



Tomado de: <http://bancodegermoplasma.catie.ac.cr/img/fabaceae/phaseolus-vulgaris-banner.jpg>

Modelación matemática de las cinéticas de hidratación a diferentes temperaturas de cuatro variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L) producidas en México

Mathematical modeling of hydration kinetics at different temperatures of four bean (*Phaseolus vulgaris* L) varieties produced in Mexico

José Armando Ulloa^{1*}

Petra Rosas-Ulloa¹

José Carmen Ramírez-Ramírez²

Blanca Estela Ulloa-Rangel³

RESUMEN

La absorción de agua en las leguminosas durante el remojo afecta las subsecuentes operaciones de procesamiento y la calidad de producto final. Por ello, el modelado de transferencia de agua en las semillas durante el remojo resulta importante. En este trabajo se estudiaron las cinéticas de absorción de agua en frijol (*Phaseolus vulgaris* L), de las variedades Azufrado, Peruano bola, Mayacoba y Canario, a tres temperaturas (25 °C, 40 °C y 55 °C), a través de los modelos de Peleg y Sigmoidal. El tiempo para lograr el contenido de humedad de equilibrio dependió de la variedad de frijol y la temperatura de remojo, el cual puede reducirse desde un 45.5 %

(Peruano bola), hasta un 60.9 % (Canario), elevando la temperatura de remojo de 25 °C a 55 °C. De acuerdo a los indicadores estadísticos de coeficiente de determinación, raíz cuadrada del error medio y chi-cuadrada, el modelo con mejor calidad de ajuste en la generalidad de las variedades y temperaturas de remojo fue el de Peleg. Los valores de k_1 del modelo de Peleg para las distintas variedades de frijol estudiadas contra el recíproco de la temperatura se ajustaron adecuadamente a la ecuación de Arrhenius ($R^2 = 0.9190 - 0.9980$). La energía de activación para la hidratación varió de 18.41 kJ / mol⁻¹ a 50.18 kJ / mol⁻¹, según la variedad de frijol. Los resultados obtenidos podrían ser útiles

***Autor para correspondencia:**
arulloa5@gmail.com

Fecha de recepción:
10 de septiembre de 2014

Fecha de aceptación:
14 de julio de 2015

en futuros trabajos para el desarrollo de productos, propiedades de alimentos y diseño de procesos de la industria del procesamiento de frijol.

PALABRAS CLAVE: frijol, cinéticas de hidratación, modelación matemática, modelo de Peleg.

ABSTRACT

Water uptake of legumes during soaking affects subsequent processing operations and the finished product quality. Therefore, the modeling of water transfer in seeds during soaking is very important. In this work, kinetics of water absorption for Azufrado, Peruano bola, Mayacoba, and Canario bean varieties at three temperatures (25 °C, 40 °C and 55 °C) were studied. The time to achieve the equilibrium moisture content depended on bean variety and soaking temperature, which could be reduced from 45.5 % (Peruano bola) to 60.9 % (Canario) increasing the soaking temperature from 25 °C to 55 °C. According to the statistical indicators of determination coefficient, root mean square error, and chi-square, the model with the best fit in the generality of the bean varieties and soaking temperatures was the Peleg's model. The k_1 values of Peleg's model for the studied bean varieties versus the reciprocal of the temperature were fitted to the Arrhenius equation ($R^2 = 0.9190 - 0.9980$). The values of activation energy for hydration ranged from 18.41 kJ / mol⁻¹ to 50.18 kJ / mol⁻¹ depending on bean variety. The obtained results in this study could be useful for further research on product development, food properties and process design of the bean processing industry.

KEYWORDS: bean, hydration kinetics, mathematical modeling, Peleg's model.

INTRODUCCIÓN

El frijol es una de las leguminosas más importantes consumidas a nivel mundial y junto con el maíz, constituye la dieta básica para la mayoría de los mexicanos (Mimmo y col., 2013). Esta leguminosa es una buena fuente de carbohidratos, proteínas, fibra dietética (principalmente fibra insoluble), vitaminas y algunos minerales (Galllegos-Infante y col., 2010). Además, contiene

compuestos bioactivos, los cuales se han asociado con la prevención y/o regulación de enfermedades crónico degenerativas, tales como la obesidad, diabetes, enfermedad coronaria y cáncer (López y col., 2013; Araujo-Contreras y col., 2015). Por otra parte, el frijol se utiliza cada vez más como materia prima en el desarrollo de nuevos productos para diversificar su uso y proporcionar a los consumidores alimentos con alto valor nutracéutico y nutricional (Oomah y col., 2014).

El remojo es la primera etapa en el procesamiento del frijol, ya que a través de la hidratación se prepara a la semilla para su eficiente cocción, lo cual permitirá hacerla más comestible, inactivar anti-nutrientes lábiles al calor y favorecer la asimilación de sus proteínas y almidón (Mendoza y col., 2014). El conocimiento de la capacidad de absorción de agua de las leguminosas durante su remojo es de importancia práctica, porque tiene un efecto determinante en las posteriores operaciones de procesamiento y en la calidad del producto final. Existen varios modelos teóricos y empíricos que buscan relacionar el contenido de humedad con el tiempo de remojo, los cuales se basan en las leyes de difusión que describen la absorción de agua a través de ecuaciones complejas, que involucran muchas funciones y parámetros. En su lugar, se prefieren modelos empíricos que sean sencillos y permitan con facilidad la realización de cálculos (Piergiovanni, 2011), aunque estos no consideran el efecto de la temperatura. Sin embargo, a través de la ecuación de Arrhenius se puede comprobar la dependencia de la constante de velocidad de hidratación con respecto a la temperatura a la que se lleva a cabo dicho tratamiento.

La ecuación de Peleg (Ecuación 1), es el modelo empírico más usado para describir el fenómeno de hidratación en alimentos. Este consiste en un modelo de dos parámetros (k_1 y k_2), cuya función describe el cambio continuo de una cinética de primer orden (a $t \rightarrow 0$), a una cinética de cero orden (a $t \rightarrow \infty$). Sin embargo, aunque el modelo de Peleg es el más utilizado y describe adecuadamente las datos de hidratación de algunos productos, no puede describir la fase de retardo o latencia de hidratación de algunas semillas,

por lo que debe recurrirse a otros modelos como el Sigmoidal. El modelo Sigmoidal (Ecuación 2), está caracterizado por una fase lag o estacionaria inicial, seguida por una fase de alta tasa de absorción y finalmente, por una fase estacionaria, usando tres parámetros (Leal-Oliveira y col., 2013).

$$M(t) = M_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 \cdot t} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde $M(t)$ es el contenido de humedad (%) a un tiempo t (min); M_0 es el contenido inicial de humedad (%); k_1 es la constante de velocidad ($\text{min } \%^{-1}$); y k_2 es la constante de capacidad ($\%^{-1}$)

$$M(t) = \frac{M_{eq}}{1 + \exp[-k_1 \cdot (t -)]} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde $M(t)$ es el contenido de humedad (%) a un tiempo t (min); M_{eq} es el contenido de humedad de equilibrio (%); k (min^{-1}) es la constante de velocidad de rehidratación; y t (min) es el tiempo necesario para conseguir la rehidratación media, (50 %) de las semillas.

Existen pocos trabajos reportados en la literatura relacionados con la cinética de hidratación de diversas variedades de frijol consideradas como preferentes y muy preferentes en cuanto al consumo de la población mexicana (Rodríguez-Licea y col., 2010).

El objetivo de este trabajo fue evaluar las cinéticas de hidratación del frijol de las variedades Azufrado, Peruano bola, Mayacoba y Canario, todas ellas de amplia aceptación en México, y modelar su comportamiento en función de la temperatura, mediante los modelos de Peleg y Sigmoidal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Semillas de frijol y su preparación

Las semillas de frijol de las variedades: Azufrado, Peruano bola, Mayacoba y Canario, utilizadas en el presente estudio, se obtuvieron en el Mercado de Abastos de la ciudad de Tepic, Nayarit, México. Los lotes de frijol adquiridos se almacenaron en bolsas

de plástico, selladas herméticamente, a temperatura ambiente, en un cuarto oscuro, durante dos meses, hasta su utilización, previa eliminación de las semillas dañadas superficialmente, pequeñas o con separación de sus cotiledones. Las propiedades físicas de peso en 100 semillas, longitud, ancho, espesor, esfericidad, diámetro geométrico, y color en términos de L^* (luminosidad), a^* (tonalidad rojo a verde) y b^* (tonalidad amarillo a azul), de las muestras de las cuatro variedades de frijol: Azufrado, Peruano bola, Mayacoba y Canario, se analizaron de acuerdo a los métodos reportados por Lorestani y Ghari (2012), Ulloa y col. (2013). Previo a la hidratación, las semillas de frijol recibieron un tratamiento de escaldado en agua a 95 °C por 2 min, con la finalidad de reducir la resistencia que ofrece la cáscara a la absorción de agua.

Procedimiento de hidratación

El procedimiento de hidratación se realizó de acuerdo al método reportado por Araújo-da-Fonseca y col. (2011); Piergiovanni (2011). Se pesaron muestras de 10 gramos cada una y se remojaron en 200 mL de agua, a las temperaturas de 25 °C, 40 °C y 55 °C, usando un vaso de precipitado de 600 mL sumergido en un baño de agua con control de temperatura Marca Lauda modelo A24 (Leicester, Inglaterra). Se analizaron tres muestras por variedad de frijol en cada una de las temperaturas señaladas. A intervalos de 15 min, las semillas se removieron del agua, se drenaron, se secaron superficialmente con ayuda de papel absorbente, se pesaron y se regresaron al vaso de precipitado, repitiéndose esta operación hasta alcanzar el equilibrio. El contenido de humedad ($M[t]$), se calculó para cada periodo de tiempo (15 min), mediante un balance de masa, considerando la masa inicial de la muestra (m_0), la humedad inicial (M_0) y la masa obtenida en cada intervalo de tiempo. Los sólidos solubles del frijol difundidos al agua durante el remojo se despreciaron.

Modelado de las cinéticas de absorción de agua
Las cinéticas de hidratación de las semillas de frijol se generaron al graficar el agua absorbida (g agua/g sólidos secos) vs tiempo (min) y se evaluaron para cada temperatura estudiada

mediante el modelo de Peleg (Ecuación 1) y el modelo Sigmoidal (Ecuación 2).

El procedimiento de ajuste y las constantes de velocidad de hidratación, se determinaron por minimización de la suma de las diferencias cuadráticas, entre los valores observados y predichos por los modelos, usando el método de Newton, cuyo algoritmo de análisis numérico está fundamentado en la solución de ecuaciones de una variable con uso de derivadas (Phomkong y col., 2010), disponible en la aplicación Solver de la hoja de cálculo Excel 2010 (Microsoft Corporation Inc., New York, NY, USA).

La bondad de ajuste de los modelos matemáticos a los datos experimentales se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2), raíz cuadrada media del error (RCME) y chi-cuadrada (χ^2). Los valores más bajos de RCME y χ^2 , junto con el valor más alto de R^2 , se consideran como el mejor criterio de bondad de ajuste de los modelos utilizados (Cox y col., 2012).

Estimación de la energía de activación (E_a)

Para ilustrar el efecto de la temperatura en la rehidratación del frijol, se aplicó la ecuación de Arrhenius (Ecuación 3):

$$k = k_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde k (min [g b.s.(base seca)/g H₂O]) es la constante cinética relacionada con la absorción de agua, del modelo con mejor ajuste a los datos experimentales (Peleg o Sigmoidal), para la mayoría de las variedades de frijol estudiadas; k_0 (min [g b.s./g H₂O]) es la constante pre-exponencial; E_a es la energía de activación (kJ / mol⁻¹); R es la constante universal de los gases (8.31438·10⁻³ kJ / mol⁻¹ K⁻¹), y t es la temperatura de hidratación (K). El valor de E_a se determinó representando gráficamente el logaritmo natural de k , contra el recíproco de la temperatura (K).

Determinación de humedad

El contenido de humedad inicial de las muestras de frijol se determinó por secado en una estufa Marca Precision, Modelo PR305225M (Waltham,

Estados Unidos de América), a 103 ± 2 °C, hasta que se alcanzó un peso constante. Para cuantificar el peso se utilizó una balanza electrónica Marca Ohaus Modelo PA114C (Parsippany, Estados Unidos de América). La determinación de humedad para cada muestra se realizó por triplicado.

Análisis estadístico

Los resultados se expresaron como la media ± desviación estándar y se sometieron a un análisis de varianza y comparación múltiple de medias con el paquete estadístico Statgraphics Plus 5.0 (Rockville, Estados Unidos de América). El nivel de significancia entre las medias se estimó a $P \leq 0.05$ a través de la prueba de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran los resultados de las propiedades físicas de peso en 100 semillas: longitud, ancho, espesor, esfericidad, diámetro geométrico, y color, en términos de L^* , a^* y b^* de las cuatro variedades de frijol estudiadas. De acuerdo a los resultados obtenidos, la variedad Mayacoba presentó el mayor peso en 100 semillas y el mayor diámetro geométrico ($P < 0.05$), lo que indica que es una semilla más grande y de mayor densidad. El frijol Azufrado fue la semilla con menor peso y menor diámetro geométrico ($P < 0.05$), aunque esta diferencia fue muy pequeña con relación a las variedades Canario y Peruano bola. Las cuatro variedades mostraron valores de a^* ligeramente negativos, variando entre -0.63 y -1.16, en tanto que el parámetro b^* varió entre 8.51 y 11.40, lo que ubica a las cuatro variedades en el tono de los amarillos con matiz ligeramente verde, siendo la variedad Mayacoba la que presentó el valor de a^* más negativo (-1.87), lo que señala que muestra una tonalidad ligeramente más verde que las demás variedades, seguida del frijol Canario.

El efecto de la temperatura sobre la hidratación a través del tiempo, de las distintas variedades de frijol, así como su representación gráfica a través de los modelos de Peleg y Sigmoidal, se muestra en las Figuras 1 y 2, respectivamente. Las curvas de absorción de agua para el frijol, de las variedades Azufrado, Peruano bola y Mayacoba,

■ **Tabla 1. Algunas propiedades físicas del frijol.**
Table 1. Several physical properties of beans.

Propiedad física	Variedad de frijol			
	Azufrado	Peruano bola	Mayacoba	Canario
Peso en 100 semillas (g)	28.23 ± 0.21 ^a	30.27 ± 0.28 ^b	46.53 ± 0.39 ^c	29.55 ± 0.25 ^d
Longitud (cm)	1.10 ± 0.05 ^a	0.98 ± 0.08 ^a	1.26 ± 0.07 ^b	1.09 ± 0.07 ^a
Ancho (cm)	0.67 ± 0.03 ^a	0.67 ± 0.05 ^a	0.73 ± 0.05 ^b	0.68 ± 0.06 ^a
Espesor (cm)	0.45 ± 0.04 ^a	0.56 ± 0.04 ^b	0.61 ± 0.04 ^b	0.55 ± 0.04 ^b
Esfericidad	0.63 ± 0.02 ^a	0.74 ± 0.03 ^b	0.65 ± 0.03 ^a	0.71 ± 0.04 ^b
Diámetro geométrico (cm)	0.69 ± 0.03 ^a	0.72 ± 0.04 ^b	0.82 ± 0.04 ^c	0.72 ± 0.04 ^b
color:				
<i>L</i> [*]	86.02 ± 0.78 ^a	89.58 ± 0.80 ^b	88.23 ± 0.71 ^b	86.63 ± 1.15 ^a
<i>a</i> [*]	- 0.63 ± 0.49 ^a	- 0.98 ± 0.80 ^{ab}	- 1.87 ± 0.58 ^b	- 1.16 ± 0.76 ^{ab}
<i>b</i> [*]	11.40 ± 0.89 ^a	8.51 ± 1.68 ^b	10.02 ± 1.33 ^{ab}	10.83 ± 2.83 ^{ab}

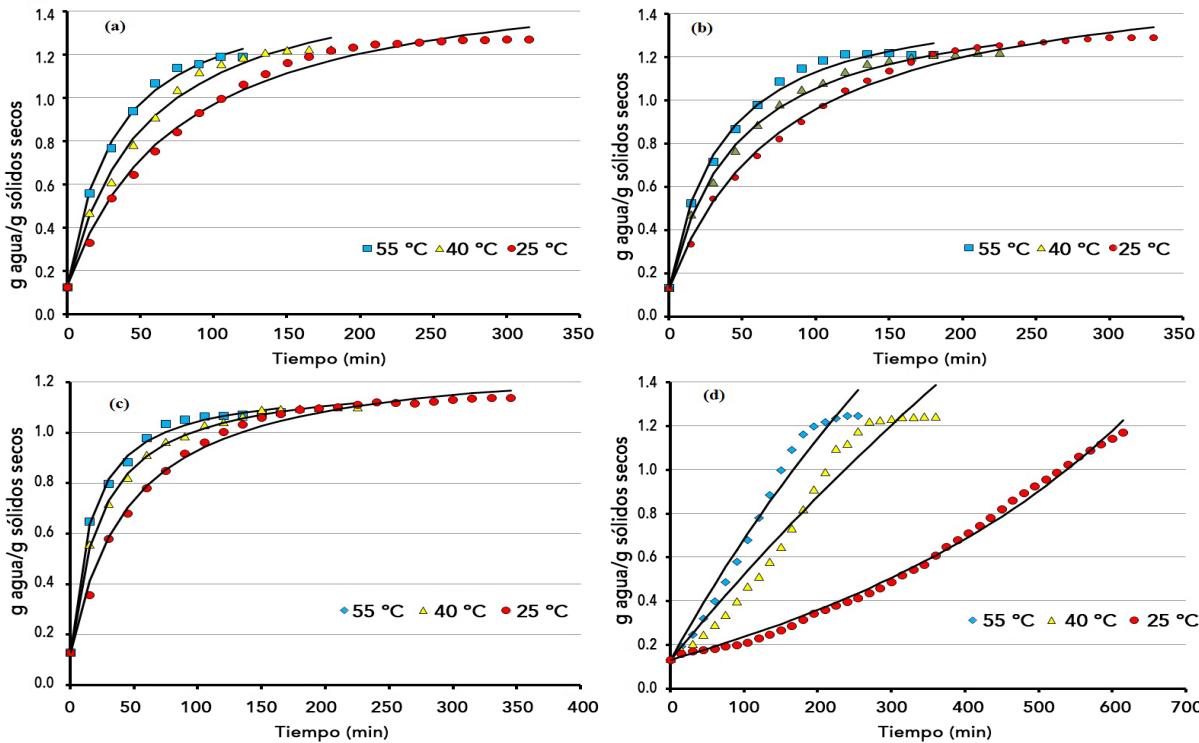
Los valores promedio para las distintas variedades, con la misma letra minúscula, no son significativamente diferentes a $P < 0.05$.

exhibieron una alta tasa inicial de absorción de agua, de 2.89×10^{-2} g agua/g sólidos secos (s.s.) min, 2.62×10^{-2} g agua/g s.s. min y 3.46×10^{-2} g agua/g s.s. min a 55 °C, respectivamente; de 2.24×10^{-2} g agua/g s.s. min, 2.27×10^{-2} g agua/g s.s. min y 2.86×10^{-2} g agua/g s.s. min a 40 °C; mientras que a 25 °C fueron de 1.37×10^{-2} g agua/g s.s. min, 1.34×10^{-2} g agua/g s.s. min y 1.51×10^{-2} g agua/g s.s. min, seguido de una tasa de absorción progresivamente más baja hasta llegar al equilibrio, lo cual ajusta adecuadamente al modelo de Peleg. Este comportamiento se ha encontrado en el garbanzo, que es otra leguminosa (Yildirim y col., 2010). En el caso del frijol Canario, la curva de hidratación mostró claramente una fase lag inicial, es decir, un periodo con baja tasa de absorción de agua de 0.34×10^{-2} g agua/g s.s. min a 55 °C, de 0.26×10^{-2} g agua/g s.s. min a 40 °C y de 0.17×10^{-2} g agua/g s.s. min a 25 °C, lo cual describe adecuadamente el modelo Sigmoidal, de manera más acentuada para la temperatura de 25 °C; dicho comportamiento se ha observado en ciertas variedades de frijol (Piergiovanni, 2011). El comportamiento de absorción de agua inicial de las semillas de frijol, podría estar relacionado con las características de su cubierta, la cual constituye una barrera de alta resistencia al fenómeno de transferencia de masa. Una vez que esta estructura externa se hidrata, su resistencia al

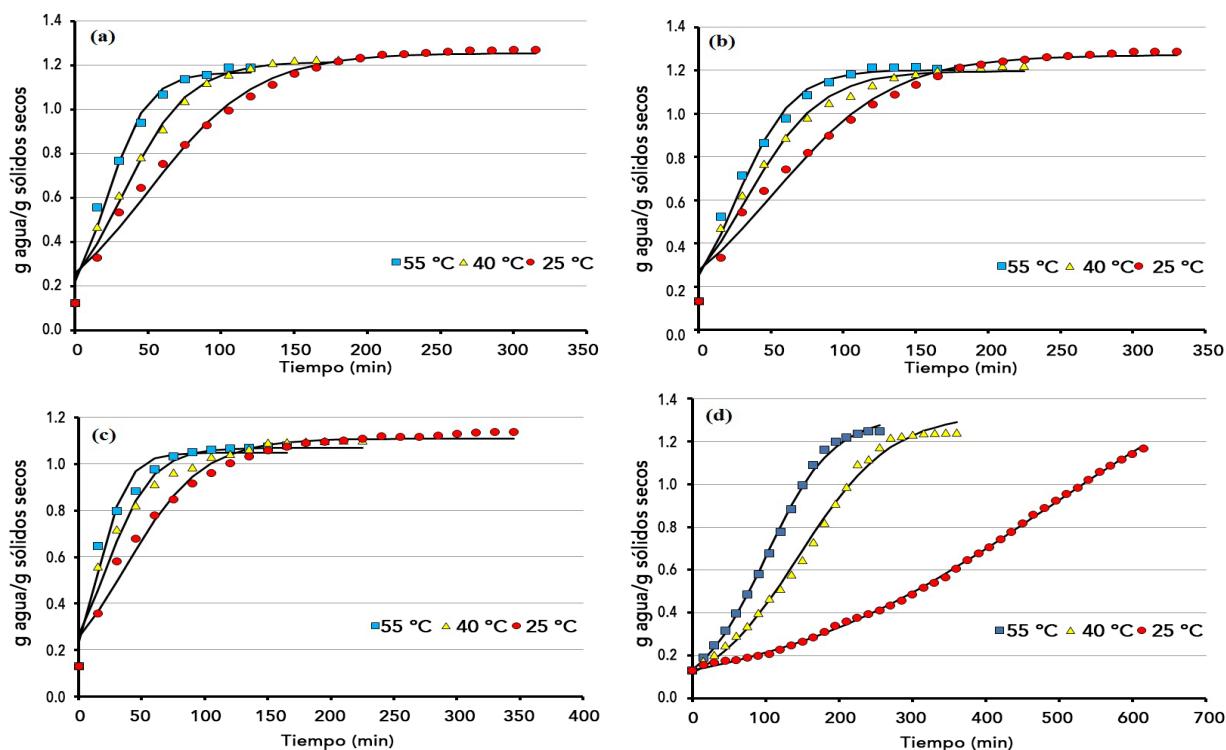
flujo de agua disminuye, incrementando la tasa de absorción de agua (Leal-Oliveira y col., 2013). Como pudo observarse en este trabajo, el tiempo para lograr la humedad de equilibrio por efecto de la temperatura dependió de la variedad de frijol, el cual se redujo en el frijol Peruano bola en un 45.5 % (de 330 min a 180 min), mientras que en el frijol Canario en un 60.9 % (de 615 min a 240 min), cuando la temperatura de remojo se elevó de 25 °C a 55 °C.

En las Tablas 2 y 3, se muestra el efecto de la temperatura en los parámetros cinéticos de absorción de agua de las distintas variedades de frijol, a través de los modelos de Peleg y Sigmoidal, así como los estadísticos para evaluar la bondad de ajuste de dichos modelos a los datos experimentales. La humedad de equilibrio experimental (M_{exp-eq}), disminuyó significativamente ($P < 0.05$) cuando la temperatura de hidratación aumentó de 25 °C a 55 °C para las variedades de frijol Azufrado y Peruano bola, mientras que para el frijol Mayacoba solamente cuando el aumento de temperatura fue de 25 °C a 40 °C, tal y como se ha observado en lentejas (Joshi y col., 2010); en cambio en el frijol Canario se observó un aumento significativo ($P < 0.05$) en la M_{exp-eq} solamente cuando la temperatura de hidratación aumentó de 25 °C a 40 °C.

■ Figura 1. Cinéticas de hidratación del frijol: (a) Azufrado; (b) Peruano bola; (c) Mayacoba y; (d) Canario, en función de la temperatura. Las líneas representan el modelo de Peleg.
Figure 1. Hydration kinetics of bean: (a) Azufrado; (b) Peruano bola; (c) Mayacoba and; (d) Canario, as function of the temperature. Lines represent the Peleg's model.



■ Figura 2. Cinéticas de hidratación del frijol: (a) Azufrado; (b) Peruano bola; (c) Mayacoba y (d) Canario, como función de la temperatura. Las líneas representan el modelo Sigmoidal.
Figure 2. Hydration kinetics of bean: (a) Azufrado; (b) Peruano bola; (c) Mayacoba and (d) Canario, as function of the temperature. Lines represent the Sigmoid model.



■ Tabla 2. Características de absorción de agua del frijol por efecto de la temperatura, de acuerdo al modelo de Peleg.

Table 2. Characteristics of water absorption of bean by effect of the temperature, following the Peleg's model.

Variedad	Parámetros cinéticos	Temperatura		
		25 °C	40 °C	55 °C
Azufrado	$M_{exp.eq}$ (g H ₂ O/g b.s.)	1.27 ± 0.01 ^{aA}	1.22 ± 0.01 ^{aB}	1.19 ± 0.01 ^{aC}
	M_{eq} (g H ₂ O/g b.s.)	1.33 ± 0.01 ^{bA}	1.28 ± 0.01 ^{bB}	1.27 ± 0.01 ^{bB}
	k_1 (min g b.s./g H ₂ O)	52.29 ± 0.21 ^A	36.05 ± 0.11 ^B	23.42 ± 0.09 ^C
	k_2 (g b.s./g H ₂ O)	0.67 ± 0.03 ^A	0.67 ± 0.02 ^A	0.72 ± 0.02 ^B
	R^2	0.990 6	0.989 8	0.999 9
	$RCME$	0.117 5	0.033 9	0.000 7
	χ^2	0.031 8	0.001 1	0.000 0
Peruano bola	$M_{exp.eq}$ (g H ₂ O/g b.s.)	1.29 ± 0.01 ^{aA}	1.22 ± 0.01 ^{aB}	1.21 ± 0.01 ^{aC}
	M_{eq} (g H ₂ O/g b.s.)	1.34 ± 0.01 ^{bA}	1.26 ± 0.01 ^{bB}	1.26 ± 0.01 ^{bB}
	k_1 (min g b.s./g H ₂ O)	54.25 ± 0.18 ^A	34.75 ± 0.13 ^B	26.33 ± 0.11 ^C
	k_2 (g b.s./g H ₂ O)	0.66 ± 0.01 ^A	0.73 ± 0.01 ^B	0.74 ± 0.01 ^B
	R^2	0.993 2	0.995 5	0.999 0
	$RCME$	0.026 8	0.020 9	0.030 8
	χ^2	0.000 7	0.000 5	0.001 1
Mayacoba	$M_{exp.eq}$ (g H ₂ O/g b.s.)	1.14 ± 0.01 ^{aA}	1.10 ± 0.01 ^{aB}	1.08 ± 0.01 ^{aB}
	M_{eq} (g H ₂ O/g b.s.)	1.17 ± 0.01 ^{bA}	1.12 ± 0.01 ^{aB}	1.10 ± 0.01 ^{aB}
	k_1 (min g b.s./g H ₂ O)	40.00 ± 0.13 ^A	22.38 ± 0.09 ^B	15.37 ± 0.10 ^C
	k_2 (g b.s./g H ₂ O)	0.85 ± 0.01 ^A	0.91 ± 0.01 ^B	0.93 ± 0.01 ^B
	R^2	0.992 8	0.998 2	0.999 6
	$RCME$	0.022 3	0.010 9	0.017 0
	χ^2	0.000 5	0.000 1	0.000 3
Canario	$M_{exp.eq}$ (g H ₂ O/g d.b.)	1.17 ± 0.01 ^{aA}	1.24 ± 0.01 ^{aB}	1.24 ± 0.01 ^{aB}
	M_{eq} (g H ₂ O/g d.b.)	1.23 ± 0.01 ^{bA}	1.38 ± 0.01 ^{bB}	1.36 ± 0.01 ^{bC}
	k_1 (min g d.b./g H ₂ O)	1 028.90 ± 4.35 ^A	244.43 ± 0.98 ^B	163.94 ± 0.68 ^C
	k_2 (g d.b./g H ₂ O)	- 0.76 ± 0.01 ^A	0.12 ± 0.01 ^B	0.17 ± 0.01 ^C
	R^2	0.994 7	0.971 5	0.992 9
	$RCME$	0.023 6	0.046 7	0.064 7
	χ^2	0.000 5	0.002 3	0.004 7

$M_{exp.eq}$ = contenido de humedad de equilibrio experimental; M_{eq} = contenido de humedad predicho por el modelo. Los valores promedio para una misma variedad a la misma temperatura, con la misma letra minúscula, no son significativamente diferentes a $P < 0.05$. Los valores promedio para una misma variedad, con la misma letra mayúscula a temperatura diferente, no son significativamente diferentes a $P < 0.05$.

■ Tabla 3. Características de absorción de agua del frijol por efecto de la temperatura, de acuerdo al modelo Sigmoidal.

Table 3. Characteristics of water absorption of bean by effect of temperature, following the Sigmoid model.

Variedad	Parámetros cinéticos	Temperatura		
		25 °C	40 °C	55 °C
Azufrado	$M_{exp,eq}$ (g H_2O /g b.s.)	1.27 ± 0.01 ^{aA}	1.22 ± 0.01 ^{aB}	1.19 ± 0.01 ^{aC}
	M_{eq} (g H_2O /g b.s.)	1.26 ± 0.01 ^{aA}	1.22 ± 0.01 ^{aB}	1.17 ± 0.01 ^{aC}
	k (10 ⁻² min ⁻¹)	2.71 ± 0.02 ^A	4.37 ± 0.03 ^B	6.92 ± 0.03 ^C
	t (min)	49.76 ± 2.30 ^A	32.04 ± 2.11 ^B	20.88 ± 1.95 ^C
	R^2	0.985 8	0.986 1	0.997 3
	$RCME$	0.038 9	0.039 7	0.049 5
	χ^2	0.001 7	0.002 1	0.0036 7
Peruano bola	$M_{exp,eq}$ (g H_2O /g b.s.)	1.29 ± 0.01 ^{aA}	1.22 ± 0.01 ^{aB}	1.21 ± 0.01 ^{aC}
	M_{eq} (g H_2O /g b.s.)	1.27 ± 0.01 ^{aA}	1.20 ± 0.01 ^{aB}	1.20 ± 0.01 ^{aB}
	k (10 ⁻² min ⁻¹)	2.45 ± 0.02 ^A	3.86 ± 0.03 ^B	5.13 ± 0.02 ^C
	t (min)	52.30 ± 2.90 ^A	32.30 ± 2.10 ^B	25.73 ± 1.80 ^C
	R^2	0.983 9	0.979 0	0.978 8
	$RCME$	0.041 4	0.045 0	0.047 2
	χ^2	0.002 0	0.002 5	0.002 9
Mayacoba	$M_{exp,eq}$ (g H_2O /g b.s.)	1.14 ± 0.01 ^{aA}	1.10 ± 0.01 ^{aB}	1.08 ± 0.01 ^{aC}
	M_{eq} (g H_2O /g b.s.)	1.11 ± 0.01 ^{bA}	1.07 ± 0.01 ^{bB}	1.05 ± 0.01 ^{bB}
	k (10 ⁻² min ⁻¹)	3.28 ± 0.02 ^A	5.38 ± 0.02 ^B	8.34 ± 0.03 ^C
	t (min)	36.72 ± 2.89 ^A	20.57 ± 1.95 ^B	14.78 ± 1.27 ^C
	R^2	0.977 9	0.955 8	0.954 9
	$RCME$	0.039 0	0.053 8	0.004 3
	χ^2	0.001 7	0.003 5	0.056 9
Canario	$M_{exp,eq}$ (g H_2O /g b.s.)	1.17 ± 0.01 ^{aA}	1.24 ± 0.01 ^{aB}	1.24 ± 0.01 ^{aB}
	M_{eq} (g H_2O /g b.s.)	1.18 ± 0.01 ^{aA}	1.29 ± 0.01 ^{bB}	1.28 ± 0.01 ^{bC}
	k (10 ⁻² min ⁻¹)	2.18 ± 0.01 ^{aA}	1.59 ± 0.01 ^{aB}	0.51 ± 0.01 ^{aC}
	t (min)	484.28 ± 14.50 ^A	145.26 ± 8.25 ^B	99.76 ± 6.20 ^C
	R^2	0.999 3	0.994 9	0.998 0
	$RCME$	0.008 0	0.028 7	0.017 7
	χ^2	0.000 0	0.000 9	0.000 3

$M_{exp,eq}$ = contenido de humedad de equilibrio experimental; M_{eq} = contenido de humedad predicho por el modelo. Los valores promedio para una misma variedad a la misma temperatura, con la misma letra minúscula, no son significativamente diferentes a $P < 0.05$. Los valores promedio para una misma variedad, con la misma letra mayúscula a temperatura diferente, no son significativamente diferentes a $P < 0.05$.

Por otra parte, el modelo de Peleg (Tabla 2), mostró una tendencia a sobreestimar significativamente ($P < 0.05$) la humedad de equilibrio predicha (M_{eq}) con respecto a los resultados experimentales obtenidos, en 4.72 %, 3.87 % y 5.13 % para las variedades de frijol Azufrado, Peruano bola y Canario, respectivamente, cuando la temperatura de hidratación fue de 25 °C; mientras que la sobreestimación de la M_{eq} fue del 4.91 %, 3.28 % y 11.29 %, a una temperatura de hidratación de 40 °C y del 6.72 %, 4.13 % y 9.67 % a 55 °C de temperatura de hidratación; en el caso del frijol de la variedad Mayacoba, solamente a la temperatura de hidratación de 25 °C; se observó una sobreestimación significativa ($P < 0.05$) en la M_{eq} del 2.63 %.

En el caso del modelo Sigmoidal (Tabla 3), no se observaron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre la $M_{exp,eq}$ y la M_{eq} en las variedades de frijol Azufrado y Peruano bola, a las temperaturas de hidratación de 25 °C, 40 °C y 55 °C, así como en el frijol Canario a la temperatura de hidratación de 25 °C. En cambio, en el frijol Mayacoba, el modelo Sigmoidal subestimó significativamente ($P < 0.05$) la M_{eq} con respecto a la $M_{exp,eq}$ en 2.63 %, 2.72 % y 2.77 %, a las temperaturas de hidratación de 25 °C, 40 °C y 55 °C, respectivamente, mientras que en el frijol Canario se observó una sobreestimación significativa ($P < 0.05$) del 4.03 % y 3.22 % a las temperaturas de hidratación de 40 °C y 55 °C, respectivamente.

En cuanto a los parámetros cinéticos k_1 y k_2 de los modelos de Peleg (Tabla 2) y Sigmoidal (Tabla 3), respectivamente, mostraron el comportamiento típico observado para otras semillas, de disminuir significativamente ($P < 0.05$) en el primer caso y de aumentar significativamente ($P < 0.05$) en el segundo caso, con el aumento de la temperatura de remojo, indicando tasas más altas de absorción de agua, debido a que se propicia una más baja viscosidad del fluido y la generación de poros más grandes en las semillas (Yildirim y col., 2010; Sobukola y Abayomi, 2011). Respecto al parámetro k_2 para el modelo de Peleg, el cual se sugiere que está relacionado con la capacidad máxima de absorción de agua o con la $M_{exp,eq}$, aumentó significativamente ($P < 0.05$), en el frijol de las

variedades Peruano bola y Mayacoba, Azufrado y Canario, cuando las temperaturas de hidratación se elevaron de 25 °C a 40 °C, de 40 °C a 55 °C y de 25 °C a 55 °C, respectivamente (García-Segovia y col., 2011). En relación al efecto de la temperatura sobre el valor t , para el modelo Sigmoidal (Tabla 3), se observaron reducciones significativas ($P < 0.05$), en todas las variedades de frijol estudiadas, desde el 50.8 % (Peruano bola), hasta el 79.4 % (Canario), cuando la temperatura de remojo se elevó de 25 °C a 55 °C.

En general, los valores de R^2 (0.9998 - 0.9999) fueron más altos y los de RCME y χ^2 más bajos para el modelo de Peleg en las variedades Azufrado, Peruano bola y Mayacoba (Tabla 3), mientras que esa misma condición se observó para el modelo Sigmoidal ($R^2 = 0.9949 - 0.9993$) en la variedad Canario, por lo que dichos modelos describen adecuadamente el comportamiento de absorción de agua a las temperaturas de 25 °C y 55 °C en las respectivas variedades de frijol.

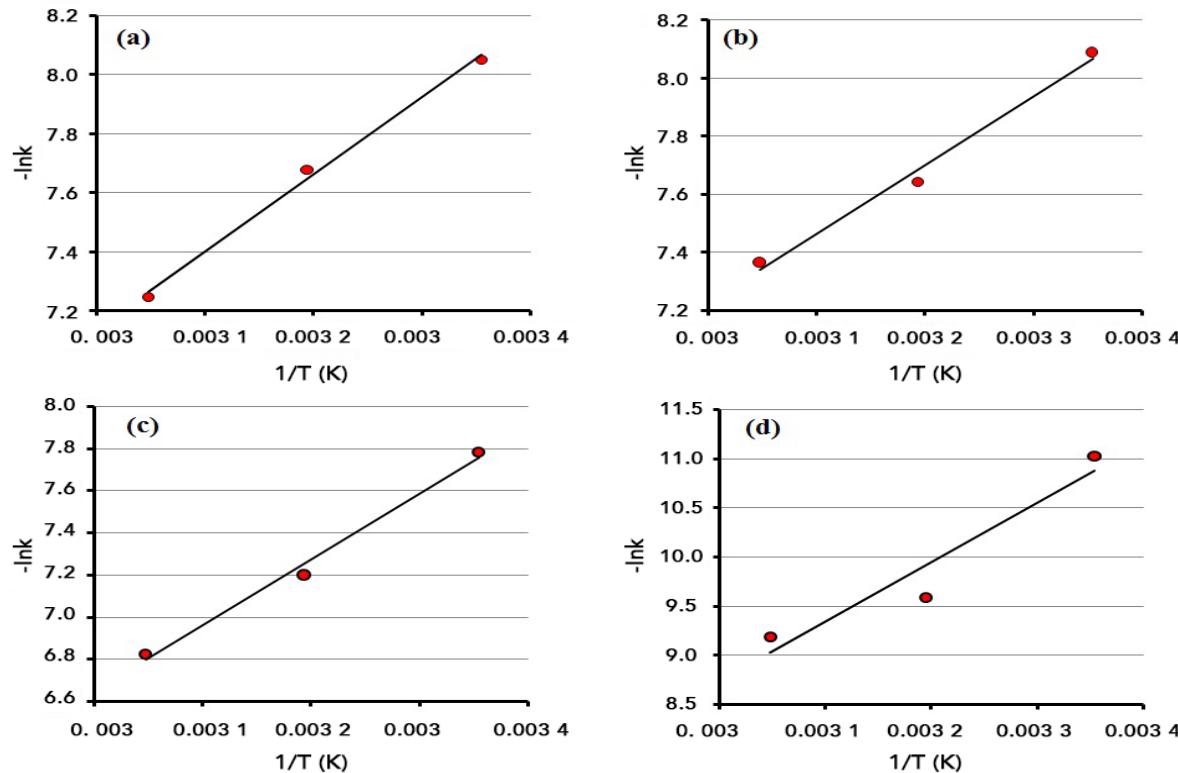
Los valores de k_1 del modelo de Peleg versus el recíproco de la temperatura (Figura 3), se ajustaron adecuadamente a la ecuación de Arrhenius, con valores de R^2 entre 0.9190 y 0.9980 (Tabla 4), dependiendo de la variedad de frijol. Los valores estimados de E_a para la hidratación de frijol, por efecto de la variedad, se muestran en la Tabla 4, siendo de 18.41 kJ / mol⁻¹, 19.65 kJ / mol⁻¹, 25.99 kJ / mol⁻¹ y 50.18 kJ / mol⁻¹, para Azufrado, Peruano bola, Mayacoba y Canario, respectivamente, los cuales se encuentran dentro del intervalo de los valores reportados para cereales y leguminosas, excepto para el frijol Canario (Sobukola y Abayomi, 2011). Lo anterior sugiere, que la sensibilidad de la difusividad por efecto de la temperatura en el frijol Canario es mayor a la de las otras variedades de frijol, dado su más alto valor de la E_a .

CONCLUSIONES

El modelo de Peleg obtuvo un mejor ajuste a los valores experimentales de hidratación, de acuerdo a los indicadores estadísticos de R^2 , RCME y χ^2 , para la generalidad de las variedades de frijol y temperaturas de remojo de 25 °C, 40 °C y 55 °C. El parámetro cinético k_1 del

Figura 3. Cinéticas de hidratación del frijol: (a) Azufrado; (b) Peruano bola; (c) Mayacoba y (d) Canario, como función de la temperatura. Las líneas representan el modelo Sigmoidal.

Figure 3. Hydration kinetics of bean: (a) Azufrado; (b) Peruano bola; (c) Mayacoba and (d) Canario, as function of the temperature. Lines represent the Sigmoid model.



■ Tabla 4. Energía de activación (E_a) de las distintas variedades de frijol.
Table 4. Activation energy (E_a) of the beans.

Variedad de frijol	E_a (kJ/mol ⁻¹)	R^2
Azufrado	18.41	0.995 0
Peruano bola	19.65	0.998 0
Mayacoba	25.99	0.990 0
Canario	50.18	0.919 0

modelo de Peleg mostró una disminución con el aumento de temperatura, indicando tasas más altas de absorción de agua, mientras que el parámetro de k_2 , que está relacionado con la capacidad máxima de absorción de agua, aumentó a una mayor temperatura de hidratación. Los resultados obtenidos podrían ser útiles para futuros trabajos en el desarrollo de productos, propiedades de

alimentos y diseño de procesos de la industria del procesamiento de frijol.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado para la realización del presente trabajo al Promep-SEP-Méjico mediante convenio 2649-UANCA-6.

REFERENCIAS

- Araújo-da-Fonseca, F. A., Soares-Junior, M. S., Caliari, M., Zaczuk-Bassinello, P., da-Costa-Eifert, E., and Mendoca-Garcia, D. (2011). Changes occurring during the parboiling of upland rice and in the maceration water at different temperatures and soaking times. *International Journal of Food Science and Technology*. 46(9): 1912-1920.
- Araujo-Contreras, J. M., Rivas-Avila, E., Avila-Rodríguez, A., Avila-Rodríguez, E. H., Vargas-Chávez, N., Reyes-Romero, M. A., & Camacho-Luis, A. (2015). Relación entre hipertensión arterial y obesidad central en madres de familia. *CienciaUAT*. 9(2): 50-55.
- Cox, S., Gupta, S., and Abu-Ghannam, N. (2012). Effect of different rehydration temperatures on the moisture, content of phenolic compounds, antioxidant capacity and textural properties of edible Irish brown seaweed. *LWT-Food Science and Technology*. 47(2): 300-307.
- Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzmán, N. E., González-Laredo, R. F., Ochoa-Martínez, L. A., Corzo, N., Bello-Pérez, L. A., Medina-Torres, L., and Peralta-Álvarez, L. E. (2010). Quality of spaghetti pasta containing Mexican common bean flour (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Chemistry*. 119(4): 1544-1549.
- García-Segovia, P., Andrés-Bello, A., and Martínez-Monzó, J. (2011). Rehydration of airdried Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) caps: Comparison of conventional and vacuum water immersion processes. *LWT - Food Science and Technology*. 44(2): 480-488.
- Joshi, M., Adhikari, B., Panozzo, J., and Aldred, P. (2010). Water uptake and its impact on the texture of lentils (*Lens culinaris*). *Journal of Food Engineering*. 100(1): 61-69.
- Leal-Oliveira, A., Gouveia-Colnaghi, B., Zucattida-Silva, E., Romão-Gouvêa, I., Lopes-Vieira, R., and Duarte-Augusto, P. E. (2013). Modelling the effect of temperature on the hydration kinetic of adzuki beans (*Vigna angularis*). *Journal of Food Engineering*. 118(4): 417-420.
- López, A., El-Naggar, T., Dueñas, M., Ortega, T., Estrella, I., Hernández, T., Gómez-Serranillos, M. P., Palomino, O. M., and Carretero, M. E. (2013). Effect of cooking and germination on phenolic composition and biological properties of dark bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Chemistry*. 138(1): 547-555.
- Lorestani, A. N. and Ghari, M. (2012). Mass modeling of Fava bean (*Vicia faba*) with some physical characteristics. *Scientia Horticulturae*. 133: 6-9.
- Mendoza, F. A., Cichy, K., Lu, R., and Kelly, J. D. (2014). Evaluation of canning quality traits in black beans (*Phaseolus vulgaris* L) by visible/near-infrared spectroscopy. *Food and Bioprocess Technology*. 7(9): 2666-2678.
- Mimmo, T., Ghizzi, M., Cesco, S., Tomasi, N., Pinton, R., and Puschenreiter, M. (2013). Aluminium-phosphate interactions in the rhizosphere of two bean species: *Phaseolus lunatus* L and *Phaseolus vulgaris* L. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 93(15): 3891-3896.
- Oomah, B. D., Kotzeva, L., Allen, M., and Basinello, P. Z. (2014). Microwave and micronization treatments affect dehulling characteristics and bioactive contents of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 94(7): 1349-1358.
- Piergiovanni, A. R. (2011). Kinetic of water adsorption in common bean: consideration on the suitability of Peleg's model for describing bean hydration. *Journal of Food Processing and Preservation*. 35(4): 447-452.
- Phomkong, W., Soponronnarit, S., and Thammarutwasik, P. (2010). Chemical pretreatments affecting drying characteristics of chilli (cv. *Huarou Yon*). *Drying Technology*. 28(12): 1466-1476.
- Rodríguez-Licea, G., García-Salazar, J. A., Rebolilar-Rebollar, S. y Cruz-Contreras, A. C. (2010). Preferencias del consumidor de frijol (*Phaseolus vulgaris* L) en México: factores y características que influyen en la decisión de compra diferenciada por tipo y variedad. *Paradigma Económico*. 2(1): 121-145.
- Sobukola, O. P. and Abayomi, H. T. (2011). Physical properties and rehydration characteristics of different varieties of maize (*Zea mays* L) and cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) seeds. *Journal of Food Processing and Preservation*. 35(3): 299-307.
- Ulloa, J. A., Bonilla-Sánchez, C. R., Ortiz-Jiménez, M.A., Rosas-Ulloa, P., Ramírez-Ramírez, J. C., and Ulloa-Rangel, B. E. (2013). Rehydration properties of precooked whole beans (*Phaseolus vulgaris* L) dehydrated at room temperature. *CYTA-Journal of Food*. 11(1): 94-96.
- Yildirim, A., Oner, M. D., and Bayram, M. (2010). Modeling of water absorption of ultrasound applied chickpeas (*Cicer arietinum* L) using Peleg's equation. *Journal of Agricultural Sciences*. 16: 278-286.