

# CINÉTICA DE REHIDRATACIÓN DE ANANÁ PRE-SECADO CON AIRE CALIENTE

RAMALLO L. A.<sup>1</sup>; MASCHERONI, R. H.<sup>2</sup>

**1. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales - Universidad Nacional de Misiones**

**Félix de Azara 1552 - (3300) Posadas, Misiones - Argentina**

**E-mail: [lram@fceqyn.unam.edu.ar](mailto:lram@fceqyn.unam.edu.ar)**

**2. CIDCA (CONICET-CCT La Plata y U.N.L.P.) y MODIAL (FI - U.N.L.P.)**

**47 y 116 – (1900) La Plata - Argentina**

## Resumen

Se estudió el comportamiento de rehidratación de ananá previamente secado con aire caliente. Medias rodajas de ananá de 0.6 cm de espesor fueron deshidratadas en un secadero de flujo transversal, con velocidad de aire de 1.5 m/s a tres temperaturas diferentes (45, 60 y 75°C). La rehidratación se llevó a cabo en agua a 20 y 40°C. Se aplicó la ecuación de Page para modelar la cinética de ganancia de agua durante el proceso de rehidratación. Este modelo empírico describe apropiadamente el proceso, con valores del error promedio porcentual de la estimación en el rango de 2.6 a 4.1. El parámetro K del modelo aumenta con la temperatura de rehidratación y disminuye con la temperatura del pre-tratamiento de secado. De modo análogo, el grado de recuperación del producto medido a través del parámetro COR disminuye con la temperatura del proceso de secado.

## 1. Introducción

La rehidratación es un proceso complejo dirigido a restaurar las propiedades estructurales originales del material fresco (previo al secado o deshidratado) poniendo en contacto el producto seco con agua. No obstante se ha demostrado que la habilidad de rehidratación presenta una histéresis debido a la disrupción estructural y celular que tiene lugar durante el proceso de deshidratación (Krokida & Philippopoulos, 2005).

Existen numerosos trabajos científicos donde los autores miden la habilidad de rehidratación del material seco; sin embargo no hay consistencia en el procedimiento aplicado para caracterizarla ni en la nomenclatura utilizada en los diferentes trabajos (Lewicki, 1998).

En algunos alimentos tales como las frutas secas para desayuno, la velocidad de rehidratación es de vital importancia en la valoración de calidad. El estudio de la cinética de rehidratación puede ser muy útil para el diseño y optimización de este proceso. Algunos autores modelaron el proceso de rehidratación considerándolo un fenómeno difusional descrito por la 2da Ley de Fick (Sanjuán y col., 1999). Krokida & Marinos-Kouris (2003) estudiaron la cinética de rehidratación de numerosas frutas y vegetales sobre la base de considerar que la ganancia de agua sigue una cinética de primer orden. Otros autores han aplicado modelos empíricos para describir el proceso (García-Pascual y col., 2006; Calzetta Resio y col., 2006).

Los procesos de deshidratación, especialmente el secado, *per se* provocan muchos cambios en la estructura y composición del tejido vegetal (McMinn & Mague, 1997a,b) El deterioro de los atributos fisico-químicos del sistema puede ser evaluado sobre la base de las características de rehidratación.

De los datos encontrados en la literatura se puede observar que el grado y la velocidad de rehidratación dependen de las condiciones del proceso de deshidratación, de la naturaleza y composición del vegetal y de las condiciones de rehidratación (McMinn & Magee, 1997a; Krokida & Marinos-Kouris, 2003; Khaisheh y col., 2004).

En el presente trabajo se pretende evaluar el efecto de la temperatura del proceso de secado sobre la velocidad y la capacidad de rehidratación de ananá.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Preparación de la muestra. Secado

Se trabajó con frutas de *Ananas Comosus* variedad *Cayena Lisa*. Las frutas fueron cortadas en medias rodajas de  $0.60 \pm 0.05$  cm de espesor y  $11.5 \pm 0.5$  cm de diámetro; con un sacabocados se les retiró el centro.

Los ensayos de secado se realizaron en un secadero de flujo transversal bajo condiciones constantes de velocidad de aire (1.5 m/s) y temperatura (45, 60, 75°C). En cada ensayo, las rodajas de ananá se colocaron dentro de cestas de aluminio evitando el contacto entre los trozos de fruta.

### 2.2 Determinación del contenido de agua

El contenido de agua se cuantificó mediante la pérdida de peso por desecación en estufa de a 70 °C hasta pesada constante (aproximadamente 48 horas).

### 2.3 Metodología experimental de la rehidratación

Los ensayos de rehidratación se realizaron sobre medias rodajas de ananá al final del proceso de secado, cuando el contenido de agua fue de aproximadamente 80% b.s. Cada muestra (una media rodaja de ananá deshidratado) se colocó en un vaso de precipitado conteniendo 150 ml de agua desmineralizada a una de las temperaturas previstas para los ensayos (20 ó 40°C); el recipiente se colocó sobre el plato termostatzado de un agitador magnético, se cubrió con papel de aluminio y se mantuvo el sistema con agitación durante todo el ensayo. A intervalos de tiempo predeterminados se extrajo una muestra, se le retiró el exceso de agua superficial con papel de filtro y se registró el peso. Este procedimiento se repitió hasta observar pesada constante por un período de inmersión de aproximadamente 15 minutos, aunque los datos utilizados para evaluar las propiedades y ajustar el modelo cinético fueron los registrados durante las primeras dos horas de inmersión.

Cada experimento de rehidratación fue replicado y se registró la evolución del peso de la muestra durante cada experiencia. El agua contenida en la fruta durante la rehidratación se determinó en función de la humedad inicial (final del secado) y el aumento de peso, expresada como masa de agua por 100 g de materia seca.

Para cuantificar la capacidad de rehidratabilidad del ananá deshidratado se emplearon dos coeficientes: la *relación de rehidratación* (RR) y el *coeficiente de rehidratación* (COR).

La relación de rehidratación se calcula generalmente como la relación de la masa de la muestra rehidratada a la masa de la muestra seca (Wang & Chao, 2003), sin embargo Krokida & Marinos-Kouris (2003) expresan – de manera equivalente - este parámetro en términos del contenido de agua de las muestras:

$$RR = \frac{(100 + X_{rh})}{(100 + X_{dh})} \quad (1)$$

El coeficiente de rehidratación es un indicador del grado de recuperación de peso respecto al producto fresco. Se calcula de acuerdo a la siguiente expresión (Prabhanjan y col., 1995; Khraisheh y col., 2004):

$$COR = \frac{m_{rh}(100 - X_0)}{m_{dh}(100 - X_{dh})} \quad (2)$$

donde:  $m_{rh}$  es la masa de la muestra rehidratada (g),  $m_{dh}$  es la masa de la muestra deshidratada (g);  $X_{rh}$  es el contenido de agua de la muestra durante la rehidratación (% base húmeda);  $X_{dh}$  es el contenido de agua de la muestra al final del secado (% base húmeda);  $X_0$  es el contenido de agua de la fruta fresca, previo al secado (% base húmeda).

Ambos coeficientes se relacionan según:

$$COR = \frac{RR(100 - X_0)}{(100 - X_{dh})} \quad (3)$$

## 2.4 Modelado del proceso de rehidratación

Se utilizó el modelo de Page para describir la ganancia de agua del ananá deshidratado durante el proceso de rehidratación en agua a temperatura constante. La Ecuación 4 fue desarrollada para explicar la pérdida de agua durante el secado en capa fina (Page, 1949).

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-K t^N) \quad (4)$$

La humedad de equilibrio,  $M_e$ , del producto en las condiciones del proceso puede ser tomada como el contenido de agua al final del proceso ( $M_f$ ). Estas modificaciones fueron aplicadas para el secado de arroz por Ramesh & Rao (1996), de donde:

$$MR = \frac{M - M_f}{M_0 - M_f} = \exp(-K t^N) \quad (5)$$

Algunos autores han utilizado modelos empíricos, como la ecuación de Peleg (García-Pascual y col., 2006; Calzetta Resio y col., 2006), para describir la cinética de rehidratación. En el presente trabajo se consideró conveniente aplicar la Ecuación 5 al proceso de rehidratación de medias rodajas de ananá deshidratado. Donde  $M_0$  representa la humedad de la fruta (% base seca) al inicio del proceso de rehidratación (final del secado) y  $M$ , la humedad del alimento a cada tiempo  $t$ .

Las curvas de  $\ln(MR)$  como una función del tiempo de inmersión fueron construidas a partir de los datos experimentales y los valores de K y N se determinaron mediante análisis de regresión de la Ecuación 6:

$$\ln(MR) = -K t^N \quad (6)$$

donde K se definió como la pendiente de la recta resultante y N fue el parámetro de ajuste; resultando aquel valor de N que arrojará el mejor valor de coeficiente de correlación ( $r^2$ ).

El criterio aplicado para evaluar la bondad de la estimación, en cada experiencia, fue el error promedio porcentual (Epp). Donde  $n$  es el número de datos experimentales,  $M_{exp}$  y  $M_{estimado}$  es el valor de humedad medido experimentalmente y estimado a través de la ecuación del modelo, respectivamente.

$$Epp = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{M_{exp} - M_{estimado}}{M_{exp}} \right| * 100 \quad (7)$$

## 3. Resultados

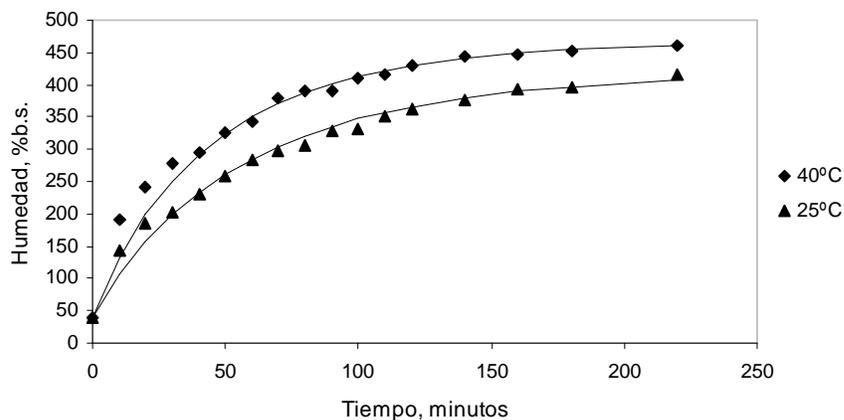
La rehidratación implica un retroceso respecto de algunos de los cambios fisicoquímicos que ocurren en la fruta durante el secado. En general, el índice de la absorción del agua y el grado de la restitución del producto seco son influenciados por el grado de sequedad alcanzado, es decir, por el nivel de afectación de la integridad celular. Se puede suponer

que el movimiento de humedad durante el proceso de rehidratación ocurre por difusión líquida, con transferencia de agua desde el líquido de rehidratación al sólido seco hasta que se alcanza el equilibrio.

Los resultados experimentales del contenido de agua en la fruta fresca presentaron una amplia variabilidad, comprendidos entre el 600% b.s. y el 900% b.s. En las condiciones experimentales de rehidratación del presente estudio, la fruta llega a alcanzar en dos horas un valor máximo del contenido de agua de 450% b.s. La velocidad de absorción de agua al inicio del proceso es importante, esta velocidad disminuye aproximadamente tres veces entre 0.5 y 2 horas de rehidratación.

Por otra parte, con muestras de ananá presecado a 75°C se realizó un ensayo, con cuatro repeticiones, de rehidratación durante 10 h. Durante la primera hora del proceso se absorbió el 60% del agua total ganada en las 10 h de rehidratación. La humedad en la fruta alcanzó el 52% del valor de humedad en la fruta fresca utilizada en este ensayo. Debido a que la humedad de saturación es muy inferior a la humedad de la fruta fresca podemos inferir que los cambios estructurales que ocurren en el tejido vegetal durante el secado son irreversibles. Este efecto fue observado por Krokida & Philippopoulos (2005) durante la rehidratación de numerosas frutas y vegetales pre-secados.

Conociendo la variación de humedad (Ec. 5) en función del tiempo, se pudieron determinar los valores de K y N, a dos temperaturas de rehidratación. Datos experimentales de  $\ln(MR)$  y el tiempo fueron procesados mediante análisis de regresión minimizando el error estándar de la desviación para determinar los parámetros K y N. Los valores de  $r^2$  fueron, en todos los casos, mayores a 0.91, mostrando que el modelo de Page describe adecuadamente la ganancia de agua en ananá en función del tiempo de rehidratación.



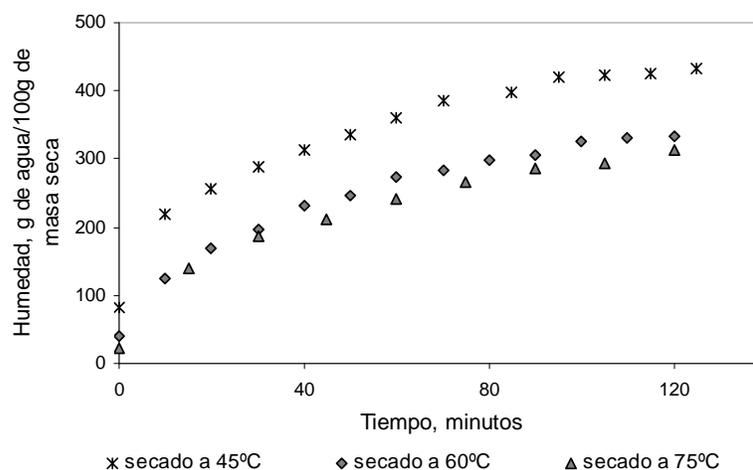
**FIGURA 1.** Contenido de agua experimental (símbolos) y predicho por el modelo de Page (línea continua) durante la rehidratación a 25 y 40°C de medias rodajas de ananá secadas a 60°C.

Valores experimentales y predichos por el modelo de Page del contenido de agua de medias rodajas de ananá pre-secadas a 60°C durante el proceso de rehidratación a 40 y 25°C se muestran en la Figura 1. Los valores predichos estuvieron próximos a los experimentales, como se manifiesta en los valores del error relativo promedio porcentual (Epp) de la estimación, calificados entre 2.65% y 4.13% (Tabla 1). El parámetro N permanece constante, siendo independiente del proceso de secado previo.

**TABLA 1.** Parámetros de la ecuación de Page y Epp de las estimaciones.

Temperatura de secado	Rehidratación a 25°C			Rehidratación a 40°C		
	K	N	Epp	K	N	Epp
45°C	0.0286±0.0041	0.93	2.65	0.0374±0.0042	0.93	2.95
60°C	0.0237±0.0021	0.93	4.08	0.0276±0.0039	0.93	3.67
75°C	0.0173±0.0009	0.93	4.13	0.0206±0.0033	0.93	3.11

El parámetro K puede ser considerado como una medida de la velocidad de ganancia de agua cuando se comparan experiencias cuyos valores de N sean similares, puesto que N determina la escala del eje de abscisas ( $t^N$ ). De esta manera se observó que K aumenta con la temperatura de rehidratación y disminuye con el aumento de la temperatura del pre-tratamiento de secado, indicando una mayor velocidad de rehidratación en las muestras de ananá pre-secado a 45°C que en el ananá secado a 75°C (Figura 2). La mayor temperatura de secado produce una estructura más rígida, lo cual podría conducir al colapso de los caminos para la entrada del agua y, en consecuencia, a una menor velocidad de rehidratación.



**FIGURA 2.** Influencia de la temperatura del secado sobre la cinética de rehidratación de ananá a 40°C

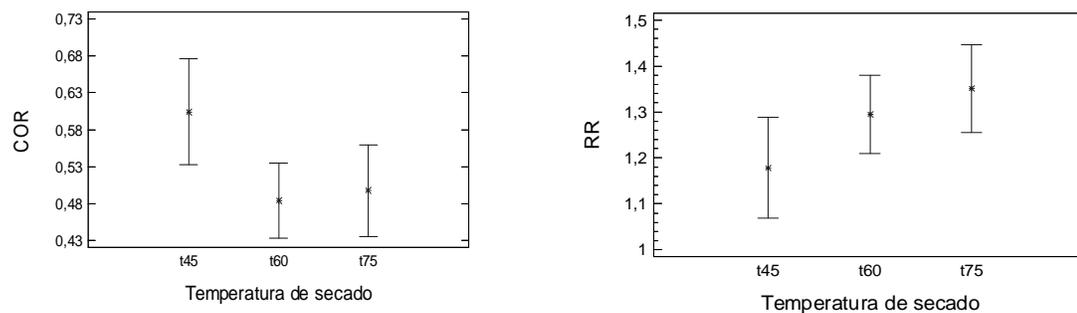
La capacidad de absorción de agua se puede cuantificar en base a los parámetros RR y COR (Ecuaciones 1 y 2). Los valores del COR y del RR para las muestras de ananá con dos horas de rehidratación se detallan en la Tabla 2.

**TABLA 2.** Características de rehidratación (2 hs.) de ananá secado con aire caliente.

Temperatura de secado	Rehidratación a 25°C		Rehidratación a 40°C	
	COR	RR	COR	RR
45°C	0.515 ± 0.078	1.188 ± 0.037	0.604 ± 0.112	1.178 ± 0.084
60°C	0.493 ± 0.152	1.262 ± 0.107	0.544 ± 0.095	1.295 ± 0.107
75°C	0.492 ± 0.064	1.354 ± 0.138	0.498 ± 0.011	1.351 ± 0.151

La relación de rehidratación (RR) aumenta con el tiempo de rehidratación, es independiente de la temperatura del proceso de rehidratación y de la temperatura del pre-tratamiento de secado, aún cuando los valores medios indican tendencia. Sin embargo, el análisis estadístico (ANOVA) muestra que no existen diferencias significativas entre los valores del parámetro RR a las tres temperaturas de secado ensayadas, debido a la dispersión de los resultados, tal como se ilustra en la Figura 3. Los valores que se representan en esta figura corresponden a los ensayos de rehidratación a 40°C.

Resultados similares se obtuvieron del análisis estadístico de los valores del parámetro COR de los ensayos individuales de rehidratación, indicando que no existen diferencias significativas entre los mismos. Esto señala que el COR es independiente de la temperatura del proceso de rehidratación y de la temperatura del pre-tratamiento de secado. A pesar de ello, los valores medios de este coeficiente estarían indicando una mayor habilidad de hidratación en las muestras de ananá pre-tratadas a 45°C. Este resultado es concordante con valores del coeficiente K (Tabla 1) derivado de la aplicación del modelo de Page a los datos cinéticos de rehidratación y con los resultados expuestos en la Figura 2.



**FIGURA 3.** Comportamiento de los parámetros RR y COR (muestras con 2 hs de rehidratación), en rodajas de ananá secadas en aire a 45, 60 y 75°C.

#### 4. Conclusiones

La ecuación de Page permite describir apropiadamente la cinética de ganancia de agua durante la rehidratación de ananá, con valores del  $E_{PP}$  de la estimación por debajo de 4.1.

La velocidad de rehidratación de ananá disminuye con el aumento de la temperatura de secado, al igual que el grado de recuperación del producto medido a través del parámetro COR. Estos resultados están en concordancia con la idea de que el deterioro de los atributos físicos originados durante el secado podría ser evaluado a través de las características de rehidratación.

Los parámetros COR y RR no son afectados significativamente por la temperatura del agua de rehidratación, en el rango de 25-40°C.

La máxima cantidad de agua incorporada al tejido vegetal durante 2 horas de rehidratación no supera el 50% del contenido de agua de la fruta fresca (previo al secado).

#### 5. Bibliografía

Calzetta Resio, A.; Aguerre, R.; Suarez, C. 2006. Hydration kinetics of amaranth grain. *Journal of Food Engineering*, 72(3): 247-253.

- Khraisheh, M.A.M.; McMinn, W.A.M.; Magee, T.R.A. 2004. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International*, 37: 497–503.
- Krokida, M.K.; Marinos-Kouris, D. 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57: 1–7.
- Krokida, M.K.; Philippopoulos, C. 2005. Rehydration of dehydrated foods. *Drying Technology*, 23: 799-830.
- Lewicki, P.P. 1998. Some Remarks on Rehydration of Dried Foods. *Journal of Food Engineering*, 36: 81–87.
- McMinn, W.A.; Magee, T. R. A. 1997a. Physical Characteristics of Dehydrated Potatoes - Part I. *Journal of Food Engineering*, 33: 37-48.
- McMinn, W.A.; Magee, T.R. 1997b. Physical Characteristics of Dehydrated Potatoes - Part II. *Journal of Food Engineering*, 33: 49-55.
- Pablo García-Pascual, P.; Sanjuán, N.; Melis, R.; Mulet, A. 2006. *Morchella esculenta* (morel) rehydration process modelling. *Journal of Food Engineering*, 72: 346–353.
- Prabhanjan, D; Ramaswamy, H.; Raghavan, G. 1995. Microwave-assisted Convective Air Drying of Thin Layer Carrots. *Journal of Food Engineering*, 25: 283-293.
- Ramesh, M.; Rao, P.S. 1996. Drying Studies of Cooked Rice in a Vibrofluidised Bed Drier. *Journal of Food Engineering*, 27: 389-396.
- Sanjuán, N.; Simal, S.; Bon, J.; Mulet, A. 1999. Modelling of broccoli stems rehydration process. *Journal of Food Engineering*, 42: 27–31.
- Wang, J.; Chao, Y. 2003. Effect of Co irradiation on drying characteristics of apple. *Journal of Food Engineering*, 56: 347–351.