



Estudio experimental para el diseño y evaluación de un secador de bandejas móvil

Experimental study for the design and evaluation of mobile dryer trays

¹Job Fiestas U., ²Manuel Jiménez E., ²Benito Lizárraga Z.

RESUMEN

Objetivos: Diseñar y evaluar un equipo secador de bandejas móvil, utilizando energía renovable como medio calefactor para determinar el comportamiento de la velocidad de secado de diversos productos agrícolas, tubérculos y frutas.

Materiales y Métodos: Los experimentos se realizaron utilizando un secador de contacto directo a escala piloto en el Laboratorio de Operaciones Unitarias. Se hicieron mediciones de las variables de interés como: temperatura seca y húmeda del aire caliente, a la entrada y salida del equipo, velocidad del aire utilizado, y evaluación de la pérdida de humedad del material agrícola, que permitieron construir las curvas típicas de secado. El flujo del aire se midió indirectamente con manómetro de glicerina, donde su nivel debe permanecer constante durante toda la operación de secado. **Resultados:** En los ensayos utilizando diversos valores de flujo del aire, se observó una relación inversa con el tiempo de secado. Asimismo la temperatura de secado fue fijada en función del tipo de material agrícola a secar, desde 41°C hasta 61 °C. Por las dimensiones de la cámara de secado, las muestras utilizadas fueron desde 60 hasta 200 gramos. Además; la humedad crítica también se encontró en un rango de 0.400 hasta 0.700 Kg agua/Kg muestra Seca °C. **Conclusiones:** Los mejores resultados fueron los obtenidos con un ranking de humedad de equilibrio siguiente: ají escabeche (0.0036) > papa (0.0049) > camote (0.0059) (g agua/g muestra seca).

Palabras clave: humedad, humedad en base seca, velocidad de secado, temperatura de bulbo húmedo, psicrometría.

¹Facultad de Ciencias

²Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica



ABSTRACT

Objectives: To design and evaluate a mobile tray dryer equipment using renewable energy as heating medium to determine the behavior of the rate of drying of various agricultural products, tubers and fruits. **Materials and Methods:** Experiments were performed using a direct contact dryer pilot scale in the Unit Operations Laboratory. Wet and dry hot air temperature at the inlet and outlet equipment, air velocity used, and evaluation of moisture loss of agricultural equipment, which allowed building typical drying curves: measurements of the variables of interest were. Air flow was measured indirectly with glycerin gauge where their level should remain constant during the drying operation. **Results:** In trials using various values of air flow, an inverse relationship with the drying time was observed. Also the drying temperature was set according to the type of agricultural dry material from 41 ° C to 61 ° C. For the dimensions of the drying chamber, the samples used were from 60 to 200 grams. In addition; also criticizes moisture found in a range of 0400-0700 Kg water / Kg sample Seca ° C. **Conclusions:** Best results were obtained with a ranking of moisture following equilibrium: pickled pepper (0.0036)> potato (0.0049)> camote (0.0059) (g water / g dry sample). **Keywords:** moisture, dry basis moisture, drying speed, wet bulb temperature, psychrometric.

INTRODUCCION

El secado ha sido desde los tiempos más remotos un medio de conservación de los alimentos. 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.

El proyecto de investigación tiene como meta final sistematizar el proceso del diseño de un equipo secador de bandejas móvil, desde la concepción y aceptación de la idea inicial hasta su materialización. Este proceso es un trabajo laborioso y difícil porque se deben plantear y evaluar diferentes opciones para resolver el problema, bajo un criterio comparativo técnico-económico. Además; promover el uso eficiente de las fuentes de energía y tecnologías limpias, para mejorar la competitividad de los productores agrícolas, que contribuyan a preservar y conservar mejor sus productos, e índices de productividad.

El desarrollo de la investigación se ha subdividido en dos fases: la primera consiste en aplicar métodos experimentales adecuados para la evaluación del proceso de secado de diversos productos agrícolas, en un equipo de laboratorio, para estandarizar las condiciones controladas de operación de las variables del proceso. La segunda fase consiste en el diseño, construcción y evaluación del equipo de secado móvil a nivel banco destinado al sector agrícola.

El secado con aire es una operación unitaria muy utilizada en las industrias agrícola y alimentaria, involucra mecanismos de transferencia de materia y calor, estos se controlan para manejar un proceso ecoeficiente y obtener un producto de mejor calidad. Según Treybal R. (1988) y Geankoplis C. (1995), los parámetros de interés en una operación de secado son: la actividad del agua, transferencia de materia y calor, difusión de la humedad y curvas de secado. La eliminación del agua se da en una serie de etapas diferenciadas entre sí por la velocidad de secado, los contenidos de humedad crítica y de equilibrio.

Carranza J. & Sánchez M. (2002) estudiaron la cinética del secado para plátano y yuca. El equipo empleado fue un horno secador de bandejas por convección forzada con una temperatura de funcionamiento de 30°C a 250°C, equipado con anemómetro, higrómetro y un termómetro para medir la temperatura en el interior del horno. Usando el plátano de la variedad “dominico” (inguiri) en estado verde y la yuca de la variedad “señorita”, ambos procedentes de los pueblos y caseríos cercanos a la ciudad, se hicieron varias pruebas, conjugando cada temperatura (40, 50 y 60 °C) con diferentes velocidades de aire. Ambos productos fueron molidos y transformados en harinas, luego almacenados en bolsas de polietileno de mediana densidad a temperatura ambiente durante cuatro meses, tras el cual se realizó un análisis físico-químico, observando las óptimas condiciones de conservación.

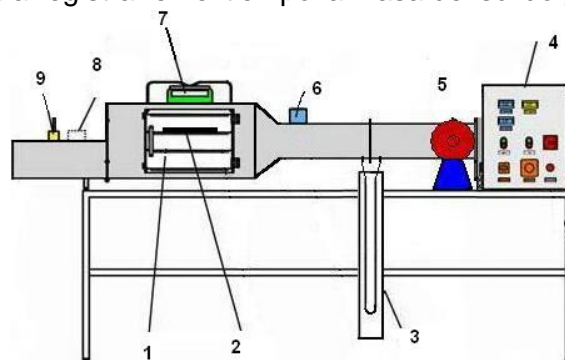
Muñoz D. (2006) evaluó el comportamiento de la velocidad de secado de cáscara de piña mediante secado directo e indirecto. Los experimentos se realizaron utilizando un deshidratador solar y un secador de contacto directo a escala piloto. Evaluó las variables de interés como, temperatura seca y húmeda a la entrada y salida de los equipos, velocidad del aire y pérdida de humedad, obtiene una eficiencia de la operación de secado de cáscara de piña del 73%, determina que secado directo tiene mayor eficiencia pero los costos se incrementan, mientras en la deshidratación solar son menores. La cinética de secado en ambos sistemas se diferencia en los tiempos de secado.

Ocampo A. (2006) realizó un estudio experimental para encontrar un modelo que permitiera predecir el tiempo de secado de la pulpa de mango (*Mangifera indica*) con diferentes condiciones de temperatura. Se construyó un secador de laboratorio en el que se llevaron a cabo pruebas de secado a temperaturas de 55 °C, 60 °C y 65 °C, con una velocidad de aire constante de 2,0 m/s y una humedad relativa controlada de 50%. Se presenta un procedimiento sencillo que convierte el modelo de GAB en una ecuación polinomial de segundo orden. Igualmente, se muestra una manera simple aplicable a procesos similares de secado para establecer su cinética a partir de modelos simplificados de la ecuación clásica de Fick.

MATERIAL Y MÉTODOS

El desarrollo del trabajo experimental, con la recolección de la data, fue realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad Ing. Química y Metalúrgica de la UNJFSC.

Equipos e instrumentos.- un secador de bandejas batch, equipado con instrumentos y accesorios, que permiten controlar la velocidad del aire y la temperatura de calentamiento del aire. Además; tiene una balanza digital para registrar en el tiempo la masa del sólido y su pérdida de humedad. Por tanto; es posible obtener la velocidad de secado para diversos materiales, la cantidad de agua evaporada y la humedad relativa del aire, ver figura 1. Está constituido por: **1)** cámara de secado; **2)** bandejas; **3)** manómetro



diferencial; **4)** tablero de control; **5)** ventilador; **6)** cronómetro; **7)** balanza digital; **8) y 9)** sensores para temperatura del aire.

Figura 1. Equipo experimental de secado, con bandejas

Materiales utilizados.- Se utilizaron diversos productos agrícolas y frutícolas, tales como: Ají escabeche cortados y sin semillas, papa y camote cortados en rodajas, naranja, plátano y mango, en rodaja y sus cascaras.

Metodología experimental

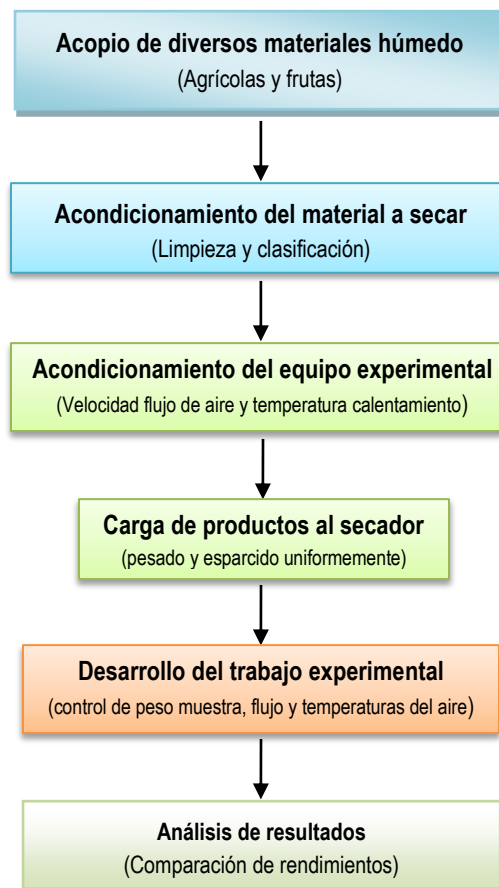


Figura 2. Diagrama del trabajo experimental previsto.



Procedimiento experimental.- Según Jimenez M. (1996 & 2010), con el tipo de equipo de laboratorio utilizado se puede realizar tres (3) tipos de experimentos:

- **Experimento A:** *Obtener las curvas características operacionales de un material sólido húmedo, a temperatura de secado constante y humedad (inicial y final) establecidas.*
- **Experimento B:** *Investigar la influencia del tamaño de partícula de un material sólido húmedo al ser secado.*
- **Experimento C:** *Investigar la influencia del flujo de aire en la velocidad de secado de un material húmedo.*

Para cualquiera de los casos citados, se siguió el procedimiento siguiente:

- **Encendido del ventilador** (soplador de aire). A continuación, se determinó en el manómetro la caída de presión máxima del sistema, cerrando el damper de tubería principal y abriendo el damper en tubo secundario. Con ésta información, se **estableció el flujo de aire necesario** -que debe permanecer constante- regulando la posición de los damper primario y secundario. Se dispone de un manómetro U con glicerina.
- **Encendido del sistema calefactor de aire**, con el controlador se establece la temperatura de la cámara de secado, según el tipo de producto. Determinando las temperaturas de entrada y salida del aire, a través de la cámara de secado, hasta llegar a condiciones de estado estacionario (demora 5-10 minutos aprox.), alcanzada la temperatura de equilibrio recién se procedió a cargar el material a secar.
- **Preparación del material a secar**, se pesó una cantidad significativa del material limpio y tamizado, considerando la capacidad máxima de la balanza digital es 500 g., que se esparce uniformemente en la bandeja experimental. **Finalmente se introduce la bandeja con el material húmedo al secador**, previamente calentado.
- **Registro de datos experimentales**, con intervalo definido –cada 3 ó 5 minutos- se procedió a pesar la muestra, anotando valores de tiempo transcurrido y masa húmeda (dependiendo del material, el equilibrio se alcanza entre 2-4 horas aprox.). *Simultáneamente registrar temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire*, a la entrada y salida del secador. También se registró la variación del manómetro, para calcular la velocidad del aire ingresado. La temperatura dentro de la cámara de secado es mantenida constante (es función del controlador).
- **Se recomienda trabajar con bastante cuidado para obtener precisión** de los datos experimentales a recolectar durante la prueba. Por tanto; debe tenerse preparado toda la instrumentación (cronómetro, termómetros, hoja de datos, etc.), **UNA VEZ INICIADO EL EXPERIMENTO NO HAY RETORNO.**
- Terminado el trabajo experimental, apagar primero el sistema de calefacción eléctrica, después de 3 minutos apagar el ventilador. finalmente realizar limpieza general del equipo.

RESULTADOS

El objetivo específico de la investigación, en su primera fase, estuvo enfocado a obtener datos confiables que serán utilizados como patrones experimentales para el diseño y la evaluación del secador móvil a desarrollarse en la segunda etapa del proyecto.



Los parámetros característicos de la operación de secado, fueron calculados utilizando las ecuaciones correspondientes que se encuentran en la bibliografía habitual (Couper J. & Walas S., 2010; Geankoplis C., 1995; Ocon J., 1980; Treybal R., 1988).

Los resultados obtenidos, usando Excel, se muestran en forma de tablas y gráficos consolidados para cada producto evaluado, conforme se detalla a continuación:

Tabla 1. Resultados comparativos, promedios, del secado de diversos productos agrícolas

Parámetros operacionales	Ají escabeche	papa, rodajas	camote, rodajas	naranja, cáscara	plátano, cáscara	Mandarina (cáscara)	mango cáscara
Cinética de Secado:							
Masa inicial, muestra húmeda (g)	151.6	142.20	139.6	131.07	100.5	150.00	90.00
Masa final, muestra seca, (g)	50.9	73.2	54.7	52.9	33.5	83.3	80.4
Masa agua evaporada (g)	100.7	69.0	84.9	78.2	67.0	66.7	9.6
Humedad (Kg agua/kg solido húmedo)	0.6600	0.4800	0.6000	0.6100	0.6700	0.4447	0.1063
Humedad, base seca, (Kg agua/kg solido seco)	1.9800	0.9400	1.9000	1.6600	2.0800	0.8007	0.1190
Temperatura secado, mínima (°C)	42.1	47.2	41.2	43.3	41.0	55.0	55.5
Temperatura secado, máxima (°C)	49.4	56.4	55.2	56.2	46.6	67.0	61.0
Temperatura secado, promedio (°C)	45.0	52.0	48.2	49.2	43.4	61.7	57.9
Datos psicrométricos aire-agua:							
Flujo de aire caliente, (kg/m ² _seg)	16.7142	15.7814	19.9302	16.8909	19.3145	9.1139	25.1904
Humedad crítica, (Kg agua/kg sólido seco)	0.4299	0.5593	0.3858	0.5024	0.5243	0.6690	0.0732
Humedad de equilibrio, (Kg agua/kg sólido seco)	0.0036	0.0049	0.0059	0.0242	0.0018	0.0331	0.0012
Temperatura prom. bulbo seco, entrada (°C)	22.4	23.0	22.8	25.9	26.0	26.0	23.3
Temperatura prom. bulbo húmedo, entrada (°C)	21.3	21.4	21.1	21.5	22.2	22.6	20.3
Temperatura prom. bulbo seco, salida (°C)	44.9	48.0	42.4	45.8	39.5	59.1	56.9
Temperatura prom. bulbo húmedo, salida (°C)	28.9	27.4	27.1	24.8	24.4	31.5	30.6
Tiempo de operación de secado, (minutos)	197	188	234	142	113	228	60
Intervalo de control de tiempo, (minutos)	3	3	4	3	4	3	3
N° de muestras utilizadas, por producto	3	3	2	3	2	2	1
N° de registros, de datos experimentales	213	198	119	142	62	76	20

Ref.: elaborada por autores (Diciembre 2013)

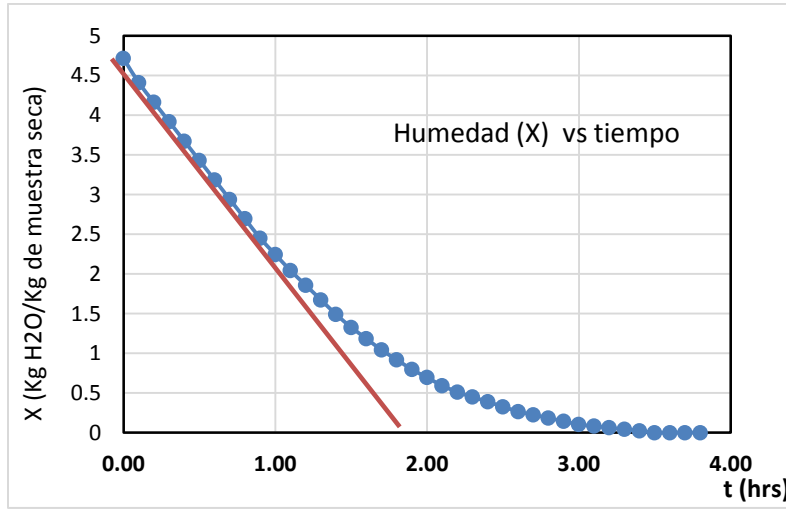


Gráfico 1. Perfil de la velocidad de secado

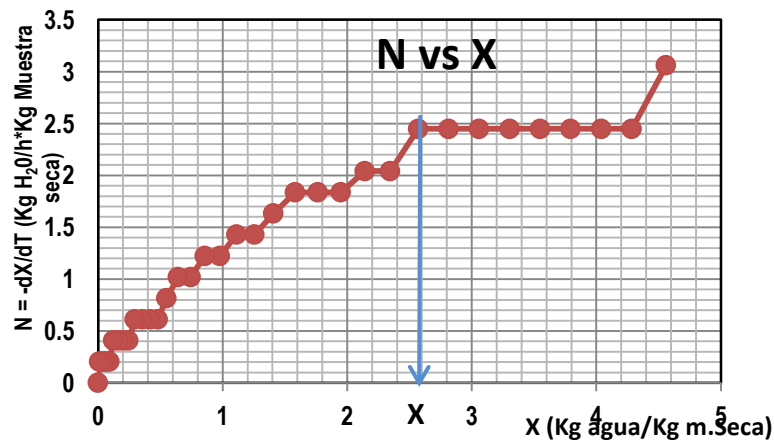


Gráfico 2. Periodos de la velocidad de secado

DISCUSIÓN

La tabla 1, muestra un resumen comparativo de los parámetros operacionales de la cinética y mecanismos del secado, para diversos productos agrícolas y frutícolas. Se observa que 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 muy elevada se presenta un problema que es el de la fuerza de tiro, donde si es demasiado fuerte para circular en la cabina de secado puede aspirar la materia a secar. Para los diversos experimentos realizados, la temperatura de la cámara de secado fluctúa entre los valores de 41 y 61 °C, regulado por un controlador automático. Estos influyen en los valores de temperatura de bulbo seco y húmedo del aire circulante.



En la gráfica 1 se observa que la velocidad de secado es más rápido debido a que en esta etapa se elimina la humedad de la superficie y los sólidos volátiles, hasta llegar a una humedad crítica, luego del cual esto se va a mantener cambiante, ya que esta humedad está referida a la humedad de equilibrio, la cual puede ser eliminada mediante un calentamiento brusco.

En la gráfica 2 la humedad libre con respecto al tiempo va disminuyendo hasta un tiempo en donde se encuentra constante, esto nos indica que la humedad llega a su punto de equilibrio con respecto a la presión de vapor del agua.

Los materiales celulares, especialmente de origen agrícola y frutícola, generalmente muestran elevados contenidos de humedad en el equilibrio. Esto se debe a la difusión de la humedad del líquido que puede derivarse de los gradientes de concentración entre el interior del sólido, donde la concentración es más alta, y la superficie donde es más baja. Estos gradientes se fijan durante el secado de la superficie.

CONCLUSIONES

La operación de secado es ampliamente utilizada en los diversos procesos industriales de la ingeniería química, a pesar de ser más económico la eliminación de humedad por métodos mecánicos que por métodos térmicos.

Se ha culminado la primera fase del proyecto de investigación tecnológica, diseño experimental y evaluación de los parámetros operacionales más importantes, en el secado de diversos productos agrícolas, utilizando un secador de bandejas batch a nivel banco. Donde la aplicación práctica de los conceptos teóricos de las diferentes humedades radica en que permiten conocer hasta que valor de humedad se debe secar un material para lograr el [objetivo](#) que se persigue.

Esta información experimental recolectada servirá como base fundamental para diseñar un secador móvil, que estará orientado a ser utilizado en el sector agrícola de la región a través de una propuesta tecnológica para dar valor agregado a dichos productos cuando hay sobreproducción y terminan como residuos sólidos orgánicos. A su vez puede aportar a mejorar la calidad de vida de las personas involucradas e interesadas en apoyar y beneficiarse con este estudio.

La idea es que tras la experiencia de estos ensayos, se puedan diseñar y crear sistemas modulares, lo que significa que se fabricarían en un lugar y se pueden instalar en cualquier sitio diferente, no como los centros de tratamiento convencionales que requieren realizar importantes edificaciones donde se vayan a tratar los productos a secar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a las personas que apoyaron en la realización de la primera parte de este trabajo experimental. Especialmente la colaboración en la recopilación de la data experimental, de los alumnos de las asignaturas: Laboratorio de Operaciones Unitarias, Análisis y Síntesis de Procesos, de la EAP Ing. Química; y de los cursos de Física, de Facultad de Ciencias, durante los Semestres Académicos 2013-I y 2013-II.

REFERENCIAS



- CARRANZA J. & SÁNCHEZ M.** (2002). *Cinética de Secado de Plátano y Yuca*. Revista Amazónica de Investigación pp.15-25. Iquitos-Perú: Facultad Ingeniería en Industrias Alimentarias UNAP.
- COUPER James & Walas Stanley.** (2010). *CHEMICAL PROCESS EQUIPMENT: Selection and Design*. USA: Editorial Elsevier, 2da. Edición.
- GEANKOPLIS Christie.** (1995). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. México D.F.: Editora Continental, 2da. Edición.
- JIMENEZ ESCOBEDO, Manuel J.** (1996, Diciembre). *Simulación de Experimentos del Laboratorio de Operaciones Unitarias, utilizando un Computador Personal*. (Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú.
- JIMENEZ ESCOBEDO, Manuel J.** (2010, Diciembre). *LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS: Manual de Experimentos*. (Texto auspiciado por Oficina Central de Investigación y Gestión, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión), Huacho-Perú.
- MUÑOZ M., Deyanira & CABRERA G.** (2006, febrero 27). *Secado directo e indirecto de piña*. (Tesis para optar título profesional de Ingeniero Agroindustrial), Universidad del Cauca. Colombia.
- OCAMPO Aquiles.** (2006, Junio). *Modelo Cinético del Secado de la Pulpa de Mango*. Revista EIA, ISSN 1794-1237, pp.119-128. Medellín-Colombia: Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- OCON Joaquín & TOJO Gabriel.** (1980). *PROBLEMAS DE INGENIERÍA QUÍMICA: Operaciones Básicas*. España: Editorial Alhambra.
- TREYBAL Robert E.** (1988). *Operaciones de Transferencia de Masa*. México: Editorial Mc Graw Hill, 2da.edicion.
- www.Chemresource.com (proporciona software específico para cálculos de ingeniería, 2013)
- www.revistavirtualpro.com (*Tópicos* selectos de Ing. Agroindustrial, Dic. 2013, Colombia)