

## CINÉTICA DE SECADO DE *Musa paradisiaca* L. “PLÁTANO” Y *Manihot esculenta* Grantz “YUCA”

Jorge Carranza; Manuel Sánchez

Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la UNAP, Iquitos, Perú  
[fija\\_unap@hotmail.com](mailto:fija_unap@hotmail.com)

---

### **ABSTRACT**

A forced convection tray dryers was used to dry the samples with a temperature from 30°C to 250°C, to measure through an anemometer, the circulate air velocity, to find by a hygrometer, the relative humidity and, to measure through a thermometer, the inside temperature. The unripe banana variety (ingui) and cassava variety “señorita” with 40°C, 50°C, and 60°C have been tested by matching them with different air velocity such as 5,08m/s, 7,52 m/s and 9,65 m/s as well as with different kind of thickness( 0,2 cm thick by 2,0 cm wide and 3,0 cm long or 0,4 cm thick by 2,0 cm wide and 3,00 cm long) to dry.

Also the cassava and banana were tested with 50°C and an air velocity of 7,62m/s, and the raw material( 0,2 cm thick by 2,0 cm wide and 3,0 long) had the following features such as a constant rate period of 0,325h for banana and 0,330h for cassava and a falling rate period of 2,67h for cassava and banana.

Both foodstuffs were ground to become in flour and stored in polyethylene bags of half density at room temperature during 4 months. Later a physical- chemical analysis was done to observe the optimal conservation conditions.

**Key Words:** Banana; Cassava; Dried Kinetic; Dried Curve.

---

### **RESUMEN**

El equipo empleado para secar las muestras fue un horno secador de bandejas por convección forzada con una temperatura de funcionamiento de 30°C a 250°C, un anemómetro para medir la velocidad de aire circulante, un higrómetro para medir la humedad relativa y un termómetro para medir la temperatura en el interior del horno.

Usando el plátano de la variedad “dominico” (ingui) en estado verde procedente de los pueblos y caseríos cercanos a la ciudad, y la yuca de la variedad “señorita” procedente de los pueblos y caseríos cercanos a la ciudad, se hicieron varias pruebas, con temperaturas de 40°C, 50°C, 60°C, conjugando cada temperatura con diferentes velocidades de aire: 5.08 m/s, 7.62 m/s, 9.65 m/s y variando el espesor del producto a secar: 0.2 cm de espesor con 2.0 cm de ancho y 3.0 cm de largo, 0.4 cm de espesor con 2.0 cm de ancho y 3.0 cm de largo. El plátano y

la yuca con temperatura de 50°C y velocidad de aire de 7.62 m/s y materia prima de 0.2 cm de espesor, 2.0 cm de ancho y 3.0 cm de largo, presentaron las siguientes características: secado a velocidad constante con un tiempo corto de duración de 0.325 h para el plátano y 0.330 h para la yuca; secado a velocidad decreciente, por un tiempo de 2.67 h para el plátano y la yuca.

Ambos productos fueron molidos y transformados en harinas y almacenadas en bolsas de polietileno de mediana densidad a temperatura ambiente durante cuatro meses, tras el cual se les realizó un análisis físico-químico, que permitió observar las óptimas condiciones de conservación.

**Palabras Claves:** Plátano; Yuca; Cinética de Secado; Curvas de Secado

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El secado ha sido desde los tiempos más remotos, un medio de conservación de los alimentos. Su aplicación en la forma más sencilla se aprovechó sin duda mediante la observación de la naturaleza. En el campo se secan los granos y los tallos por medio de exposición al sol. A menudo se logra así un grado suficiente de seguridad en la conservación de los alimentos. Sin embargo, en la región amazónica existen pocas investigaciones sobre la cinética de secado de especies vegetales ricas en carbohidratos, como por ejemplo el plátano y la yuca, que están al alcance del poblador local a un bajo costo. El secado con aire es una operación unitaria muy utilizada en las industrias agrícola y alimentaria, tanto por la cantidad como por la diversidad de productos tratados. Durante el secado de diversos productos biológicos (sorgo, arroz, papa, zanahoria, nabo, aceituna, achiote), se ha observado que el período que gobierna esta operación es el velocidad decreciente, el cual está descrito principalmente por la difusión de la humedad dentro del producto (Bimbinet *et al.*, 1984).

En el secado de un material se remueve humedad libre de la superficie y también agua retenida en el interior. Si se determina el cambio en el contenido de humedad del material con respecto al tiempo, se obtiene una curva de la cual se puede conocer la velocidad de secado a cualquier contenido de humedad.

La forma de la curva varía con la estructura y tipo de material (Brennan *et al.*, 1980). Para el caso de la deshidratación del plátano y su respectiva transformación en harina se recomienda que esta contenga de 2 a 5 % de humedad en base húmeda y los siguientes rangos de temperatura (Technical Digest Service U.S., 1956):

- Cuando se emplea el cilindro rotatorio se utiliza plátano verde y la temperatura máxima es de 90°C hasta que tenga 12 % de humedad en base húmeda y luego se pasa a un túnel secador con temperatura de 60°C a 70°C hasta 2% de humedad en base húmeda.
- Cuando se emplea el método de secado por rociado, se utiliza plátano maduro triturado y diluido con una determinada cantidad de agua. Para este método la temperatura empleada varía de 60°C a 80°C.
- Cuando se emplea el secador de cabina, se utiliza plátano verde y la temperatura empleada varía de 65°C a 80°C.

Según la Corporación de Racionalización y Consultoría S.A. C.R.C., Organización de Servicios y Asesoría S.A. OSASA (1983), en el secado de plátanos con empleo de cabinas, hornos y túneles donde se disponen bandejas cargadas de rodajas de plátano, circulando de manera natural o forzada aire caliente, dicho aire no debe exceder una temperatura máxima de 75°C.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Materia prima

La materia prima utilizada fue plátano y yuca, en estado fresco y en buenas condiciones de conservación, proveniente de los pueblos y caseríos cercanos a la ciudad, en el mes de febrero, teniendo en cuenta que este fresco y en buenas condiciones para su proceso. Se decidió tener muestras de forma geométrica para facilitar la aplicación de las formulas sugeridas en la literatura, las muestras a secar tuvieron 2 espesores distintos para su análisis: 0.2 cm x 2.0 cm de ancho x 3.0 cm de largo y 0.4 cm x 2.0 cm de ancho x 3.0 cm de largo, el ancho de las muestras estuvo determinado por el diámetro del plátano puesto que este tenia que ser cortado en tiras de un determinado espesor para luego seccionarle con las medidas arriba mencionadas empleando para ello un molde de metal.

### 2.2 Proceso experimental

El presente trabajo está basado en Carranza (2001). Varias muestras uniformes (en peso y volumen) fueron colocadas en una bandeja, llenando por completo la base del recipiente, de tal manera que sólo quedó expuesta a la corriente de aire de secado la superficie superior de la materia prima. La pérdida en peso de humedad durante el secado se pudo determinar retirando y pesando una muestra de la bandeja en una balanza analítica. El pesado de cada muestra se realizó cada 3 minutos hasta que el peso de las muestras no varió (peso constante). Este procedimiento se realizó para tres velocidades de aire 5.08 m/s, 7.62 m/s, 9.65 m/s, con temperaturas de 40°C, 50°C y 60°C, con tres repeticiones cada uno.

Según Treybal (1981), para el flujo de gas paralelo a una superficie y confinado entre platos paralelos, como entre los platos de un secador de platos, los coeficientes de

transferencia de calor por convección ( $h_c$ ) y el coeficiente de transferencia de masa en la fase gaseosa, están relacionados con el número de Reynolds, a partir del cual se pueden calcular otros parámetros de interés como el coeficiente convectivo por ejemplo:

$$2600 \leq Re \leq 22000 \quad Re = d_e G/\mu \quad (6)$$

$d_e$  = diámetro equivalente calculado (m)  
 $G$  = velocidad másica ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ )  
 $\mu$  = viscosidad del aire ( $\text{kg}/\text{m s}$ )

donde :

a) Volumen húmedo ( $v_H$ ) = ( $\text{m}^3/\text{kg}$  aire seco)

$$v_H = [0.00283 + (0.00456)(0.0129)](T_{bs} + K) \quad (7)$$

b) Densidad del gas ( $P_{\text{gas}}$ ) = ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) (8)

$$P_{\text{gas}} = \frac{1.0 + 0.0129}{v_H}$$

c) Velocidad másica ( $G$ ) = ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) (9)

$$G = (\text{Vel. del aire})(\rho_{\text{gas}})$$

d) Diámetro equivalente calculado ( $d_e$ ) = (m)

$$d_e = \frac{4(\text{sección transversal para el flujo})}{\text{perímetro}} \quad (10)$$

Y el coeficiente de calor por convección viene dado por:

$$h_c = \frac{5.90(G)^{0.71}}{(d_e)^{0.29}} \quad (11)$$

$$h_c = W/\text{m}^2\text{k}$$

Para trazar las curvas de secado, de acuerdo con la metodología propuesta por Geankoplis (1995), se sigue los siguientes pasos: los datos que se obtienen del experimento de secado por lotes se expresan como peso total  $W$  del sólido húmedo (sólido seco

más humedad) a diferentes tiempos. Estos valores pueden convertirse a datos de velocidad de secado con los siguientes procedimientos. Primero se recalculan los datos: si  $W$  es el peso del sólido húmedo en kg totales de agua más sólido seco y  $W_s$  es el peso del sólido seco en kg

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \quad \begin{array}{l} \text{kg totales de agua} \\ \text{kg de sólido seco} \end{array} \quad (12)$$

Habiendo establecido las condiciones de secado constante se determinan el contenido de humedad de equilibrio,  $X^\circ$  en kg humedad de equilibrio/kg de sólido seco. Con esto se procede a calcular el valor del contenido de humedad libre  $X$  en kg de agua libre/kg de sólido seco para cada valor de  $X_t$ .

$$X = X_t - X^\circ \quad (13)$$

Usando los datos calculados con la ecuación (13), se traza una gráfica del contenido de humedad libre  $X$  en función del tiempo "t" en horas. Para obtener una curva de velocidad de secado, se miden las pendientes de las curvas, lo cual proporciona valores de  $dx/dt$  para ciertos valores de  $t$ . Se calcula la velocidad de secado conforme a la siguiente ecuación:

$$R = \frac{L_s}{A} \frac{dX}{dT} \quad (14)$$

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Aspectos operacionales del proceso de secado

La Tabla 1 muestra el resultado del análisis físico-químico del plátano y de la yuca en estado fresco. Comparando los resultados con los mostrados en la bibliografía se observa que no hay mayor diferencia en cuan-

to a los valores encontrados para ambas materias primas, pudiendo el mismo deberse al tipo de suelo donde se desarrollaron, estado de madurez, y al tiempo transcurrido entre cosecha y análisis de los mismos.

**Tabla 1:** Análisis físico-químico de la materia prima

	PLATANO	YUCA
Agua	58.0%	66.2%
Carbohidratos	40.1%	31.6%
Calorías	166.2%	132.4%
Proteína	1.0%	1.1%
Grasa	0.2%	0.2%
Cenizas	0.9%	1.0%

En la Tabla 2 se muestran los factores que determinaron experimentalmente el proceso de secado, asimismo también se los resultados en términos de tiempo de secado y humedad final alcanzada según el espesor de la materia prima, que inicialmente tuvo una humedad de 57.0% para el plátano y 64.5% para la yuca, siendo que al final del proceso la materia prima de 0.20 cm de espesor tuvo una humedad de 6.80% para el plátano y 6.84% para la yuca. Se observa que a una temperatura de 40°C el tiempo de secado y la humedad final fueron mayores en comparación con 50°C y 60°C.

Al mantener constante cada una de las temperaturas de secado (40°C, 50°C y 60°C) pero aumentando la velocidad de aire se nota un descenso en el tiempo de secado, porque al aumentar el flujo de aire circulante aumenta con ella la rapidez de transferencia de calor y de masa, teniendo como consecuencia una disminución en el tiempo de secado; sin embargo a una velocidad de 9.65 m/s se presentó un problema que es el de la fuerza de tiro, siendo que esta velocidad de aire es demasiado fuerte para circular en la cabina del horno aspirando la materia a secar hacia la hélice destruyéndola totalmente, inconveniente encontrado para las tres temperaturas de secado: 40°C, 50°C y 60°C.

**Tabla 2 :** Tiempos de secado obtenidos para diferentes espesores de materia prima.

Experimento	Temp. (°C)	Velocidad (m/s)	Humedad Final (%) por Espesor				Tiempo (h) por espesor	
			0.20 cm		0.40 cm		0.20 cm	0.40 cm
			Plátano	Yuca	Plátano	Yuca		
1	40	5.08	11.04	9.01	11.46	10.16	7.03	7.66
2	50	5.08	4.80	5.60	9.20	9.01	4.56	5.16
3	60	5.08	4.29	3.93	10.55	10.15	4.03	4.96
4	40	7.62	13.41	12.70	11.66	10.57	6.03	6.26
5	50	7.62	6.80	6.84	10.40	9.55	3.03	3.46
6	60	7.62	5.55	5.39	10.70	10.35	2.20	2.60
7	40	9.65	8.72	13.01	9.53	16.20	3.53	3.60
8	50	9.65	6.62	4.84	10.00	9.37	1.96	2.10
9	60	9.65	4.04	4.08	11.47	10.31	1.50	1.70

Para obtener los valores mostrados a una velocidad de aire de 9.65 m/s se tuvo que colocar un contra peso sobre la primera bandeja situada frente al ventilador colocando las muestras en las bandejas intermedias de la cabina para evitar que sean aspiradas. A 60°C se obtuvieron los menores tiempos de secado pero una exposición prolongada del producto a esta temperatura ocasiona que el producto final (harina) presente una pérdida de calidad en cuanto al color debido al oscurecimiento de la superficie por la exposición a la alta temperatura, también se nota que el producto se seca totalmente en su superficie formando una costra que impide el paso de la humedad del interior hacia la superficie teniendo como consecuencia un producto deshidratado superficialmente y reteniendo humedad en su interior. Consecuentemente, se puede decir que la temperatura de 50 °C y velocidad de aire de 7.62 m/s es la más apropiada para deshidratar plátano y yuca con un tiempo promedio de secado de 180 minutos.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos después del proceso de secado del plátano y la yuca que fueron transformados en harinas y almacenados en bolsas de polietileno de alta densidad a temperatura ambiente durante 4 meses. Se observa que los productos se conservan mejor en los envases de polietileno de alta densidad, resultado consistente con el reportado por

Hoyos (1979), quien realizó un estudio de almacenado de griz de plátano en 3 tipos de empaques: polietileno, multipak y bolsas de tela, por un tiempo de 2 meses en cámara simulando una temperatura de 30°C y humedad relativa de 78% propios de zonas tropicales y de mayor producción de plátanos, concluyendo que el polietileno es el más apropiado como empaque puesto que es más impermeable al vapor de agua, más resistente a la tracción y a la ruptura en comparación con el multipak y quedando en ultimo lugar las bolsas de tela. Los resultados también coinciden con los de Correa (1999), quien realizó un estudio de almacenamiento de harina en bolsas de alta y baja densidad por un tiempo de 3 meses a temperatura ambiente concluyendo que el polietileno de lata densidad es el mejor empaque.

**Tabla 3:** Análisis físico-químico del plátano y la yuca expresadas en base seca

	Plátano	Yuca
Temperatura (°C)	50.00	50.00
Humedad relativa (%)	17.00	17.00
Velocidad de aire (m/s)	7.62	7.62
Humedad	6.80	6.84
Ceniza	1.50	2.15
Proteína	2.03	2.10
Grasa	0.70	0.75
Carbohidratos	89.00	88.20
Calorías	370.30	367.80
Materia seca	93.20	93.20

### 3.2 Fenomenología del aire de deshidratación

Los resultados del cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección, mostrados en la Tabla 4, fueron calculados mediante fórmulas sugeridas por Treybal (1981), teniendo en cuenta el tipo de flujo establecido por el número de Reynolds que en ninguna de las velocidades de aire sobre-

pasa el valor de 22000 que es el valor máximo que debería tener para la correcta aplicación de las fórmulas sugeridas en la literatura. Observando los valores de la velocidad másica y del coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $h_c$ ) se establece que el valor de ambos disminuye con el aumento de la temperatura, lo que se debe a que el aire circulante se expande con un incremento de la temperatura.

**Tabla 4:** Fenomenología del aire durante el secado de plátano y yuca

Velocidad de aire (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad másica (G) (kg/m <sup>2</sup> s)	Nº Reynolds	Coficiente convectivo ( $h_c$ ) (W/m <sup>2</sup> k)
5.08	40	5.66	11498	52.7
5.08	50	5.49	10312	51.6
5.08	60	5.33	9776	50.5
7.62	40	8.51	17295	70.4
7.62	50	8.27	15518	69.0
7.62	60	8.02	14719	35.5
9.65	40	10.70	21852	83.2
9.65	50	10.50	19614	81.5
9.65	60	10.20	18627	79.8

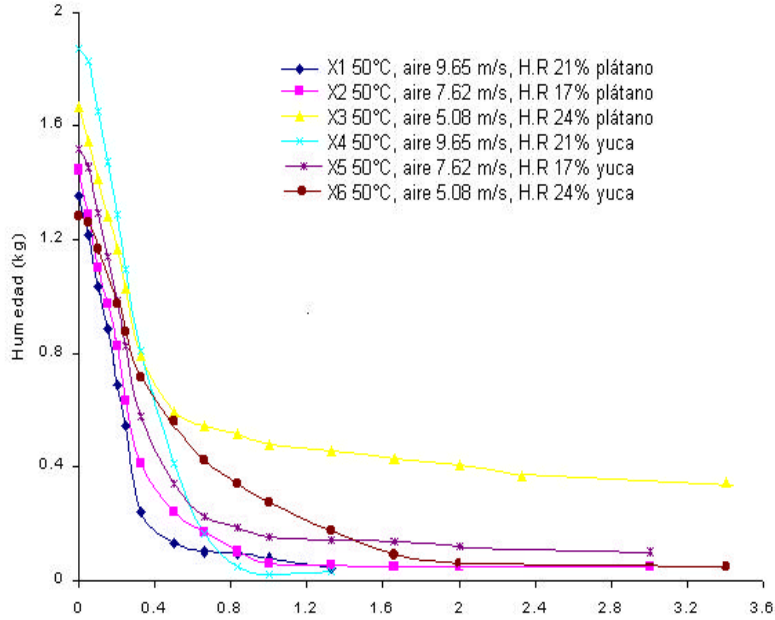
El valor más alto de G y  $h_c$  se obtiene a 40°C para todas las velocidades de aire, pero a 40°C el secado del producto va a demorar mucho más para cualquier velocidad de aire según se comprobó experimentalmente, puesto que la velocidad másica circulante es elevada y se encuentra a temperatura ambiente (prom. 30°C), lo que origina demora para alcanzar la temperatura de secado (40°C), manteniendo inicialmente al producto a una temperatura inferior a la de secado y para que el producto se deshidrate completamente va a transcurrir un período largo de tiempo, el mismo que disminuye conforme se aumenta la temperatura.

A 7.62 m/s y 50°C se obtienen valores moderados de G y  $h_c$  inferiores a los obtenidos a 9.65 m/s y 50°C, pero a 9.65 m/s se presenta una dificultad que es la fuerza de tiro que es tan fuerte que levanta la primera

bandeja y aspira el producto a secar destruyéndolo por completo. Entonces un factor determinante para el proceso de secado va a ser precisamente la velocidad de aire y su temperatura. Además, desde el punto de vista de calidad del producto obtenido se puede decir que ésta desmejora por la deshidratación a mayor velocidad de aire, concordando con lo reportado por Davelouis (1973).

### 3.3 Determinación experimental de la cinética de secado

Las curvas de la Figura 1 fueron obtenidas tabulando los valores experimentales de humedad versus tiempo durante el proceso de secado, pudiendo apreciarse la pérdida de humedad contenida en la materia prima conforme se incrementa el tiempo de exposición de la misma a la corriente de aire caliente.



**Figura 1:** Curvas experimentales de humedad en función del tiempo para el plátano y la yuca.

En las curvas de plátano y yuca de la Figura 1, se aprecian los períodos de secado a velocidad constante, velocidad decreciente y también el contenido de humedad crítica, los cuales se analiza seguidamente :

- En la curva X1 el período de secado a velocidad constante tiene una duración de 15 minutos, retirando en ese lapso de tiempo 0.67 kg de agua/kg de sólido seco, en el segundo período de secado a velocidad decreciente tiene una duración de 105 minutos retirando de la materia prima un contenido de humedad de 0.53 kg de agua/ kg de sólido seco.
- En la curva X2 el período de secado a velocidad constante tiene una duración de 20 minutos, retirando en ese lapso de tiempo 0.88 kg de agua/kg de sólido seco, en el segundo período de secado a velocidad decreciente tiene una duración de 178 minutos retirando de la materia prima un contenido de humedad de 0.40 kg de agua/ kg de sólido seco.

- En la curva X3 el período de secado a velocidad constante tiene una duración de 15 minutos, retirando en ese lapso de tiempo 0.51 kg de agua/kg de sólido seco, en el segundo período de secado a velocidad decreciente tiene una duración de 165 minutos retirando de la materia prima un contenido de humedad de 1.00 kg de agua/kg de sólido seco.
- En la curva X4 el período de secado a velocidad constante tiene una duración de 15 minutos, retirando en ese lapso de tiempo 0.72 kg de agua/kg de sólido seco, en el segundo período de secado a velocidad decreciente tiene una duración de 105 minutos retirando de la materia prima un contenido de humedad de 1.09 kg de agua/kg de sólido seco.
- En la curva X5 el período de secado a velocidad constante tiene una duración de 15 minutos, retirando en ese lapso de tiempo 0.62 kg de agua/kg de sólido seco, en el segundo período de secado a velocidad decre-

ciente tiene una duración de 180 minutos retirando de la materia prima un contenido de humedad de 0.81 kg de agua/kg de sólido seco.

- En la curva X6 el período de secado a velocidad constante tiene una duración de 12 minutos, retirando en ese lapso de tiempo 0.29 kg de agua/kg de sólido seco, en el segundo período de secado a velocidad decreciente tiene una duración de 168 minutos retirando de la materia prima un contenido de humedad de 0.97 kg de agua/kg de sólido seco.

Las curvas X1, X2 y X3 indican que el plátano comienza a perder humedad casi al inicio de la operación de secado, cosa que no ocurre con la yuca, cuyas curvas X4, X5 y X6 indican un período de latencia, es decir, que la yuca demora un poco en alcanzar el equilibrio con el sistema. Esto se explica fundamentalmente por la estructura física interna de las partículas de cada materia prima. Siendo el plátano más poroso que la yuca es previsible que el flujo de agua del interior hacia la superficie en el primero más rápido que en el segundo de los materiales.

Comparando los tiempos de duración durante el período de secado a velocidad constante, tanto el plátano como la yuca presentan tiempos similares. Durante el período de secado a velocidad decreciente se observa que el tiempo de duración y la cantidad de humedad retirada tanto del plátano como de la yuca, van en aumento conforme disminuye la velocidad de circulación del aire caliente. La cantidad total de humedad retirada del producto según los análisis físico-químicos practicadas sobre el mismo, indican que tienen un contenido final de humedad del orden del 7 - 8 %. Resultados similares obtuvo Hoyos (1979) al secar plátanos en tiras de 1.0 cm x 1.0 cm x 5.0 cm, con una velocidad de aire de 5.0 m/s, obteniendo un contenido final de humedad en las muestras del orden de 7 - 10 %.

En la Figura 2 se ilustran las curvas obtenidas de la cinética de secado del plátano y

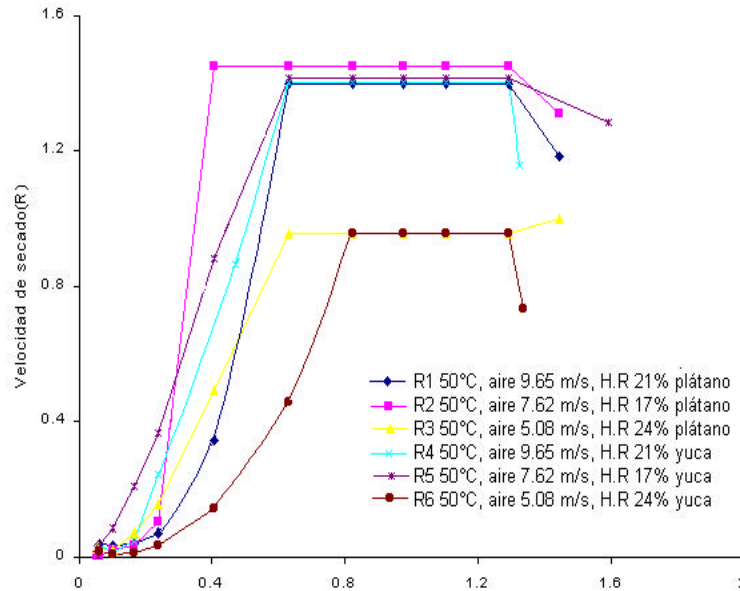
la yuca en las condiciones del experimento. Como se puede observar, se presentan las curvas clásicas que siguen los alimentos (Geankoplis, 1995), esto es, existe un período de secado a velocidad constante y un período de secado a velocidad decreciente, siendo este último el que predomina durante el proceso por lo que es el más estudiado en el secado de alimentos. Analizando las curvas se puede observar:

- La curva R1 (plátano), presenta un valor de secado a velocidad constante de 1.40 kg/h m<sup>2</sup>, retirando durante este período 0.67 kg H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco. Durante el primer período de secado a velocidad decreciente retira una humedad de 0.30 kg H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco y en el segundo período de secado a velocidad decreciente retira 0.23 H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco. Durante el primer período de secado a velocidad decreciente el valor de la velocidad de secado disminuye hasta un valor de 0.34 kg/h m<sup>2</sup>, continuando descendiendo durante el segundo período de secado a velocidad decreciente hasta un valor 0.04 kg/h m<sup>2</sup>.

- La curva R2 (plátano), presenta un valor de secado a velocidad constante de 1.45 kg/h m<sup>2</sup>, retirando durante este período 0.88 kg H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco. Durante el primer período de secado a velocidad decreciente retira una humedad de 0.17 kg H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco y en el segundo período de secado a velocidad decreciente retira 0.23 H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco. Durante el primer período de secado a velocidad decreciente el valor de la velocidad de secado disminuye hasta un valor de 0.09 kg/h m<sup>2</sup>.

La curva R3 (plátano), presenta un valor de secado a velocidad constante de 0.96 kg/h m<sup>2</sup>, retirando durante este período 0.51 kg H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco. Durante el primer período de secado a velocidad decreciente retira una humedad de 0.43 kg H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco y en el segundo período de secado a velocidad decreciente retira 0.56 H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco. Durante el primer período de secado a velocidad decreciente el valor de la





**Figura 2:** Curvas experimentales de la velocidad de secado en función de la humedad libre

velocidad de secado disminuye hasta un valor de  $0.15 \text{ kg/h m}^2$ .

- La curva R4 (yuca), presenta un valor de secado a velocidad constante de  $1.40 \text{ kg/h m}^2$ , retirando durante este período  $0.72 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$  de sólido seco. Durante el primer período de secado a velocidad decreciente retira una humedad de  $0.68 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$  de sólido seco y en el segundo período de secado a velocidad decreciente retira  $0.42 \text{ H}_2\text{O/kg}$  de sólido seco. Durante el primer período de secado a velocidad decreciente el valor de la velocidad de secado disminuye hasta un valor de  $0.24 \text{ kg/h m}^2$ .

- La curva R5 (yuca), presenta un valor de secado a velocidad constante de  $1.41 \text{ kg/h m}^2$ , retirando durante este período  $0.62 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$  de sólido seco. Durante el primer período de secado a velocidad decreciente retira una humedad de  $0.49 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$  de sólido seco y en el segundo período de secado a velocidad decreciente retira  $0.32 \text{ H}_2\text{O/kg}$  de sólido seco. Durante el primer período de secado a velocidad decreciente el valor de la velocidad de secado disminuye hasta

un valor de  $0.36 \text{ kg/h m}^2$ .

- La curva R6 (yuca), presenta un valor de secado a velocidad constante de  $0.95 \text{ kg/h m}^2$ , retirando durante este período  $0.29 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$  de sólido seco. Durante el primer período de secado a velocidad decreciente retira una humedad de  $0.09 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$  de sólido seco y en el segundo período de secado a velocidad decreciente retira  $0.87 \text{ H}_2\text{O/kg}$  de sólido seco. Durante el primer período de secado a velocidad decreciente el valor de la velocidad de secado disminuye hasta un valor de  $0.45 \text{ kg/h.m}^2$ .

En la Figura 2 todas las curvas presentan un período de latencia que se observa en los dos primeros puntos, esto ocurre porque la muestra al momento de ser introducida en el horno no se encuentra a la temperatura requerida ( $50^\circ\text{C}$ ), y para llegar a dicha temperatura pasa un período de tiempo que es variable para cada muestra por que varían la velocidad de aire y la humedad relativa. En las curvas R1 y R4 se tiene una velocidad de aire de  $9.65 \text{ m/s}$  y humedad relativa de  $17\%$ , mientras en las curvas R3 y R6 la velocidad

de aire es de 5.08 m/s y la humedad relativa de 24 %. El valor numérico de la velocidad de secado determinada experimentalmente es diferente para cada muestra estudiada, obteniéndose los valores más altos en las curvas R2 y R5. Ambas con una velocidad de aire de 7.62 m/s y humedad relativa de 17% que se mantuvieron constantes durante todo el experimento.

La curva R2 retiró un mayor contenido de humedad en la muestra (plátano) en comparación con las demás curvas determinadas experimentalmente, asimismo el primer período de secado a velocidad decreciente está bien definido retirando el 42.46 % de la humedad, y en el segundo período retira el 57.53 % de la humedad restante. La suma de ambas es el total de humedad retirada durante todo el período de secado a velocidad decreciente.

La curva R5 (yuca), presenta un valor numérico de velocidad de secado constante ligeramente inferior a la curva R2, así mismo el período de secado a velocidad constante presenta un menor tiempo de duración siendo del 71.0 % del total empleado por la curva R2. El primer período de secado a velocidad decreciente no es tan pronunciada como la presentada por la R2 y retira el 60.08 % de humedad, y, durante el segundo período de secado a velocidad decreciente retira el 39.92 % de humedad. La suma de ambas humedades corresponde al total de humedad retirada de la muestra durante el secado a velocidad decreciente.

Las curvas R1 (plátano) y R4 (yuca), presentan un valor numérico en la velocidad de secado constante similar al obtenido por la curva R5.

Las curvas R3 (plátano) y R6 (yuca), presentan los valores en el período de secado a velocidad constante más bajos, ambos con una velocidad de aire de 5.08 m/s y humedad relativa de 24%, lo que se debe a que tienen la menor velocidad de aire y la más alta humedad relativa dificultando de esta manera la transferencia de masa. La curva R3 duran-

te su primer período de secado a velocidad decreciente retira el 43.52 % de humedad y en el segundo período retira el 56.47 % de humedad, la suma de ambas humedades corresponde al total de humedad retirada de la muestra (yuca) durante el secado a velocidad decreciente. La curva R6 (yuca), durante el primer período de secado a velocidad decreciente retira el 10% de humedad y en el segundo período retira el 90% de humedad restante indicando que en el segundo período de velocidad decreciente es en donde se da la mayor transferencia de masa para el período de secado a velocidad decreciente.

#### 4. CONCLUSIONES

Para tiras de plátano y yuca de 0.2 cm de espesor por 2.0 cm de ancho por 3.0 cm de largo, la temperatura apropiada para el secado es de 50°C, con una velocidad de viento de 7.62 m/s, humedad relativa de 17%, con un tiempo promedio de 180 min. La composición del plátano y de la yuca obtenido bajo estas condiciones es la siguiente: Plátano; humedad 6.8%, proteína 2.03%, grasa 0.70%, cenizas 1.50%, carbohidratos 88.97%. Yuca; humedad 6.84%, proteína 2.10%, grasa 0.75%, cenizas 2.15%, carbohidratos 88.16%.

El secado de trozos de plátano y de yuca de 0.4 cm de espesor por 2.0 cm de ancho por 3.0 cm de largo, obtenido bajo las condiciones de secado ya descritas presenta la siguiente composición: Plátano; humedad 10.40%, proteína 1.28%, grasa 0.89%, cenizas 1.65%, carbohidratos 85.78%. Yuca; humedad 9.55%, proteína 1.09%, grasa 0.90%, cenizas 1.48%, carbohidratos 86.98%

De los resultados obtenidos para el período de secado a velocidad constante, se observa que una velocidad de aire superior y una alta temperatura produce una mayor transferencia de masa. Esto se puede traducir a un menor tiempo de permanencia dentro del horno para su total secado, favoreciendo con ello a minimizar los costos de pro-

ducción. El espesor del producto sí presenta influencia en el valor de los coeficientes, ya que a mayor espesor del producto el valor del coeficiente es menor.

De los resultados en el período de secado con velocidad decreciente, se puede concluir que este período es mucho menor a una velocidad de aire mayor, en este caso 9.65 m/s pero no es recomendable porque la fuerza de tiro es demasiada aspirando la materia a secar y lo destruye por completo.

La harina de plátano y de yuca obtenidas durante el presente trabajo fueron almacenadas a temperatura ambiente en bolsas de polietileno de alta densidad (0.940 g/cm<sup>3</sup>) durante 4 meses, tiempo tras el cual no presentaron cambios físico-químicos.

El análisis químico cuantitativo del plátano y la yuca realizado para determinar el remanente de bisulfito de sodio en las muestras deshidratadas indican valores de 46 y 52 ppm respectivamente. Estos resultados son inferiores a lo recomendado por las instituciones competentes que es de 60 ppm para harinas de uso industrial. Este resultado concuerda con lo reportado por Hoyos (1979).

La harina de plátano y de yuca obtenidas con porcentaje de humedad de 6.80% para el plátano y 6.84% para la yuca están aptas para ser adicionadas a la harina de trigo en la elaboración de panes, fideos y galletas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bimbinet J.J.; Daudin J.D.; Wilff E. Air drying kinetics of biological particles. Proceedings Fourth Intern. Drying Symp, Kyoto, Japan (1984)
- Brennan J.C ; Butters J.R ; Cowrell R.L.; Lilly A.E.V. Las Operaciones de la ingeniería de los alimentos. Editorial Acribia, Zaragoza, España (1980)
- Carranza J. Cinética de secado del plátano (*Musa paradisiaca*) y de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Trabajo de Fin de Carrera, Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), Iquitos, Perú (2001)
- Corporación de Racionalización y Consultoría S.A. Estudio de factibilidad del proyecto de industrialización del plátano, Tomo I. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana, Iquitos, Perú (1983)
- Corporación de Racionalización y Consultoría S.A. Estudio de factibilidad del proyecto de industrialización de la yuca, Tomo II. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana, Iquitos, Perú (1983)
- Correa M. Optimización para el proceso de elaboración de fariña a partir de yuca. Trabajo de Fin de Carrera, Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), Iquitos, Perú (1999)
- Davelouis C. Ensayo de deshidratación del plátano variedad bellaco o harton por el método de aire caliente. Trabajo de Fin de Carrera, Programa Académico de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú (1973)
- Geankoplis C. Procesos de transporte y operaciones unitarias. 2ª Edición, Editora Continental, México D.F., México (1995)
- Hoyos J.J Almacenamiento de dos variedades de plátano deshidratado en forma de gütz. Trabajo de Fin de Carrera, Programa Académico de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú (1979)
- Technical Digest Service U.S. Preparing banana powder. Department of Commerce, 47 Office of Technical Service (1956)
- Treybal R.E. Operaciones de transferencia de masa. 2ª. Edición. McGraw-Hill, Mexico D.F., México (1980)