehidratación de las semillas; no se evidenció diferencia entre el equilibrio alcanzado por las semillas a las 24 horas a diferente tempera-

tura: 6 °C ( $53,085 \pm 2,415 \%$ ), 18 °C ( $56,536 \pm 4,002 \%$ ) y 30 °C ( $57,016 \pm 1,048 \%$ ), ( $p= 0,243$ ); sin embargo, existen diferencias significativas entre los valores de humedad de las semillas en

estado fresco ( $63,482 \pm 3,125 \%$ ), frente a los rehidratados ( $p= 0.0236$ ); en el mismo sentido se evidenció que a menores temperaturas la humedad en equilibrio alcanzada fue menor.



**Figura 1. Cinética de rehidratación semillas de arveja**

En la tabla 2 se muestran las constantes cinéticas de velocidad de absorción de agua ( $k$ ), a las diferentes temperaturas, considerando el período de velocidad de 0 a 12 horas; después de este tiempo la absorción de agua tiende a ser constante. Al comparar las constantes se

evidencia diferencia estadísticamente significativa ( $p=0,000$ ), entre los tratamientos a 6 °C y 18 °C, frente al de 30 °C, lo que muestra que la absorción de agua se facilita a mayor temperatura, debido al aumento de la difusividad de agua y de solutos, lo cual reduce el tiempo de rehidratación.

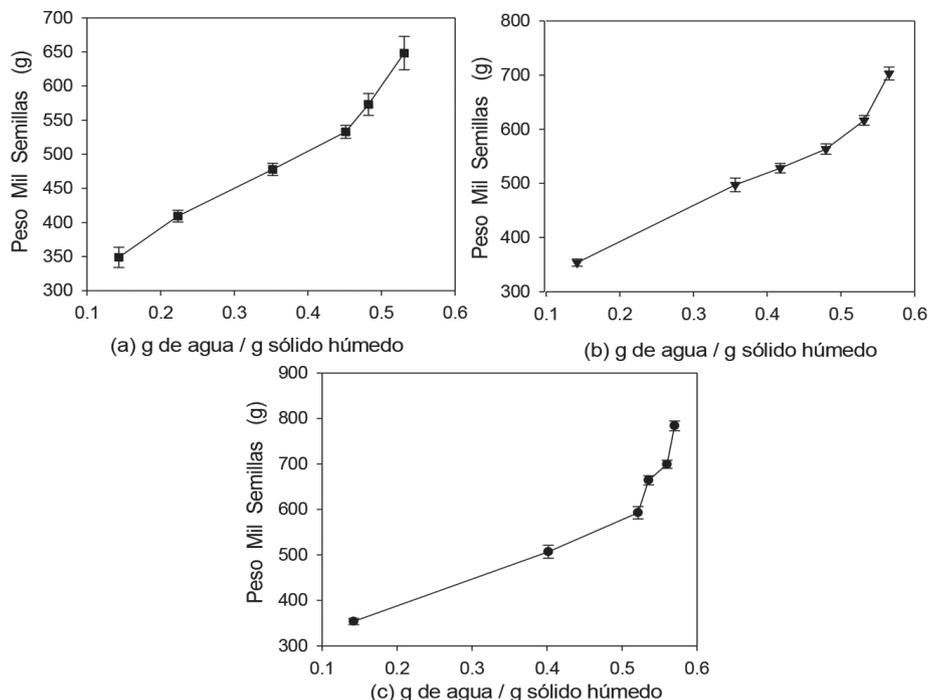
**Tabla 2. Constantes cinéticas de velocidades de rehidratación**

Temperatura (°C)	* $C_{(m)}$ (g de agua/g de sólido seco)	* $K$ ( $\text{min}^{-1}$ ) $\times 10^{-3}$	$R^2$
6	1,136 $\pm$ 0,106	2,304 $\pm$ 0,121	96,221
18	1,130 $\pm$ 0,113	2,558 $\pm$ 0,113	95,354
30	1,327 $\pm$ 0,057	4,170 $\pm$ 0,152	97,772

\*Valores promedio  $n=10 \pm$  desviación estándar

**Peso de mil semillas.** En la figura 2 se muestra el incremento del peso de mil semillas conforme aumentó la humedad. Existen diferencias estadísticamente significativas frente al peso inicial y el final de los tratamientos ( $p<0,05$ ). En el mismo sentido se realizó la comparación de los pesos finales, alcanzados por cada tratamiento a diferente temperatura: 6 °C ( $651,430 \pm 25,299$  g), 18 °C ( $701,383 \pm 12,322$  g) y 30 °C

( $782,716 \pm 10,724$  g), y se evidenciaron diferencia estadísticamente significativa ( $p=0,000$ ); por ello se afirma que cuanto mayor es la temperatura de rehidratación mayor es el peso de las semillas, debido a que la humedad en equilibrio alcanzada es mayor por el gradiente de calor entre el interior de la semilla y el agua que facilita la difusividad.



**Figura 2. Efecto de la humedad sobre el peso de mil semillas: (a) rehidratación 6 °C; (b) rehidratación temperatura ambiente 18 °C; (c) rehidratación 30 °C**

Las ecuaciones que describen el aumento del peso de mil semillas (PS) en función de la humedad (H) a diferente temperatura ( $T^\circ$ ) son:

$$T^\circ 6\text{ }^\circ\text{C: PS} = 699, 82H + 243, 68 \quad (R^2 = 0,9643)$$

$$T^\circ 18\text{ }^\circ\text{C: PS} = 745, 88H + 233, 70 \quad (R^2 = 0,9463)$$

$$T^\circ 30\text{ }^\circ\text{C: PS} = 870, 56H + 203, 88 \quad (R^2 = 0,8792)$$

**Esfericidad.** En la figura 3, se evidencian aumentos y disminuciones de la esfericidad conforme aumentó la humedad de las semillas. A temperatura de rehidratación de 6 °C, se evidencia una correlación lineal de aumento de la esfericidad, siempre que la humedad sea inferior al 35 % base húmeda. Sin embargo, humedades superiores ocasionaron disminuciones del valor inicial, debido a que de las tres dimensiones lineales la longitud (L), aumentó en mayor proporción que la anchura (W) y el grueso (T), aunque no se encontraron diferencias significativas entre los valores iniciales y los finales para cada temperatura de rehidratación ( $p > 0,05$ ).

En el mismo sentido, se realizó la comparación entre las esfericidades alcanzadas al final (humedad en equilibrio), por cada tratamiento:

6 °C ( $0,889 \pm 0,019$ ), 18 °C ( $0,880 \pm 0,029$ ) y 30 °C ( $0,881 \pm 0,023$ ), y no se encontraron diferencias significativas ( $p = 0,652$ ).

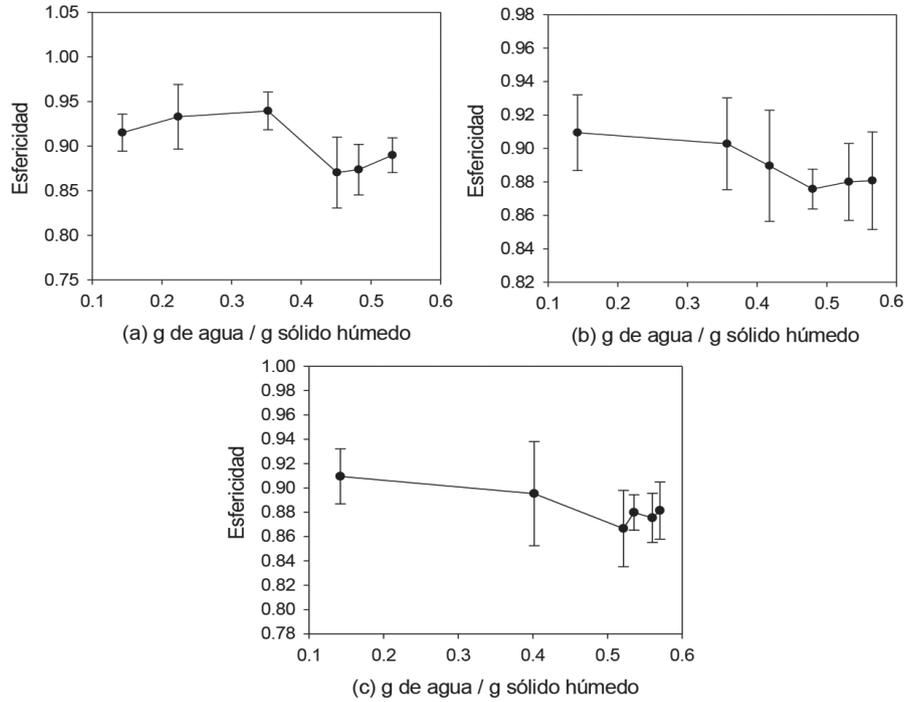
**Densidad real y aparente.** En las figuras 4 y 5 se muestran disminuciones en la densidad real y en la aparente, conforme aumentó la humedad. Existen diferencias significativas entre las medidas iniciales y las finales de cada tratamiento ( $p < 0,05$ ) debido a que el agua va ocupando espacio dentro de la semilla; por ende, la densidad de las semillas se acerca a la del agua. Al comparar las densidades reales en la etapa de humedad en equilibrio a temperaturas de 6, 18 y 30 °C: ( $1,180 \pm 0,020$  g/mL); ( $1,172 \pm 0,013$  g/mL), ( $1,150 \pm 0,013$  g/mL) respectivamente, no se evidenciaron diferencias significativas ( $p = 0,128$ ).

Las ecuaciones que describen la disminución de la densidad real (DR) en función de la humedad (H) a diferente temperatura ( $T^\circ$ ) son:

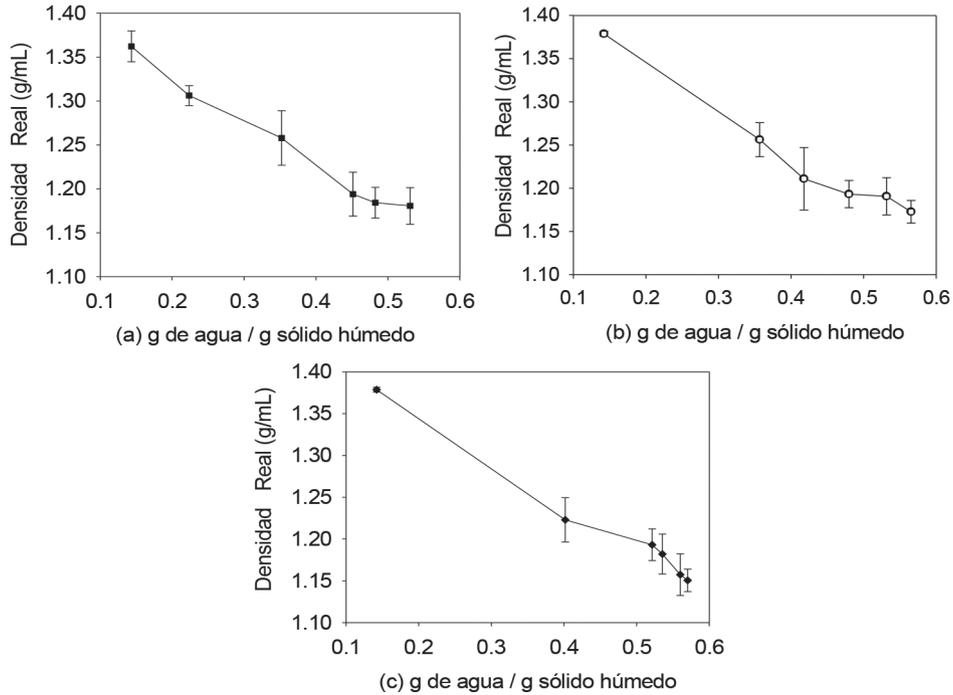
$$T^\circ 6\text{ }^\circ\text{C: DR} = -0,483H + 1,423 \quad (R^2 = 0,9812)$$

$$T^\circ 18\text{ }^\circ\text{C: DR} = -0,488H + 1,436 \quad (R^2 = 0,9638)$$

$$T^\circ 30\text{ }^\circ\text{C: DR} = -0,509H + 1,446 \quad (R^2 = 0,9822)$$



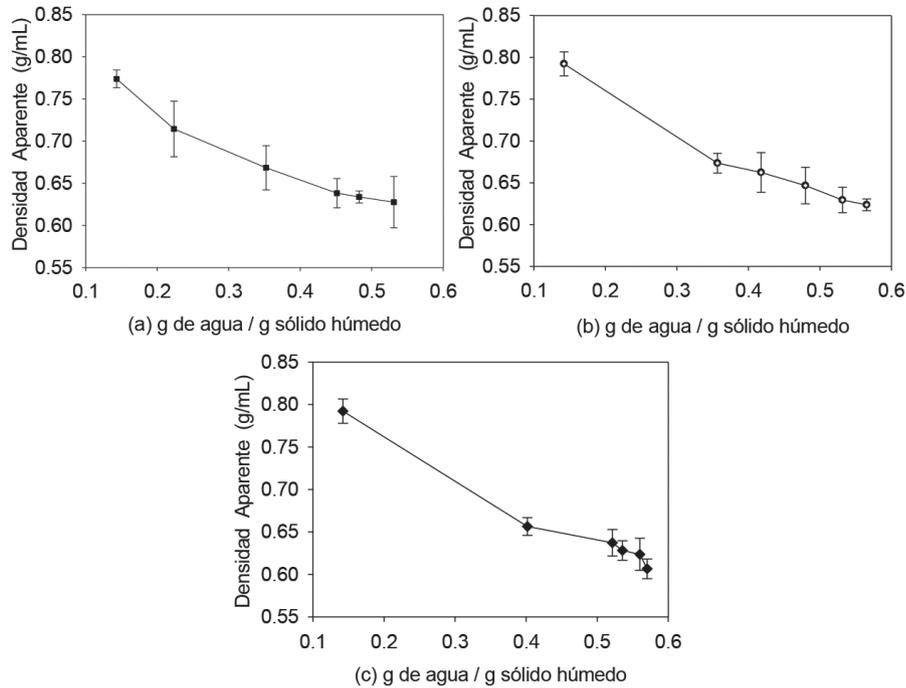
**Figura 3. Efecto de la humedad sobre la esfericidad: (a) rehidratación 6 °C; (b) rehidratación temperatura ambiente 18 °C; (c) rehidratación 30 °C**



**Figura 4. Efecto de la humedad sobre la densidad real: (a) rehidratación 6 °C; (b) rehidratación temperatura ambiente 18 °C; (c) rehidratación 30 °C**

Respecto de la densidad aparente final alcanzada en el mismo período de tiempo y temperaturas ( $0,627 \pm 0,030\text{g/mL}$ ), ( $0,623 \pm 0,007\text{g/}$

$\text{mL}$ ), ( $0,606 \pm 0,011\text{g/mL}$ ) no se observaron diferencias significativas ( $p=0,407$ ).



**Figura 5. Efecto de la humedad sobre la densidad aparente: (a) rehidratación 6 °C; (b) rehidratación temperatura ambiente 18 °C; (c) rehidratación 30 °C**

Las ecuaciones que describen la disminución de la densidad aparente (DA) en función de la humedad (H) a diferente temperatura ( $T^\circ$ ) son:

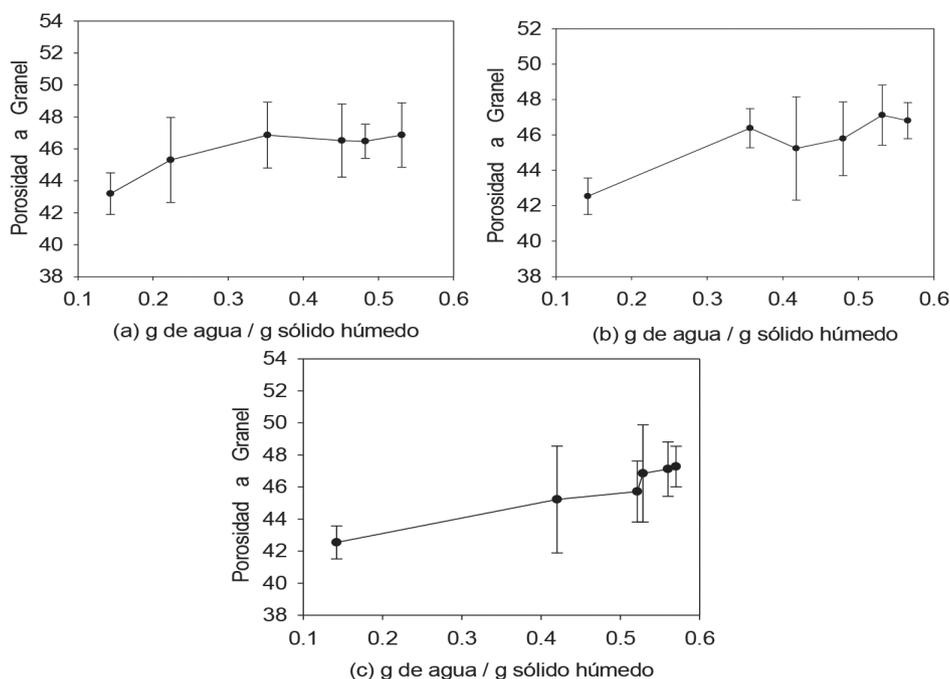
$$T^\circ 6\text{ °C}: DA = -0,366H + 0,809 \quad (R^2 = 0,9523)$$

$$T^\circ 18\text{ °C}: DA = -0,395H + 0,835 \quad (R^2 = 0,9572)$$

$$T^\circ 30\text{ °C}: DA = -0,406H + 0,842 \quad (R^2 = 0,9686)$$

**Porosidad.** En la figura 6, se evidencia aumento de la porosidad al incrementar la hume-

dad de los materiales, evidenciando diferencias significativas entre las medidas iniciales y las finales de cada tratamiento ( $p < 0,05$ ). Al comparar los tratamientos al final de la rehidratación: 6 °C ( $46,804 \pm 1,016$ ), 18 °C ( $46,863 \pm 2,011$ ) y 30 °C ( $47,273 \pm 1,268$ ), no se evidenciaron diferencias significativas ( $p = 0,750$ ). En el mismo sentido, no se encontró correlación conforme aumentó la humedad  $R^2 < 0,6$ , para las tres temperaturas.



**Figura 6. Efecto de la humedad sobre la porosidad a granel: (a) rehidratación 6 °C; (b) rehidratación temperatura ambiente 18 °C; (c) rehidratación 30 °C**

## Discusión

La absorción de agua durante la operación de rehidratación evidenció velocidades mayores al inicio, para luego disminuir gradualmente hasta el valor de equilibrio. Según Marín et al. (2006, 3), este fenómeno se debe a que todos los espacios intercelulares o intracelulares quedan saturados con agua; sin embargo, no se alcanzó la humedad de la arveja en estado fresco. Salimi, Maghsoudlou y Jafari (2011, 252) explican este fenómeno, afirmando que la operación de rehidratación depende de cambios estructurales en los tejidos o células del material alimentario, que se dan durante el secado, operación que ocasiona la contracción y el colapso de los mismos, reduce la capacidad de absorción de agua e impide de este modo la completa rehidratación. En el mismo sentido, se evidenció que a menor temperatura, la humedad en equilibrio alcanzada fue menor; resultados similares reportan Zambrano, Rodríguez y Álvarez (2007, 50); Fernández, Gruintal, Hernández, et al. (2007, 8) y Melquíades et al. (2009, 68), siendo la absorción de agua facilitada a mayores temperatura (Calzetta, Aguerre

y Suárez, 2006, 249; Bello, Tolaba y Suarez, 2007, 315; Salimi, Maghsoudlou y Jafari, 2011, 251).

Con respecto a las propiedades físicas, los resultados del **peso de mil semillas** coinciden con los presentados por Yacin et al. (2007, 732), en semillas de arveja variedad Bolero, y con los reportados por Paksoy y Aydin (2006, 28), para la variedad Ronda, con incrementos lineales al aumentar el contenido de humedad. En cuanto a la **esfericidad**, los resultados a temperatura de rehidratación de 6 °C son similares a los presentados por Yacin et al. (2007, 733); en semillas de arveja, para un rango de humedad de entre 14 y 35 % base húmeda, existiría una correlación lineal de aumento de la esfericidad. Sin embargo, contenidos de humedad superiores ocasionan disminuciones de este valor; Zewdu y Solomon (2007, 60) reportaron una disminución del valor de la esfericidad en semillas de Tef; sin embargo, conforme las semillas se rehidrataron por encima de un 15 % de humedad (base húmeda) el valor de la esfericidad aumentó; pese a ello no se llegó al valor inicial. Resultados similares se reportan en esta investigación (figura 3).

Aun así, no se evidenciaron cambios significativos entre los valores iniciales y los finales; efectos similares reportan Altuntas, Ozgoz y Taser, (2005, 39) en semillas de fenogreco, Selvi, Pinar y Yesiloglu (2006, 609) en semillas de linaza, Cetin (2007, 356) en semillas de frijol y Rojas (2010, 83) en semillas de vitabosa, concluyendo que no hay cambios significativos en las proporciones de las dimensiones de las semillas conforme aumenta el contenido de humedad.

Según Marín et al. (2006, 3) los alimentos deshidratados en condiciones óptimas se deterioran menos en el proceso de rehidratación; lo anterior se explica debido a que la operación de secado de la arveja hasta valores del 16 756 % se realizó de forma natural en la planta (desección); posteriormente se utilizó un secador de bandejas para llevar la humedad a valores de 14 211 %, confirmando que esta forma fue adecuada. Asimismo, los resultados de **densidad real y aparente** son similares a los presentados por Yalcin et al. (2007, 734) en arveja, Zewdu y Solomon (2007, 60) en semillas de Teff, Coskuner y Karababa (2007, 413) en semillas de cilantro y Gharibzahedi, Etemad, Mirarab y Fos'hat (2010, 103) en piñas de pino, por Adejumo y Abayomi (2012, 18) en semillas de moringa; sin embargo, son contrarios a los presentados en semillas de arveja por Paksoy y Aydin (2006, 28), quienes evidenciaron que los valores de densidad real aumentaron conforme se incrementó la humedad. Igualmente, Reza y Reza (2010, 137) reportaron aumentos de este valor en semillas de girasol.

Pese a estas dos últimas afirmaciones, una explicación de la disminución de los valores de densidad real y/o aparente radica en que el agua va ocupando espacio dentro de la semilla; al ser la densidad del agua menor que la densidad de la semilla, la densidad de esta se acercará a la del agua (Rojas, 2010, 88).

Respecto al uso de los resultados obtenidos, Ordóñez, Gely y Pagano (2012, 154) mencionan que la densidad aparente permite determinar la capacidad de almacenamiento y la capacidad de los sistemas de transporte, mientras, que los datos de densidad real permitirán calibrar los equipos relacionados con la separación. Por último, los resultados de porosidad a granel coinciden con los presentados por Yal-

cin et al. (2007, 734) y Paksoy y Aydin (2006, 27) en semillas de arvejas, Zewdu y Solomon (2007, 61) en semillas de Teff, Kaleemullah y Gunasekar (2002, 336) en semillas de garbanzo y Gharibzahedi et al. (2010, 103) en piñas de pino; conforme aumenta el contenido de humedad la porosidad a granel aumenta.

Según Lewicki (1998, 83) en la rehidratación existen tres procesos simultáneos: la absorción de agua dentro del material deshidratado, la lixiviación de solutos y el hinchamiento del material. Este último provoca un cambio en el volumen del producto (aumentando de tamaño); si se tiene en cuenta que el valor de la porosidad depende de la forma y la distribución de tamaños de las partículas, de la relación entre el diámetro de las partículas y del diámetro del lecho, así como del método utilizado para formar el lecho de partículas (McCabe, Smith y Harriott, 1991, 157-158), se explica el porqué de la disminución de este valor, conforme aumentó la humedad de las semillas.

Las anteriores afirmaciones permiten inferir la importancia de las propiedades citadas en el campo agroindustrial, considerando el caso de las arvejas rehidratadas en conserva, definidas como un producto que se elabora a partir de semillas secas, las cuales deben ser envasadas en un recipiente apto, con un medio de cobertura apropiado y sometido a esterilización para asegurar su conservación (NTC 4434). Al reflexionar sobre un recipiente (lata), de volumen 250 cm<sup>3</sup>, el cual necesita ser llenado con 160 g de arveja, se podría afirmar que al rehidratar las semillas para posterior esterilización y enlatado, la humedad es de gran importancia. Si esta aumenta, el peso de las semillas aumentará; por consiguiente se tendría menor número de semillas para alcanzar el objetivo deseado; sin embargo, en el recipiente se tendría menos masa por unidad de volumen, atribuida a la humedad de las semillas, ocasionando disminución en la densidad real, en la densidad aparente y en el aumento de la porosidad. Sin embargo, es necesario realizar estudios de enlatados y posterior esterilización debido a que la temperatura, como se mencionó, favorece la rehidratación, lo que afecta nuevamente las propiedades citadas, y ocasiona que el mecanismo de transferencia de calor por efecto de las propiedades se vea modifi-

cado (Jiménez, González, Botelloz, Navarrete, 2005, 11), por lo que es necesario encontrar el nivel adecuado antes de esta operación.

## Conclusiones

Se determinó influencia significativa de la temperatura sobre las constantes cinéticas de velocidad de rehidratación: la constante (k) aumentó en un 8,795 % entre 6 °C y 18 °C, y un 79,982 % de entre 6 °C y 30 °C.

Se determinó que la variación del contenido de humedad de las semillas de arveja afecta significativamente las propiedades físicas estudiadas (peso de mil semillas, densidad real, densidad aparente y porosidad), mientras que en la propiedad esfericidad no se evidenciaron cambios significativos. El conocimiento de estas propiedades proporciona datos de ingeniería, para el diseño de equipos y procesos.

Se recomienda evaluar el efecto de diferentes niveles de rehidratación sobre las propiedades físicas, durante la esterilización y enlatado de arveja.

## Referencias bibliográficas

- Adejumo, B. y Abayomi, D. (2012). Effect of Moisture Content on Some Physical Properties of *Moringa Oleifera* Seed. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 1(5),12-21.
- Alasino, M.; Andrich, O.; Sabbag, N.; Costa, S.; De La Torre, M. y Sánchez, H. (2008). Panificación con harina de arvejas (*Pisum sativum*) previamente sometidas a inactivación enzimática. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 58(4), 397-402.
- Altuntas, E. (2008). Some physical properties of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) and watermelon (*Citrullus anatus* L.) seeds. *Tarim Bilimleri Dergisi*, 14(1), 62-69.
- Altuntas, E.; Ozgoz, E.; y Taser, F. (2005). Some physical properties of fenugreek (*Trigonella foenum-graceum* L.) seeds. *Journal of Food Engineering*, 71, 37-43.
- Barac, M.; Cabrilo, S.; Pesi, C.; Stanojevic, S.; Zilic, S.; Macej, O. y Ristic, N. (2010). Profile and Functional Properties of Seed Proteins from Six Pea (*Pisum sativum*) Genotypes. *International Journal. Molecular Sciences*, 11, 4973-4990.
- Bello, M.; Tolaba, M.; y Suarez, C. (2007). Water absorption and starch gelatinization in whole rice grain during soaking. *Journal Food Sciences and Technology*, 40, 313-318.
- Bernal De R. I. (1998). *Análisis de alimentos*. 3ª ed. Bogotá: Guadalupe LTDA.
- Brousse, M.; Nieto, A.; Linares, A. y Vergara, M. (2012). Cinética de adsorción de agua en purés deshidratados de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3(1), 080-096.
- Calzetta, A.; Aguerre, R. y Suarez, C. (2006). Hydration kinetics of amaranth grain. *Journal of Food Engineering*, 72(3), 247-253.
- Cetin, M. (2007). Physical properties of barbutia bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Barbutia) seed. *Journal of Food Engineering*, 80, 353-358.
- Coskuner, Y. & Karababa, E. (2007). Physical properties of coriander seeds (*Coriandrum sativum* L.). *Journal of Food Engineering*, 80, 408-416.
- Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas, FENALCE. (2010). *El cultivo de la arveja, historia y su importancia*. Recuperado de [http://www.fenalce.org/arch\\_public/arveja93.pdf](http://www.fenalce.org/arch_public/arveja93.pdf).
- Fernández, J.; Gruintal, M.; Hernández, I.; San Martín, E.; Calderón, A.; Díaz, J. y Aguilar, M. (2007). Modelo matemático de la cinética y velocidad de hidratación del grano de maíz blanco dentado durante la cocción alcalina. *Superficies y Vacío*, 20(4), 4-9.
- Gharibzahedi, S.; Etemad, V.; Mirarab-Razi, J. y Fos'hat, M. (2010). Study on some engineering attributes of pine nut (*Pinus pinea*) to the design of. *Journal of Agricultural Engineering*, 56(3), 99-106.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1998). *Norma Técnica Colombiana NTC (4434)- Arvejas (guisantes) rehidratadas en conserva*. Bogota: ICONTEC, pp. 1-4.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2004). *Norma Técnica Colombiana NTC (791)- Arvejas Secas: Especificaciones*. Bogotá: ICONTEC, pp. 1-4.
- Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá, GT-INCAP. (2012). *Tabla de Composición de Alimentos*. 2ª ed. Guatemala: INCAP. 29 p.

- Jiménez, H.; González, L.; Botelloz, J. y Navarrete, J. (2005). Estudio numérico de la esterilización térmica de alimentos líquidos enlatados que contienen partículas empleando el enfoque de medio poroso. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 4(1), 1-23.
- Kaleemullah, S. y Gunasekar, J. (2002). Moisture-dependent physical properties of arecanut kernels. *Biosystems Engineering*, 82(3), 331-338.
- Lewicki, P. (1998). Some remarks on rehydration of dried foods. *Journal Food Engineering*, 36, 81-87.
- Ligarreto, G. y Ospina, A. (2009). Análisis de parámetros heredables asociados al rendimiento y precocidad en arveja voluble (*Pisum sativum* L.) tipo Santa Isabel. *Agronomía Colombiana*, 27(3), 333-339.
- Marín, B.; Lemus, M.; Flores, M. y Vega, G. (2006). La rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista Chilena de Nutrición*, 33(3), 1-13.
- McCabe, W.; Smith, J. y Harriott, P. (1991). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.
- Melquíades, Y; López, C. y Rosas M. (2009). Estudio de la cinética de rehidratación de zanahoria (*Daucus Carota*) deshidratadas. *Información Tecnológica*, 20(3), 65-72.
- Mohsenin, N. (1970). *Physical properties of plant and animal materials*. New York: Gordon and Breach Science Publishers.
- Ordóñez, M.; Gely, M. y Pagano, A. (2012). Estudio de las propiedades físicas y de la cinética de secado de granos de maíz colorado duro. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 3(3), 153-171.
- Osorio, L. y Castaño, M. (2011). Caracterización del agente causante de la pudrición de raíces de la arveja (*Pisum sativum* linneo), enfermedad endémica en el municipio de Manizales Caldas (Colombia). *Revista Agronomía*, 19(2), 33-43.
- Paksoy, M. y Aydin, C. (2006). Determination of some physical and mechanical properties of pea (*Pisum sativum* L.) seeds. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 9(1), 26-29.
- Pradhan, R.; Said, P. y Singh, S. (2013). Physical properties of bottle gourd seeds. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(1), 106-113.
- Reza, S. y Reza. A. (2010). Moisture-dependent physical properties of sunflower seed (SHF8190). *Modern Applied Science*, 4 (7), 135-143.
- Rojas, A. (2010). Caracterización físico-mecánica de la semilla de vitabosa (*Mucunadeeringiana*). [Trabajo de Investigación Magíster en Ciencia y Tecnología de Alimentos]. Medellín (Colombia): Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 83 p.
- Salimi, A.; Maghsoudlou, Y. & Jafari, S. (2011). Effect of water temperature, variety and shelf life on rehydration kinetics of microwave dried potato cubes. *Latin American Applied Research*, 41, 249-254
- Selvi, C.; Pinar, Y. y Yesiloglu, E. (2006). Some Physical Properties of Linseed. *Biosystems Engineering*, 95 (4), 607-612.
- Sessiz, A.; Esgici, R. y Kizil, S. (2007). Moisture-dependent physical properties of caper (*Capparis* spp.) fruit. *Journal of Food Engineering*, 79, 1426-1431.
- Sharma, V.; Das, R.; Pradhan, S.; Naik, N.; Bhatnagar. & Kureel, R. (2011). Physical properties of tung seed: an industrial oil yielding crop. *Industrial Crops and Products*, 33(2), 440-444.
- Singh, K. & Goswami, T. (1996). Physical Properties of Cumin Seed. *Journal Agricultural Engineering Research*, 64, 93-98.
- Yalcin, I.; Ozarlan, C. y Akba, T. (2007). Physical properties of pea (*Pisum sativum*) seed. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 731-735.
- Zambrano, M.; Rodríguez, D. y Álvarez, A. (2007). Estudio Cinético y de Superficie de Respuesta para la Rehidratación de Zanahorias (*Daucus carota*) Liofilizadas. *Información Tecnológica*, 18(4), 47-56.
- Zamorano, C.; López, H. y Alzate, G. (2008). Evaluación de la competencia de arvenses en el cultivo de arveja (*Pisum sativum*) en Fusagasugá, Cundinamarca (Colombia), *Revista Agronomía Colombiana*, 26(3), 443-450.
- Zewdu, A. y Solomon, W. (2007). Moisture-dependent physical properties of teff seed. *Biosystems Engineering*, 96(1), 57-63.