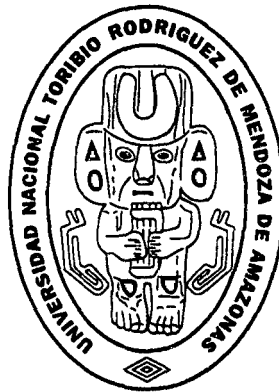


**UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA  
DE AMAZONAS**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**



**“EFECTO DE LA TEMPERATURA Y VELOCIDAD DEL AIRE DE UN SECADOR  
DE BANDEJAS EN LA CINÉTICA DE SECADO DE HOJUELAS DE PLÁTANO  
(*Musa acuminata*) VARIEDAD INGUIRI”**

**Tesis para obtener el título profesional de:  
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

**Presentada por:**

**Bach. ROBERT JAVIER CRUZALEGUI FERNÁNDEZ**

**Asesor:**

**Ing. WILSON MANUEL CASTRO SILUPU**

**Amazonas - Perú**

**2008**

## **DEDICATORIA**

Con inmenso amor dedico este trabajo a mis queridos padres **BENJAMÍN CRUZALEGUI BARZALLO** y **MARÍA NONILA FERNÁNDEZ MONDRAGÓN**, que con su invaluable sacrificio, dedicación y apoyo incondicional hicieron posible la culminación de mi carrera profesional.

A mi hermano **ABNER BENJAMÍN CRUZALEGUI DELGADO**, por su apoyo incondicional en la culminación del más caro de mis anhelos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero agradezco a Dios por la fortaleza que me ha dado a través de todo el camino que he recorrido y por permitirme realizar una de mis metas más anheladas.

Agradezco a todas las personas que de alguna manera u otra, intervinieron en esta investigación. De manera muy especial el más grande agradecimiento y reconocimiento a mi asesor el Ing. Wilson Manuel Castro Silupú por su permanente colaboración y apoyo incondicional en el desarrollo y culminación de mi Proyecto e Informe de Tesis.

De igual forma gracias a mis compañeros de la Carrera Profesional de Ingeniería Agroindustrial, por su apoyo y hermosa amistad que me brindaron a lo largo de los cinco años de mi carrera universitaria.

## **AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

**Dr. Manuel Alejandro Borja Alcalde**  
***Presidente Comisión Organizadora***

**Dr. Víctor Hugo Chanduví Cornejo**  
***Vicepresidente Académico***

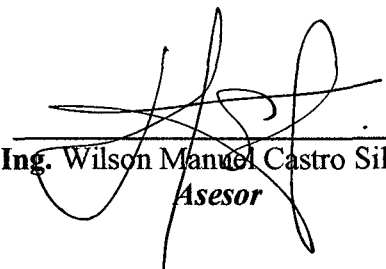
**Ing. Raúl Sánchez Merino**  
***Vicepresidente Administrativo***

**Ms.C. Miguel Ángel Barrena Gurbillón**  
***Responsable (e) de la Carrera Profesional de Ingeniería Agroindustrial***

## VISTO BUENO DEL ASESOR

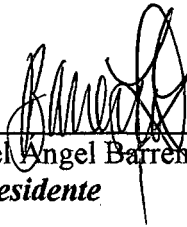
Yo, Ing. Wilson Manuel CASTRO SILUPU, identificado con DNI N° 40322327, con domicilio legal en el Jr. Santa Lucía N° 161, Docente a Dedicación Exclusiva de la Carrera Profesional de Ingeniería Agroindustrial, asesor de la tesis titulada “**Efecto de la temperatura y velocidad del aire de un secador de bandejas en la cinética de secado de hojuelas de plátano (*Musa acuminata*) variedad inguiri**” presentado por el Br. Robert Javier Cruzalegui Fernández, egresado de la Carrera Profesional de Ingeniería Agroindustrial.

Por lo indicado doy testimonio y visto bueno, que el Bach. Robert Javier Cruzalegui Fernández, ha ejecutado la tesis mencionada, por lo que en fe a la verdad firmo la presente.

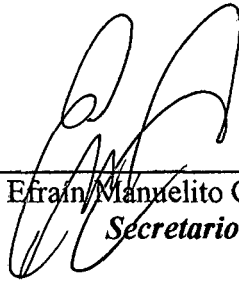


Ing. Wilson Manuel Castro Silupu  
*Asesor*

## **JURADO EVALUADOR**



**Ms.C. Miguel Angel Barrena Gurbillón**  
*Presidente*



**Ing. Efraín Manuelito Castro Alayo**  
*Secretario*



**Ing. Daniel José Salvador Rodríguez**  
*Vocal*

## TABLA DE CONTENIDOS

	<b>Pág</b>
<b>DEDICATORIA</b>	i
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	ii
<b>AUTORIDADES UNIVERSITARIAS</b>	iii
<b>VISTO BUENO DEL ASESOR</b>	iv
<b>JURADO EVALUADOR</b>	v
<b>RESUMEN</b>	xii
<b>ABSTRACT</b>	xiii
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1. Clasificación taxonómica-----	5
1.2. Composición química del plátano-----	5
1.3. Generalidades del secado-----	7
1.4. Equipos para el secado-----	9
1.5. Estática de secado -----	13
1.6. Curvas de velocidad de secado-----	15
1.6.1. Métodos experimentales-----	15
1.6.2. Curvas de velocidad de secado para condiciones de secado constante-----	17
1.6.3. Secado durante el periodo de velocidad decreciente-----	21
<b>II. MATERIAL Y MÉTODOS</b>	22
2.1. Material biológico-----	22
2.2. Selección y acondicionamiento de la materia prima-----	22
2.3. Obtención de datos de secado en producto-----	23
2.4. Determinación de la cinética -----	24
2.5. Análisis estadístico-----	25
2.6. Análisis químico del mejor tratamiento-----	29
<b>III. RESULTADOS</b>	30

3.1. Determinación experimental de la cinética de secado-----	30
3.2. Análisis ANVA-----	36
3.3. Comparación de medias-----	38
<b>IV. DISCUSION</b>	<b>39</b>
<b>V. CONCLUSIONES</b>	<b>42</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES</b>	<b>44</b>
<b>VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>45</b>
<b>VII. ANEXOS</b>	<b>49</b>



## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Pág</b>
<b>1:</b> Composición proximal del plátano por cada 100 g de pulpa-----	6
<b>2:</b> Contenido de vitaminas del plátano por cada 100 g de pulpa-----	6
<b>3:</b> Contenido de minerales del plátano por cada 100 g de pulpa-----	7
<b>4:</b> Características y técnicas para el análisis químico de la harina de plátano-----	29
<b>5:</b> Análisis de varianza para el modelo estadístico factorial DCA para los tiempos de secado de hojuelas de plátano -----	36
<b>6:</b> Desviación estándar para la prueba de diferencia mínima significativa y Tukey del análisis de efectos principales-----	38
<b>7</b> Composición de la harina de plátano obtenida -----	49
<b>8:</b> Valores experimentales del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo en el secado de hojuelas de plátano a temperatura de 40°C y velocidad del aire de 2,5 m/s -----	50
<b>9:</b> Valores experimentales del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo en el secado de hojuelas de plátano a temperatura de 40°C y velocidad del aire de 3,0 m/s -----	51
<b>10:</b> Valores experimentales del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo en el secado de hojuelas de plátano a temperatura de 40°C y velocidad del aire de 3,5 m/s-----	52
<b>11:</b> Valores experimentales del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo en el secado de hojuelas de plátano a temperatura de 50°C y velocidad del aire de 2,5 m/s-----	52
<b>12:</b> Valores experimentales del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo en el secado de hojuelas de plátano a temperatura de 50°C y velocidad del aire de 3,0 m/s-----	53

<b>13:</b> Valores experimentales del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo en el secado de hojuelas de plátano a temperatura de 50°C y velocidad del aire de 3,5 m/s-----	55
<b>14:</b> Tiempos de secado de las hojuelas de plátano por tratamiento-----	56
<b>15:</b> Comparación de los tratamientos del factor A con un nivel de significación de 0,05 por el método LSD-----	56
<b>16:</b> Comparación de los tratamientos del factor B con un nivel de significación de 0,05 por el método LSD-----	56
<b>17:</b> Cuadro de doble entrada para el método LSD para el factor B-----	57
<b>18:</b> Comparación de los tratamientos del factor A con un nivel de significación de 0,05 por el método Tukey-----	57
<b>19:</b> Comparación de los tratamientos del factor B con un nivel de significación de 0,05 por el método Tukey-----	57
<b>20:</b> Cuadro de doble entrada para el método Tukey para el factor B-----	57

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Pág</b>
<b>1:</b> Contenido de humedad libre en función del tiempo de secado-----	18
<b>2:</b> Curva de velocidad de secado-----	20
<b>3:</b> Obtención de hojuelas de plátano verde-----	22
<b>4:</b> Obtención de hojuelas secas y determinación de la cinética de secado---	23
<b>5:</b> Esquema experimental para la determinación de la cinética de secado a diferentes temperaturas y velocidades de aire-----	24
<b>6:</b> Contenido de humedad libre en función del tiempo ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ; $v = 2,5$ m/s)-----	30
<b>7:</b> Contenido de humedad libre en función del tiempo ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ; $v = 3,0$ m/s)-----	31
<b>8:</b> Contenido de humedad libre en función del tiempo ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ; $v = 3,5$ m/s)-----	31
<b>9:</b> Contenido de humedad libre en función del tiempo ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $v = 2,5$ m/s)-----	32
<b>10:</b> Contenido de humedad libre en función del tiempo ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $v = 3,0$ m/s)-----	33
<b>11:</b> Contenido de humedad libre en función del tiempo ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $v = 3,5$ m/s)-----	33
<b>12:</b> Curva de velocidad de secado ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ; $v = 2,5, 3,0, 3,5$ m/s)-----	34
<b>13:</b> Curva de velocidad de secado ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $v = 2,5, 3,0, 3,5$ m/s)-----	35
<b>14:</b> Tiempo de secado en función de la temperatura-----	37
<b>15:</b> Tiempo de secado en función de la velocidad del aire-----	37
<b>16:</b> Exportaciones de plátanos a diversos países a precio FOB 2000-2005--	49
<b>17:</b> Selección y acondicionamiento de la materia prima-----	58
<b>18:</b> Preparación de las hojuelas de plátano verde-----	58

<b>19: Acondicionamiento del equipo a los diferentes niveles de velocidad del aire-----</b>	<b>59</b>
<b>20: Acondicionamiento del equipo a los diferentes niveles de temperatura del aire-----</b>	<b>59</b>
<b>21: Secado de las hojuelas de plátano en el secador de bandejas-----</b>	<b>60</b>
<b>22: Toma de lecturas a diferentes intervalos de tiempos-----</b>	<b>60</b>

## RESUMEN

En el presente trabajo se estudió el efecto de la temperatura y velocidad del aire de un secador de bandejas de laboratorio en la cinética de secado de hojuelas de plátano (*Musa acuminata*) variedad inguiri, procedente de la provincia de Rodríguez de Mendoza (Amazonas). Las hojuelas tuvieron un espesor promedio de 4 – 5 mm.

El flujo de trabajo seguido para la obtención de las hojuelas de plátano una vez obtenida la materia prima fue: selección y acondicionamiento, preparación de hojuelas (4 – 5mm de espesor), secado de las hojuelas ( $T = 40 - 50^{\circ}\text{C}$  y velocidad del aire de 2,5 – 3,0 – 3,5m/s), determinación de la cinética de secado, análisis estadístico y finalmente del mejor tratamiento se obtuvo harina a la que se realizó un análisis químico de los componentes más importantes para la agroindustria del plátano.

En el diseño experimental se empleó dos variables operacionales; temperatura del aire de secado (2 niveles) y velocidad del aire de secado (3 niveles), obteniéndose 6 tratamientos, además se aplicó el diseño estadístico factorial completamente al azar con cuatro repeticiones por cada tratamiento, dando como resultado 24 unidades experimentales. Además se utilizó el análisis de varianza con un nivel de significancia de 95% y se llevaron a cabo comparaciones entre medias individuales de cada tratamiento, por los métodos de diferencia mínima significativa y Tukey, obteniendo como resultado el tratamiento más eficiente a una temperatura de  $50^{\circ}\text{C}$  y velocidad del aire de 3,5 m/s, en un tiempo mínimo de 3,0 h.

## ABSTRACT

In this paper we studied the effect of temperature and air velocity of a dryer trays in the laboratory kinetic drying flakes banana (*Musa acuminata*) inguiri range from the province Rodriguez de Mendoza (Amazonas). The flakes had an average thickness of 4 to 5 mm.

The workflow followed for obtaining the flakes banana once the raw material was obtained: selection and packaging, preparing flakes (4 - 5mm thick), drying the flakes ( $T = 40$  to  $50$  ° C and air velocity from 2,5 to 3,0 – 3,5 m / s), determination of the kinetics of drying, statistical analysis and finally the best treatment was obtained flour to be conducted a chemical analysis of the most important components for the agribusiness banana.

The experimental design was used two variables operational; air temperature drying (2 levels) and speed of air-drying (3 levels), obtaining 6 treatments, also applied statistical design factorial completely at random with four repetitions for each treatment , Resulting in 24 experimental units. Besides using the analysis of variance with a level of significance of 95% and were carried out comparisons between average individual treatment, methods and significant difference minimum Tukey, which resulted in the most effective treatment at a temperature of  $50$  ° C and air velocity of 3,5 m / s a minimum of 3,0 h.

## I. INTRODUCCIÓN

La producción de plátano en el Perú es del tipo orgánico, teniendo una demanda creciente este tipo de producción e incrementándose en los últimos años las oportunidades de exportación. Este producto está experimentando una interesante evolución en la producción nacional desde el año 2000 al año 2007, con un incremento del 7,88 %, y generando un aumento del valor de producción agropecuaria de S/ 54 469 millones de soles; asimismo, para el año 2007 se exportaron 73 938 toneladas por un valor FOB de US \$ 31 452,30 a los principales destinos, como son: Estados Unidos (45 %), Bélgica (20 %), Holanda (19 %) y Japón (14 %) (Figura 16).

La producción de plátano se da en toda la selva y costa norte del país, alcanzando en el año 2007 las 1 837 384 toneladas, en una superficie de 150 605,25 hectáreas, doblando lo registrado a inicios de los 90. Los departamentos de mayor producción son: Loreto (21 %), San Martín (17 %), Ucayali (14 %), Piura (10 %), Junín, Amazonas y Huánuco (8 % cada uno), siendo el rendimiento nacional promedio de 12,2 toneladas por hectárea. Aproximadamente el 90 % de la producción nacional es destinada al autoconsumo, comercialización regional y nacional; la diferencia se exporta a diferentes mercados internacionales.

Actualmente, pequeños agricultores ubicados en Piura y Tumbes exportan plátano orgánico, hacia mercados de Estados Unidos y Europa, con un crecimiento significativo en los últimos tres años. El principal mercado de consumo nacional es la región Lima, la

cual absorbe aproximadamente el 90 % de la producción total de la selva y costa norte del país.

En el Perú el consumo de plátano es principalmente como fruta fresca, a pesar de la gran diversidad de alternativas agroindustriales (chips, almidón, harina, fruta deshidratada, licores, panificación, industria farmacéutica, alimentos para niños, etc.). Por este motivo la presente investigación pretende aportar conocimientos básicos para la industrialización del plátano y obtención de harina como una alternativa para la agroindustria de nuestra región.

El principal objetivo del secado es reducir la humedad a niveles tales que no se produzca descomposición durante la manipulación y almacenamiento posterior de los productos agrícolas; para ello, se hace circular aire con capacidad para extraer agua de la materia, en consecuencia la capacidad de extracción de agua del aire esta en relación a su humedad relativa (Giambastiani y Rubiolo 2002).

Se ha evaluado el comportamiento de la velocidad de secado de cáscara de piña mediante secado directo e indirecto. Los experimentos los realizaron utilizando un deshidratador solar y un secador de contacto directo a escala piloto, bajo las condiciones ambientales de Candelaria en el Valle del Cauca y Manizales, en Caldas – Colombia; obteniendo las curvas de secado con una eficiencia del 73 % y concluyendo que la cinética de secado en ambos sistemas se diferencia en los tiempos de secado. (Muños y Cabrera, 2006).



En un estudio para el modelado de la cinética de secado por aire caliente del alga *Gracilaria* (*Gracilaria chilensis*); se utilizó un secador convectivo a cinco temperaturas de bulbo seco (30, 40, 50, 60 y 70 °C) y velocidad de aire constante de  $2,0 \pm 0,2$  m/s, empleando tres modelos empíricos (Newton, Henderson-Pabis & Page). Durante el experimento se observó solamente el periodo de velocidad decreciente; por lo que utilizaron la ecuación de la segunda Ley de Fick, para el cálculo de la difusividad efectiva de agua. Según el análisis estadístico el modelo de Page mostró el mejor ajuste sobre los datos experimentales, otorgando así una buena herramienta para el modelado de la cinética de secado industrial de la *Gracilaria chilensis* y el cálculo del tiempo de secado a diferentes temperaturas, con el fin de alcanzar un contenido de humedad comercial aceptable internacionalmente (Vega y cols., 2006).

Otros investigadores han estudiado la influencia de la concentración de azúcar (50 y 70 °Brix) y de la temperatura (50 y 70 °C) en la deshidratación osmótica de la Banana “Nanica” (*Musa cavendishii*, L.). Para el secado complementario se empleó un secador de lecho fijo a 60 °C y velocidad del aire 2,0 m/s. Durante el secado se verificó el comportamiento cinético del proceso, usando datos experimentales de los periodos de velocidad decrecientes, obteniéndose curvas de velocidad de secado versus humedad basándose en un modelo difusional. De los resultados obtenidos, se observó que la difusividad efectiva no estuvo influenciada por la concentración de azúcar y tampoco por la temperatura (Gaspareto y cols., 2004).

La cinética de secado del pimiento (*cv Lamuyo*) ha sido estudiado a diferentes temperaturas de trabajo (50, 60, 70 y 80 °C), con velocidad del aire constante a 2,5 m/s

igual que la densidad de carga en  $7 \text{ Kg/m}^2$ . Los experimentos se llevaron a cabo en un secador de laboratorio que permitió registrar la masa de la muestra en tiempo real. Con los resultados se observa que durante el proceso de secado se pueden distinguir tres etapas; una primera corta etapa de inducción; una segunda etapa hasta humedades de producto cercana a 1,0 gramo de agua por gramo de materia seca y en la que la velocidad de secado disminuye linealmente con la humedad libre del producto; así mismo una tercera etapa de secado más lenta, donde la velocidad de secado se modela con las ecuaciones difusionales de Fick. La comparación de los valores de humedad experimentales con los calculados según el modelo propuesto demuestra que las ecuaciones utilizadas describen adecuadamente el proceso y sirven de base para el cálculo del tiempo de secado de este producto (Vega y cols. 2005).

Usando plátano variedad “dominico” verde, con temperaturas de 40, 50 y 60 °C, conjugando cada temperatura con diferentes velocidades de aire: 5,08, 7,62 y 9,65 m/s variando el espesor del producto a secar: 0,2 cm de espesor, 2,0 cm de ancho y 3,0 cm de largo; 0,4 cm de espesor, 2,0 cm de ancho y 3,0 cm de largo. El plátano, a temperatura de 50 °C y velocidad del aire de 7,62 m/s con un espesor de 0,2 cm, presentó periodo de secado con velocidad constante por una duración de 0,325 h y secado a velocidad decreciente por un tiempo de 2,67 h (Carranza y Sánchez, 2002).

### 1.1. Clasificación taxonómica del plátano

La taxonomía del plátano inguiri es la siguiente: (Mostacero y cols. 2 002)

<b>Reino</b>	: Vegetal
<b>División</b>	: Angiospermae
<b>Clase</b>	: Monocotyledoneae
<b>Orden</b>	: Musales
<b>Familia</b>	: Musaceae
<b>Género</b>	: Musa
<b>Especie</b>	: <i>Musa acuminata</i>
<b>Nombre común</b>	: Plátano inguiri

### 1.2. Composición química del plátano

El plátano en su composición, teniendo en cuenta el fruto verde, es pobre en proteínas, casi no contiene grasa y sus componentes más significativos son agua y carbohidratos.

La Tabla 1 muestra la composición proximal de la pulpa de plátano y las Tablas 2 y 3 el contenido de vitaminas y minerales respectivamente.

**Tabla 1:** Composición proximal del plátano por cada 100 g de pulpa

<b>Componente</b>	<b>(g)</b>
Proteínas	1,10
Grasas	0,20
Carbohidratos	22,00
Agua	75,00
Vitaminas	0,23
Minerales	0,44

Fuente: Adaptado de Vásquez y cols. 2005.

**Tabla 2:** Contenido de vitaminas del plátano por cada 100 g de pulpa

<b>Vitaminas</b>	<b>(mg)</b>
Vitamina A	190,00
Vitamina C	10,00
Vitamina E	0,45
Vitamina K	2,00
Vitamina B - 6	0,60
Tiamina	0,05
Riboflavina	0,06
Niacina	0,70
Folacina	28,00
Ácido pantoténico	0,25
Biotina	4,40

Fuente: Adaptado de Vásquez y cols. 2005.

**Tabla 3:** Contenido de minerales del plátano por cada 100 g de pulpa

<b>Minerales</b>	<b>(mg)</b>
Potasio	370,00
Calcio	8,00
Fósforo	26,00
Magnesio	33,00
Sodio	1,00
Hierro	0,70
Cobre	0,11
Manganeso	0,13
Zinc	0,15
Selenio	0,95
Cromo	0,02

Fuente: Adaptado de Vásquez y cols. 2005.

### **1.3. Generalidades del secado**

**Secado.-** El término secado se refiere a la eliminación de la humedad de una sustancia, que permite separar un líquido de un sólido y por lo general el líquido casi siempre es eliminado en forma de vapor con aire en pequeñas cantidades.

**Operaciones de secado.-** Las operaciones de secado se clasifican ampliamente según sean por lotes o continuas. Pueden aplicarse específicamente desde el punto de vista de la sustancia que se está secando. Así, la operación denominada secado por lotes generalmente es un proceso en semilotes, en donde cierta cantidad de material que se va a secar se expone a una corriente de aire que fluye continuamente y el proceso se verifica periódicamente. En las operaciones continuas, tanto el material a secar como la corriente de aire a secar pasan continuamente a través del equipo. El equipo que se utiliza para el

secado se puede clasificar de acuerdo con el tipo del equipo y por la naturaleza del proceso de secado. La clasificación siguiente es útil para delinear las teorías de secado y los métodos de diseño (Treybal, 1991):

- **Método de operación por lotes o discontinuo:** el equipo por lotes o semilotes, se opera intermitentemente o cíclicamente en condiciones de estado no estacionario. El secador se carga con el material, que permanece en el equipo hasta que se seca; entonces, el secador se descarga y nuevamente se vuelve a cargar con un nuevo lote.
- **Método de operación continuo.-** Los secadores continuos generalmente se operan en estado estacionario, la alimentación se carga continuamente al secador y va saliendo sin acumularse en el equipo.
- **Método de obtención del calor necesario para la eliminación de la humedad:** en los secadores directos, el calor se obtiene completamente por contacto directo del material con el gas caliente en el cual tiene lugar la eliminación del agua en forma de vapor. En los secadores indirectos, el calor se obtiene independientemente del gas que se utiliza para arrastrar la humedad.
- **Naturaleza del material que se va a secar:** el material que puede ser un sólido rígido como madera o triplay, un material flexible como tela o papel, un sólido granular, como una masa de cristales, una pasta ligera o un sólido, puede ser frágil o fuerte. La forma física de la sustancia y los diferentes métodos de manejo necesario tiene tal vez, la mayor influencia sobre el secado que se va a utilizar.

#### **1.4. Equipos para el secado**

**Secadores de bandejas.-** El secador de bandejas que también se le llama secador de anaqueles, de gabinete o de compartimentos. Un secador de bandejas, tiene platos móviles que se cargan y descargan de un gabinete, sobre los cuales se coloca el sólido a secar. Una vez cargado, el gabinete se cierra y con un ventilador se introduce aire caliente a través y entre los platos, para la eliminación del agua en forma de vapor (Treybal, 1991).

En el caso de materiales granulares, el sólido puede arreglarse en lechos delgados sostenidos sobre mallas, de forma que el aire pueda pasarse a través de los lechos. Esto produce un secado mucho más rápido. Una de las dificultades más importantes en la utilización de secadores del tipo descrito es la no uniformidad del contenido en humedad propia del plato terminado que se extrae de diferentes partes del secador. Esta falta de uniformidad es principalmente el resultado del movimiento inadecuado y no uniforme del aire dentro del secador (Geankoplis, 2003).

Los secadores de este tipo son relativamente baratos de construir y requieren bajos costos de mantenimiento. Sin embargo su operación es costosa debido a la baja economía calorífica y altos costos de trabajo; ya que cada vez que el secador se abre para descargar y cargar, la temperatura del interior baja, y como consecuencia todas las partes metálicas del secador deben calentarse nuevamente a la temperatura de operación. Los requerimientos de mano de obra para la carga, descarga y supervisión del ciclo de secado son altos (Treybal, 1991).

**Secadores de anaquel al vacío.-** Son secadores que se calientan indirectamente, operan por lotes similares a los de bandejas, cuyos gabinetes hechos de fierro colado o de acero, tienen puertas que cierran perfectamente; de forma que puede operarse a presiones inferiores a la atmosférica. No se pasa ni se recircula aire a través de estos secadores. Los platos que contienen el sólido por secar, descansan sobre anaqueles huecos a través de los cuales se pasa agua tibia o vapor, a fin de proporcionar el calor necesario para la eliminación de la humedad. El calor se conduce hasta el sólido a través del metal de los anaqueles y platos. Después de cargar y sellar, el aire en el secador se evacúa mediante una bomba de vacío mecánica a un eyector de vapor luego se continúa la evaporación de la humedad. Los vapores pasan generalmente hasta un condensador, en donde se licuan y se recolectan; solo el gas no condensable se saca de la bomba (Treybal, 1991).

**Secadores de charolas con agitación.-** Estos secadores pueden utilizarse para secar pastas o lodos en lotes pequeños, son láminas circulares, ligeras, de 1 a 2 m de longitud y 0,3 a 0,6 m de diámetro con el fondo plano y los lados verticales. Las charolas son enchaquetadas para admitir el vapor o agua caliente para el calentamiento, las pastas o lodo en la charola se agita y se despega mediante una serie de rastrillos que giran, con el fin de exponer nuevo material a la superficie caliente. La humedad se elimina a la atmósfera en el caso de los secadores de charola atmosféricos; la charola también puede estar abierta y operar al vacío (Treybal, 1991).

**Secadores giratorios al vacío.-** Secadores con cubiertas cilíndricas con chaqueta de vapor arregladas en forma horizontal, en las cuales puede secarse un lodo o pasta, al



vacío. El lodo se agita mediante una serie de hojas giratorias unidas a un eje central horizontal que pasa a través de los puntos de la cubierta cilíndrica (Treybal, 1991).

Los secadores descritos anteriormente tales como los de **anaquel al vacío, charolas con agitación, giratorios al vacío** se usan para secar materiales costosos o sensibles a la temperatura, o bien que se oxiden fácilmente. Son muy útiles para manejar materiales con disolventes tóxicos o valiosos (Geankoplis, 2003).

**Secadores continuos de túnel.-** Suelen ser compartimientos de bandejas o de carretillas que operan en serie. Los sólidos se colocan sobre bandejas o en carretillas que se desplazan continuamente por un túnel con gas caliente que pasan sobre la superficie de cada bandeja. El flujo de aire caliente puede ser a contracorriente, en paralelo, o una combinación de ambos. Muchos alimentos se secan por este procedimiento. Cuando se desea secar partículas sólidas granulares, pueden utilizarse transportadores perforados o de fondo de tamiz. Los sólidos granulares húmedos se transportan en forma de una capa que tiene entre 25 y 150 mm de profundidad, sobre una superficie de tamiz o perforada a través de la cual se fuerza el paso del aire caliente, ya sea hacia arriba o hacia abajo. El secador consta de diversas secciones en serie, cada una con un ventilador y serpentines de calentamiento. Un ventilador adicional extrae cierta cantidad de aire hacia la atmósfera. En algunos casos, los materiales en forma de pasta pueden preformarse en cilindros y colocarse sobre el transportador para secarse (Geankoplis, 2003).

**Secadores rotatorios.-** Constan de un cilindro hueco que gira por lo general, sobre su eje, con una ligera inclinación hacia la salida. Los sólidos granulares húmedos se alimentan por la parte superior y se desplaza por el cilindro a medida que éste gira. El

calentamiento se lleva a cabo por contacto directo con los gases calientes mediante un flujo a contracorriente. En algunos casos, el calentamiento es por contacto indirecto a través de la pared calentada del cilindro. Las partículas granulares se desplazan hacia delante con lentitud y una distancia corta antes de caer a través de los gases. Existen muchas otras variaciones del secador rotatorio que se describen en otras literaturas (Geankoplis, 2003).

**Secadores de tambor,-** Constan de un tambor de metal calentado, en cuyo exterior se evapora una capa delgada de un líquido o una sustancia hasta que se seca. El sólido seco final se le raspa al tambor, que gira lentamente. Los secadores de tambor son adecuados para procesar suspensiones o pastas de sólidos finos, así como soluciones verdaderas. El tambor funciona en parte como evaporador y en parte como secador. Otras variaciones del secador de tambor son los tambores rotatorios dobles con alimentación por inmersión, o bien con alimentación superior en el espacio entre los dos tambores. El puré de papa se procesa en secadores de tambor para obtener el material en forma de escamas (Geankoplis, 2003).

**Secadores por aspersion.-** En un secador por aspersion un líquido o una suspension se atomizan o se rocía en una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se evapora de dichas gotas con rapidez, y se obtiene partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas. El flujo de gas y de líquido de la cámara de aspersion puede ser a contracorriente, en paralelo, o una combinación de ambos.

Las gotas finas se forman al introducir el líquido en toberas de atomización o discos giratorios de rociado de alta velocidad en el interior de una cámara cilíndrica. Es

necesario asegurarse de que las gotas o partículas húmedas de los sólidos no choquen no se adhieran a las superficies sólidas antes de que hayan secado. Por consiguiente, se emplean cámaras bastante grandes. Los sólidos secos salen por el fondo de la cámara a través de un transportador de tornillo. Los gases de escape fluyen hacia un separador de ciclón para filtrar las partículas muy finas. Las partículas que se obtiene son muy ligeras y bastante porosas. La leche en polvo se obtiene mediante este proceso (Geankoplis, 2003).

### 1.5. Estática de secado

**Humedad (X).**- La humedad de una mezcla aire – vapor de agua se define como los kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco, esta definición de la humedad solo depende de la presión parcial del vapor ( $p_v$ ) de agua en el aire y de presión total ( $P$ ) (Geankoplis, 2003).

El contenido de humedad de un sólido puede expresarse sobre base seca o base húmeda. En los cálculos de secado resulta mas conveniente referir la humedad a base seca, debido a que el peso seco permanece constante a lo largo del proceso de secado (Ocón y Tojo, 1980).

El contenido de humedad en base húmeda de un sólido o solución generalmente se describe en función del porcentaje en peso de humedad; a menos que se indique otra cosa, se sobreentiende que está expresado en base húmeda como  $(\text{Kg H}_2\text{O} / \text{Kg sh})100 = [\text{Kg H}_2\text{O} / (\text{Kg ss} + \text{Kg H}_2\text{O})]100 = 100X / (1 + X)$  y el contenido de humedad en base seca que se expresa como  $\text{Kg H}_2\text{O} / \text{Kg ss} = 100X$  (Treybal, 1991).

**Humedad de equilibrio ( $X^*$ ).**- Si el material contiene mas humedad que su valor de equilibrio en contacto con un gas a determinada humedad y temperatura, se secará hasta alcanzar su valor de equilibrio; si el material contiene menos humedad que su valor de equilibrio, adsorberá agua hasta alcanzar dicho valor de equilibrio (Geankoplis, 2003).

El vapor de agua que acompaña al aire ejerce una presión de vapor determinada; se alcanza las condiciones de equilibrio cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua en el aire. Se denominará humedad de equilibrio del sólido a la humedad alcanzada por el sólido en equilibrio con el aire en condiciones dadas (Ocón y Tojo, 1980).

**Humedad ligada.**- Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura (Treybal, 1991).

Humedad ligada o agua ligada, es el valor de la humedad de equilibrio del sólido en contacto con aire saturado, o bien la humedad mínima del sólido necesaria para que este deje de comportarse como higroscópico (Ocón y Tojo, 1980).

**Humedad libre.**- Se denomina humedad libre de un sólido con respecto al aire en condiciones determinadas, a la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio con el aire en las condiciones dadas  $F = X - X^*$ . Por consiguiente es la humedad que puede perder el sólido después de un contacto suficientemente prolongado con aire en condiciones constantes y depende tanto de la humedad del sólido como de la humedad relativa del aire (Ocón y Tojo, 1980).

## **1.6. Curvas de velocidad de secado**

### **1.6.1. Métodos experimentales**

Con el fin de fijar horarios de secado y determinar el tamaño de equipo, es necesario saber el tiempo que se requerirá para secar una sustancia a partir de un contenido de humedad a otra en condiciones específicas. También se desea calcular el efecto que tendrán las diferentes condiciones de secado (temperatura, velocidad y humedad del aire) en el tiempo de secado (Treybal 1991).

El secado de sólidos incluye dos procesos fundamentales y simultáneos: 1) se transmite calor para evaporar el líquido y 2) se transmite masa en forma de líquido o vapor dentro del sólido; así como también vapor desde la superficie. Los factores que regulan las velocidades de estos procesos determinan la rapidez o el índice de secado (Perry, 2002).

Los secadores comerciales difieren fundamentalmente en los métodos de transferencia de calor utilizados. Estas operaciones de secado industrial podrán utilizar transferencia de calor por convección, conducción, radiación o una combinación de estos. Sin embargo, en cada caso el calor debe fluir hacia la superficie externa y luego al interior del sólido (Perry, 2002).

La masa se transfiere durante el secado en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor se desprende de las superficies expuestas. El movimiento dentro del sólido se debe a un gradiente de concentración que depende de las condiciones del mismo (Perry, 2002).

**Determinación experimental de la velocidad de secado.-** Para determinar experimentalmente la velocidad de secado de un material, se procede a colocar una muestra en cada bandeja. Si se trata de material sólido se debe llenar por completo la base de la bandeja, de manera que solo quede expuesta a la corriente de aire de secado la superficie de dicho sólido. La pérdida en peso de humedad durante el secado puede determinarse a diferentes intervalos sin interrumpir la operación, colgando la bandeja de una balanza adaptada a un gabinete o a un ducto a través del cual fluye el aire de secado (Geankoplis, 2003).

Deben observarse ciertas precauciones para que los datos sean de máxima utilidad. La muestra no debe ser muy pequeña, más aún, las siguientes condiciones deben parecerse lo más posible a las condiciones que según se prevé, predominarán en la operación a gran escala:

- La muestra debe soportarse en forma similar sobre un plato o estructura.
- Debe tener la misma relación de superficie que se seca a la que no se seca.
- Debe sujetarse a condiciones similares de transferencia de calor.
- El aire debe tener la misma temperatura, humedad y velocidad.

Si es posible se deben realizar varias pruebas sobre muestras de diferente espesor. También debe obtenerse el peso de la muestra. La exposición de la muestra al aire de temperatura humedad y velocidad constantes constituye el secado en condiciones constantes de secado (Treybal, 1991):

### 1.6.2. Curvas de velocidad de secado para condiciones de secado constante

**Conversión de los datos a curva de velocidad de secado.-** Los datos que se obtienen de un experimento de secado por lotes, generalmente se expresan como peso total  $W_T$  del sólido húmedo (sólido seco mas humedad) a diferentes tiempos de  $t$  horas en el periodo de secado (Geankoplis, 2003).

En los procesos de secado, los datos suelen expresarse como la variación que experimenta el peso del producto que se esta secando con el tiempo. Aunque a veces los datos de secado pueden expresarse en términos de velocidad de secado (Ibarz, 2005).

El contenido en humedad del producto se define como la relación entre la cantidad de agua en el alimento y la cantidad de sólido seco, y se expresan como:

$$X_T = \frac{W_T - S_s}{S_s} \quad ; \quad \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg ss}} \quad (1)$$

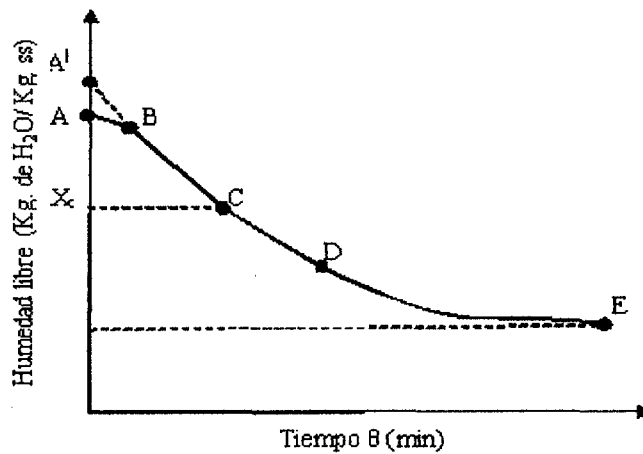
En la que  $W_T$ , es el peso total del material en un tiempo determinado, siendo  $S_s$  el peso de sólido seco y  $X_T$  la humedad expresada como peso de agua/peso de sólido seco.

Después de haber establecido las condiciones de secado constante, se determina el contenido de humedad de equilibrio  $X^*$  en kilogramo de agua de equilibrio / kilogramo de sólido seco. Con lo que se procede a calcular el valor del contenido

de humedad libre  $X$  en kilogramos de agua libre / kilogramos de sólido seco para cada valor de  $X_T$ .

$$X = X_T - X^* \quad (2)$$

En consecuencia una típica curva de secado se obtiene al representar el contenido de humedad libre frente al tiempo de secado (Figura 1).



**Figura 1:** Contenido de humedad libre en función del tiempo de secado.

FUENTE: Treybal, 1991

La velocidad de secado, es proporcional al cambio del contenido de humedad con el tiempo (Ibarz, 2005).

$$N \propto \frac{dX}{d\theta} \quad (3)$$

Al partir de la Figura 1, se puede obtener el valor de  $dX / d\theta$  para cada punto de la curva, mediante el valor que adquiere la tangente a la misma en cada uno de los puntos.

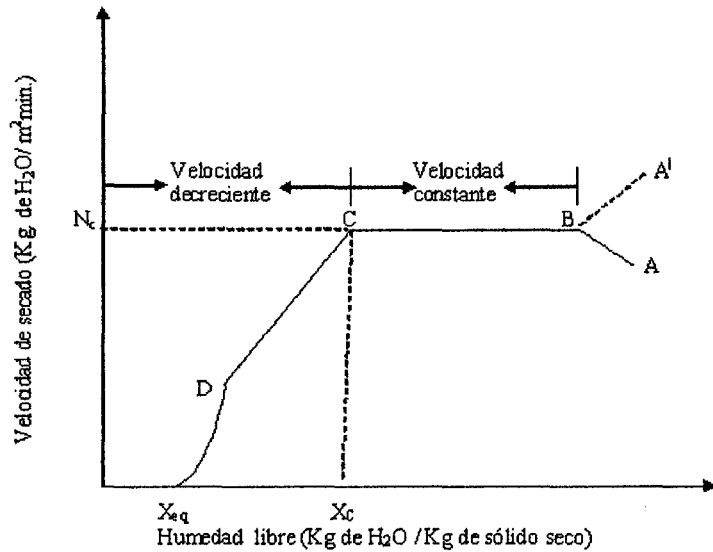


La velocidad de secado, se puede expresar como (Treybal, 1991):

$$N = \frac{-S_s \cdot dX}{A \cdot d\theta} \quad (4)$$

Donde  $S_s$  es el peso de sólido seco (Kg),  $A$  es el área de la superficie que esta secando y  $N$  es la velocidad de secado (Kg. H<sub>2</sub>O / h. m<sup>2</sup>).

**Gráfica de la curva de velocidad de secado.-** En la Figura 2 se muestra la curva de velocidad de secado para condiciones de secado constante. Empezando en el tiempo cero, el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Al principio el sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final, y la velocidad de evaporación va en aumento. Al llegar al punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Por otra parte, si el sólido está bastante caliente al iniciar la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en un punto A'. Este periodo inicial de ajuste en estado no estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto en el análisis de los tiempos de secado.



**Figura 2:** Curva de velocidad de secado

FUENTE: Geankoplis, 2 003

La curva de la Figura 1, es recta entre los puntos **B** y **C**, por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este periodo. Este periodo de velocidad constante de secado corresponde a la línea **BC** en la Figura 2.

En el punto **C** de ambas gráficas, la velocidad de secado comienza a disminuir en el periodo de velocidad decreciente, hasta llegar al punto **D**. En este primer periodo de velocidad decreciente, la velocidad correspondiente a la línea **CD** en la Figura 2 por lo general es lineal.

En el punto **D** la velocidad de secado disminuye con más rapidez aún, hasta que llega al punto **E**, donde el contenido de humedad de equilibrio es  $X^*$ , y  $X = X^* - X^* = 0$ . En el secado de algunos materiales, la región **CD** no existe, o bien, constituye la totalidad del periodo de velocidad decreciente (Geankoplis, 2003).

### 1.6.3. Secado durante el periodo de velocidad decreciente

El punto **C** de la Figura 2 corresponde al *contenido crítico de humedad libre*  $X_c$ . En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir durante el periodo de velocidad decreciente hasta que la superficie queda seca en su totalidad en el punto **D** de la Figura 2. El segundo periodo de velocidad decreciente comienza en el punto **D**, cuando la superficie está seca en su totalidad. El plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie. El calor de evaporación se trasfiere a través del sólido hasta la zona de vaporización. El agua evaporada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire (Geankoplis, 2003).

Cuando el contenido de humedad es superior al contenido crítico, todo el proceso de secado se desarrollará en condiciones de velocidad constante. Por otro lado, si el contenido inicial de humedad es inferior al crítico, todo el proceso de secado se desarrollará en el periodo de velocidad decreciente. Por lo común este periodo se divide en dos zonas: 1) la de secado de superficie no saturada y 2) aquella en que el movimiento interno de la humedad es el que ejerce el control (Perry, 2002).

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

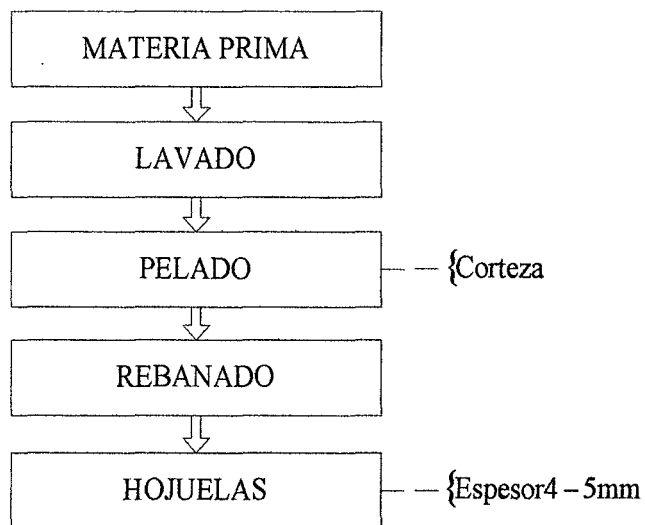
### Material biológico

Plátanos (*Musa acuminata*) variedad inguiri, producidos en la provincia de Rodríguez de Mendoza de la Región Amazonas, que aún no han alcanzado su madurez fisiológica. Siendo el indicador de madurez el color de la cáscara y el índice el color verde.

### Selección y acondicionamiento de la materia prima

Se realizó el lavado y pelado de los plátanos de manera manual puesto que la cáscara es gruesa y su forma permite que se pele sin emplear pelador de fruta.

La obtención de las hojuelas con un espesor promedio de 5 mm se realizó utilizando rebanador de cuchillas regulables (Figura 3).

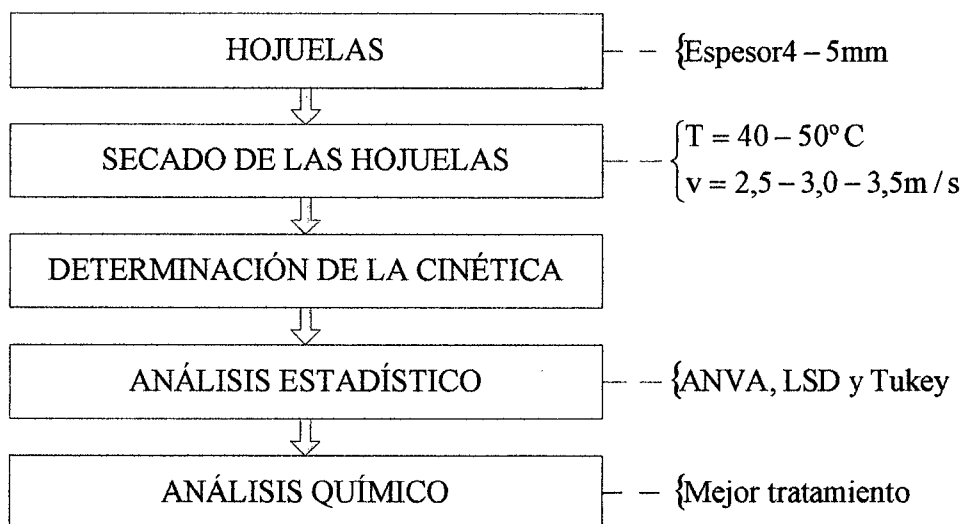


**Figura 3:** Obtención de hojuelas de plátano verde

## Obtención de datos de secado en producto

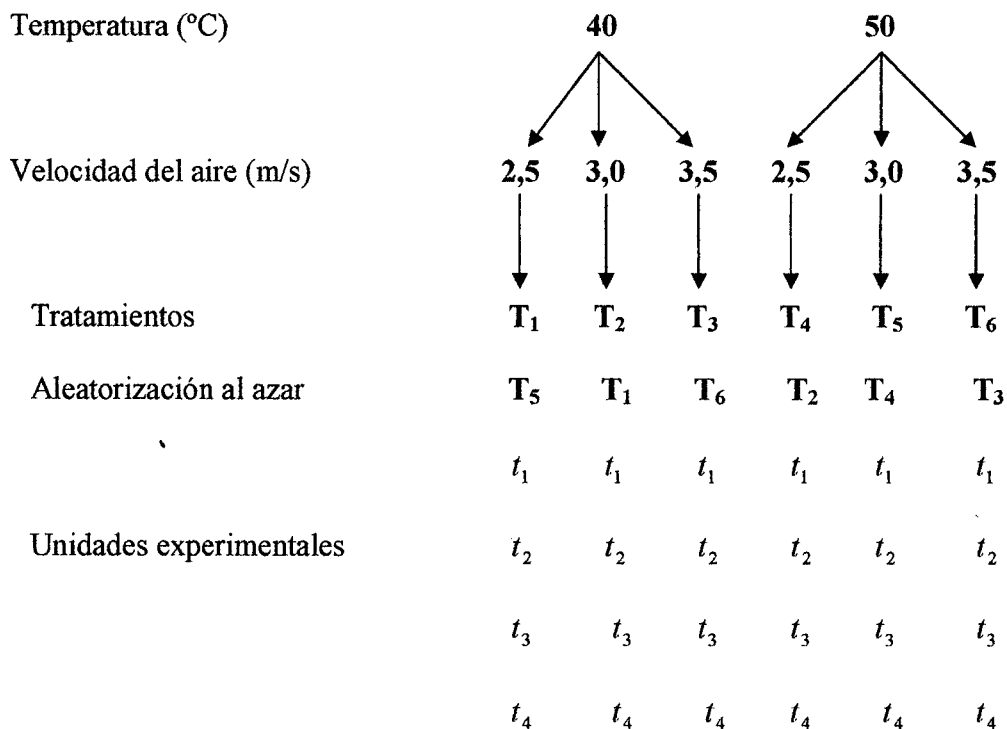
Luego de realizado el precalentamiento del secador de bandejas hasta alcanzar las condiciones deseadas para cada experimento (Temperatura del aire, 40 y 50°C) y asegurando que las bandejas estén instaladas de modo que el caudal de aire sea aproximadamente el mismo durante todo el proceso de secado (Velocidad del aire, 2,5; 3,0 y 3,5m/s), se procedió a distribuir uniformemente las hojuelas de plátano en cada bandeja, para aprovechar eficientemente las temperaturas y velocidades del aire establecidas para cada tratamiento.

Fueron distribuidos homogéneamente 450 g de hojuelas (150 gramos de hojuelas por bandeja), con una humedad inicial promedio de 59,92 % y se procedió al secado, tomando lecturas del peso de las muestras en intervalos de 10 minutos, hasta alcanzar una humedad de 10% (BH) (Figuras del Anexo).



**Figura 4:** Obtención de hojuelas secas y determinación de la cinética de secado.

Los experimentos fueron realizados con un diseño factorial 2A x 3B aleatorizado para las cuatro repeticiones en base al esquema mostrado en la Figura 5.



**Figura 5:** Esquema experimental para la determinación de la cinética de secado a diferentes temperaturas y velocidades de aire.

### Determinación de la cinética

La cinética de secado, por cada combinación de repetición y tratamiento, se determinó mediante el uso de las fórmulas matemáticas descritas en el apartado 1.6.2 del presente informe.

## Análisis estadístico

Se realizaron pruebas estadísticas para verificar una hipótesis con respecto a un parámetro poblacional. En este caso la hipótesis fue demostrar que la temperatura y velocidad del aire de secado de un secador de bandejas, influyen inversamente y sin dependencia entre ellas en la cinética de secado de plátano (*Musa acuminata*) variedad inguiri; utilizando las pruebas de comparación de medias LSD y Tukey; con el fin de evaluar la cinética de secado de las hojuelas de plátano. Todos los cálculos fueron realizados con la ayuda del paquete estadístico Statgraphics Plus 5.1, con un nivel de confianza del 95%.

### Modelo estadístico e hipótesis de interés

El modelo estadístico de efectos para el diseño factorial 2A x 3B está dada por:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad i=1, \dots, p \quad j=1, \dots, q \quad r=1, \dots, b$$

$Y_{ijk}$  = Tiempo de secado en las hojuelas de plátano para la obtención de harina, obtenido con la  $i$ -ésima temperatura del aire,  $j$ -ésima velocidad del aire y la  $k$ -ésima repetición

$\mu$  = Efecto de la media general.

$A_i$  = Efecto de la  $i$ -ésima temperatura del aire.

$B_j$  = Efecto de la  $j$ -ésima velocidad del aire.

$(AB)_{ij}$  = Efecto de la interacción de la  $i$ -ésima temperatura y  $j$ -ésima velocidad del aire,  
 $\varepsilon_{ijk}$  es el efecto del error experimental en la  $i$ -ésima temperatura,  $j$ -ésima velocidad del  
aire y  $k$ -ésima repetición.

$p = 2$ , número de niveles del factor A (temperatura del aire).

$q = 3$ , número de niveles del factor B (velocidad del aire).

$k = 4$ , número de repeticiones los cuales se obtuvieron los tiempos de secado mostrados  
en la Tabla 14 de los Anexos.

Las hipótesis de interés para los dos factores en el modelo anterior son los siguientes:

Para los tratamientos de la temperatura del aire de secado:

$$H_0 : A_1 = A_2 = 0$$

$$H_A : \text{Al menos un } A_i \neq 0$$

Para los tratamientos de la velocidad del aire de secado:

$$H_0 : B_1 = B_2 = B_3 = 0$$

$$H_A : \text{Al menos un } B_j \neq 0$$

Interacción entre los tratamientos temperatura del aire – velocidad del aire de secado:

$$H_0 : (AB)_{ij} = 0 \text{ para toda } i, j$$

$$H_0 : \text{Al menos una } (AB)_{ij} \neq 0$$



El ANVA para los efectos A, B y AB sin desglosar se obtuvieron teniendo en cuenta que el factor A tiene dos niveles y el factor B tiene tres niveles, por lo que las correspondientes sumas de cuadrados tienen 1, 2 y 2 grados de libertad, respectivamente.

### Comparación de medias

El ANVA sólo indica que al menos un par de niveles del factor significativo son diferentes entre sí, pero no dice cuáles son diferentes; en tal sentido es necesario denotar los niveles del factor temperatura (A) como  $A_1$  y  $A_2$ , así como también los tres niveles de la velocidad del aire (B), como  $B_1$ ,  $B_2$  y  $B_3$ .

Entonces las comparaciones del factor temperatura son:

$$H_0 : \mu_{A1} = \mu_{A2}$$

$$H_A : \mu_{A1} \neq \mu_{A2}$$

Mientras que para el factor velocidad del aire de secado tenemos:

$$H_0 : \mu_{B1} = \mu_{B2}$$

$$H_A : \mu_{B1} \neq \mu_{B2}$$

$$H_0 : \mu_{B1} = \mu_{B3}$$

$$H_A : \mu_{B1} \neq \mu_{B3}$$

$$H_0 : \mu_{B2} = \mu_{B3}$$

$$H_A : \mu_{B2} \neq \mu_{B3}$$

### Prueba de diferencia mínima significativa

Prueba estadística :  $LSD_A = t_{\alpha/2, pq(k-1)} \sqrt{\frac{2CME}{qr}}$

Donde  $t_{\alpha/2, ab(r-1\zeta)}$  es el punto porcentual  $100(1 - \alpha/2)$  de la distribución t – Student, los grados de libertad  $pq(k - 1)$  del cuadrado medio del error,  $k$  son el número de repeticiones de nuestro tratamiento.

Regla de decisión : Si  $|T_i - T_j| \leq \text{LSD}$ , entonces ACEPTAR la  $H_0$

Si  $|T_i - T_j| > \text{LSD}$ , entonces RECHAZAR la  $H_0$

### Prueba de Tukey

Prueba estadística :  $T = q_{\alpha, (r, gl.error)} \sqrt{\frac{CME}{pr}}$

Regla de decisión : Si  $|T_i - T_j| \leq \text{ALS}_T$ , entonces ACEPTAR la  $H_0$

Si  $|T_i - T_j| > \text{ALS}_T$ , entonces RECHAZAR la  $H_0$

Donde  $q_{\alpha, (r, gl.error)}$  se obtiene de las tablas del rango estudentizado.

## **Análisis químico del mejor tratamiento**

Al mejor tratamiento (menor tiempo de secado) se realizó los análisis de: humedad, proteína, grasa, teniendo en cuenta las técnicas de análisis mas adecuadas para harina de plátano (AOAC 1984, modificadas por Castro y Castro, 2006) y los análisis de almidón, azúcares reductores teniendo en cuenta las técnicas correspondientes (AOAC, 1984; modificada por el método de Berlín), de acuerdo a la siguiente Tabla:

**Tabla 4:** Características y técnicas para el análisis químico de harina de plátano.

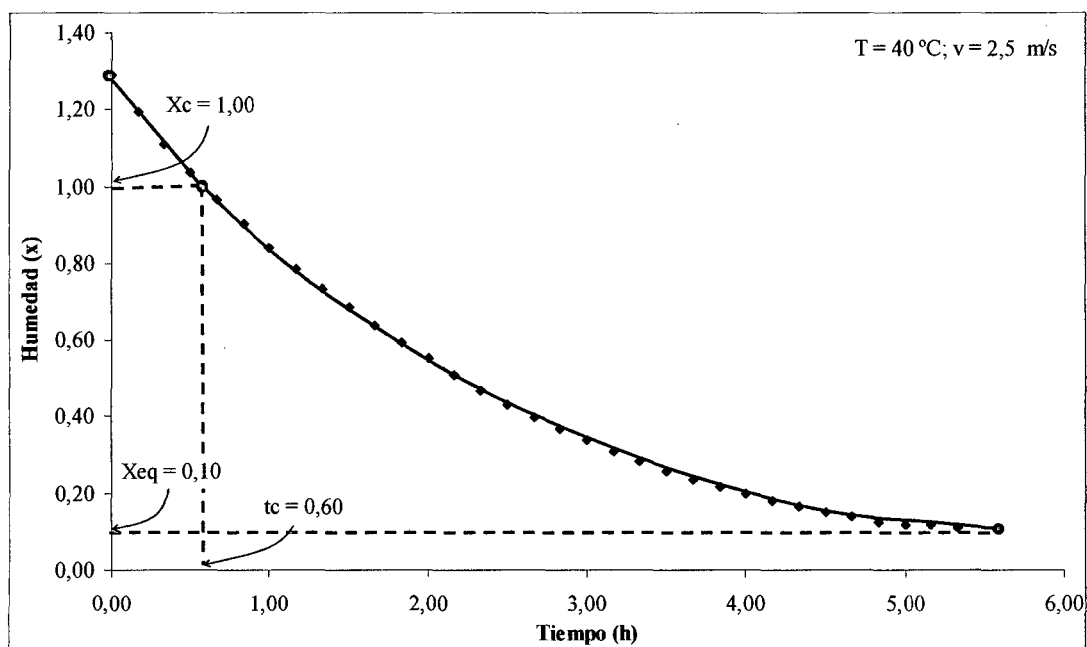
<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>ANALISIS</b>
Humedad	935.29 (AOAC-1 990)*
Proteína	32.1. 22 (AOAC-1 984)*
Grasa	938.06 (AOAC-1 984)*
Almidón	AOAC, Talburt, Smith 1 984
Azúcares reductores	Talburt, Smith 1 984

\* Modificados por Castro y Castro 2006

### III. RESULTADOS

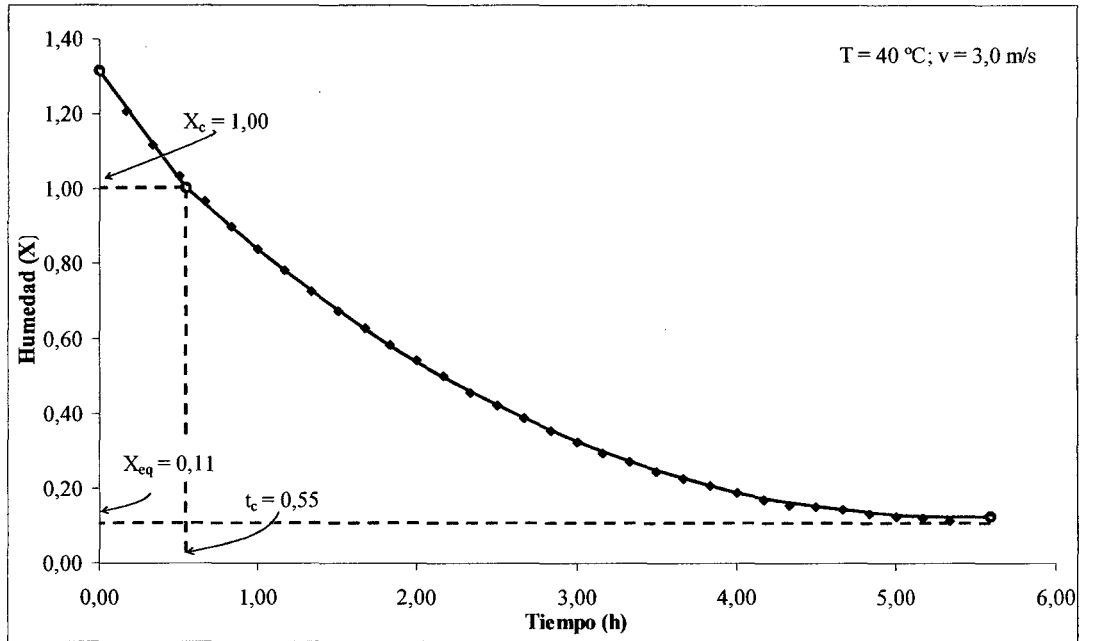
#### Determinación experimental de la cinética de secado

Las curvas de secado de las Figuras 6, 7, 8; 9, 10 y 11 fueron obtenidas tabulando los valores experimentales de humedad libre en función del tiempo durante el proceso de secado a dos niveles de temperatura (40 y 50 °C) y tres niveles de velocidad del aire (2,5, 3,0 y 3,5 m/s), consiguiendo observar la pérdida de humedad contenida en la materia prima conforme se incrementa el tiempo.



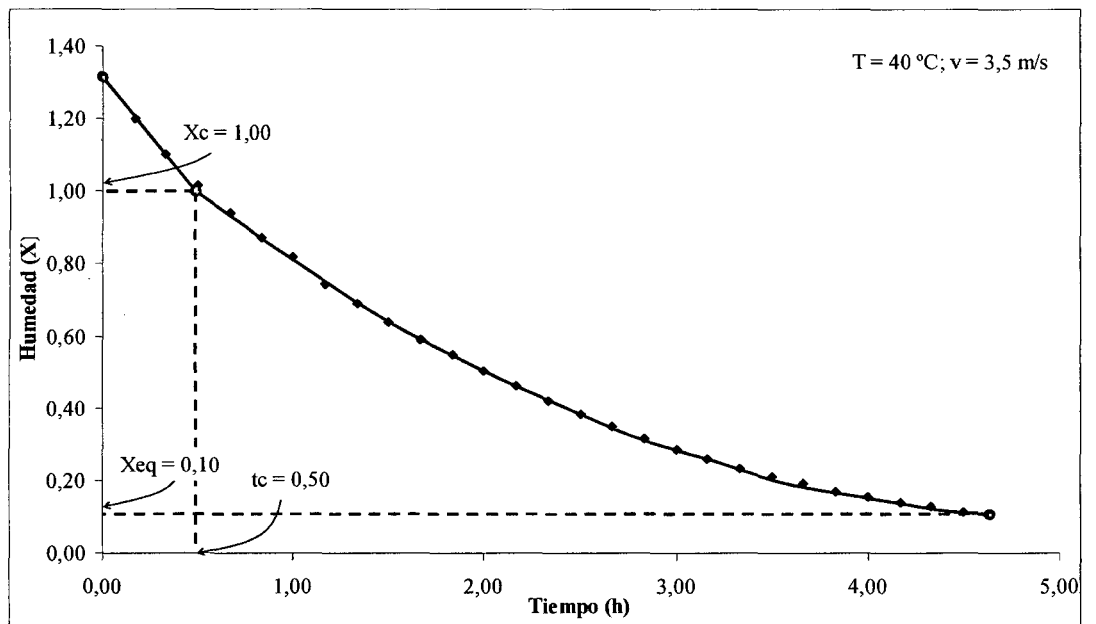
**Figura 6:** Contenido de humedad libre en función del tiempo ( $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 2,5\text{ m/s}$ )

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 7:** Contenido de humedad libre en función del tiempo ( $T = 40^{\circ}\text{C}; v = 3,0\text{ m/s}$ )

**Fuente:** Elaboración propia

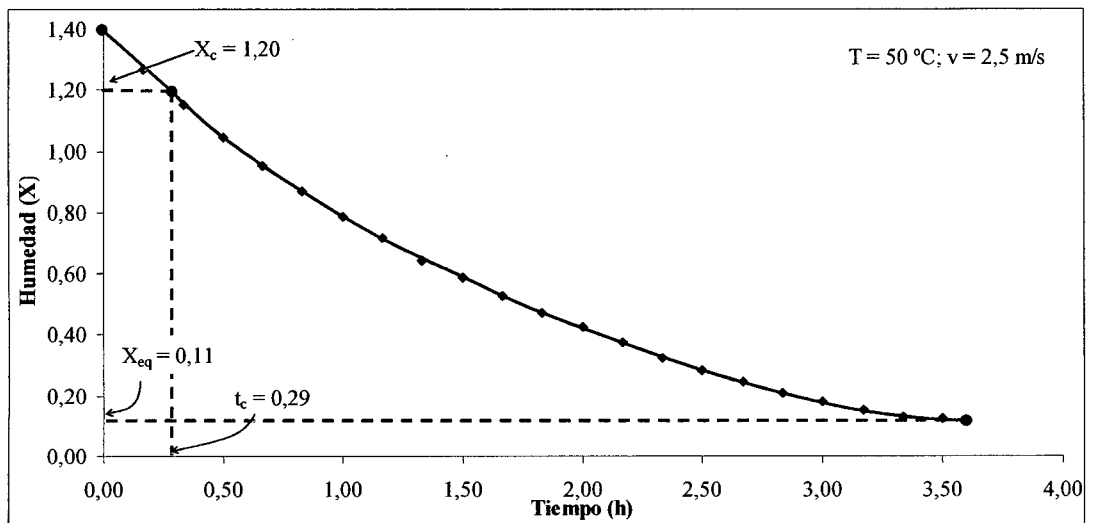


**Figura 8:** Contenido de humedad libre en función del tiempo ( $T = 40^{\circ}\text{C}; v = 3,5\text{ m/s}$ )

**Fuente:** Elaboración propia

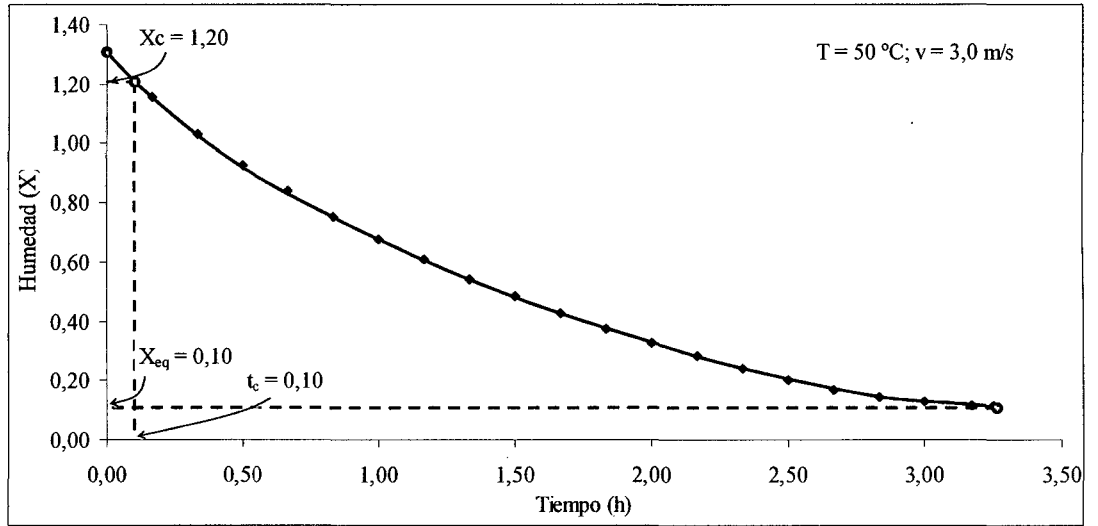
Se observa, en las Figuras 6, 7 y 8, que manteniendo la temperatura constante a 40 °C y variando las velocidades del aire, 2,5; 3,0 y 3,5 m/s, se presentan tiempos críticos de 0,60; 0,55 y 0,50 horas respectivamente. Asimismo, se presentó una humedad crítica promedio de 1,00 Kg H<sub>2</sub>O/Kg ss y humedad de equilibrio promedio de 0,10 Kg H<sub>2</sub>O/Kg ss.

En las Figuras 9, 10 y 11 el proceso conducido a temperatura constante de 50 °C presentó tiempos críticos de 0,29; 0,10 y 0,09 horas a velocidades del aire de 2,5; 3,0 y 3,5 m/s respectivamente, con humedad crítica promedio de 1,20 H<sub>2</sub>O/Kg ss y humedad de equilibrio promedio de 0,10 Kg H<sub>2</sub>O/Kg ss.



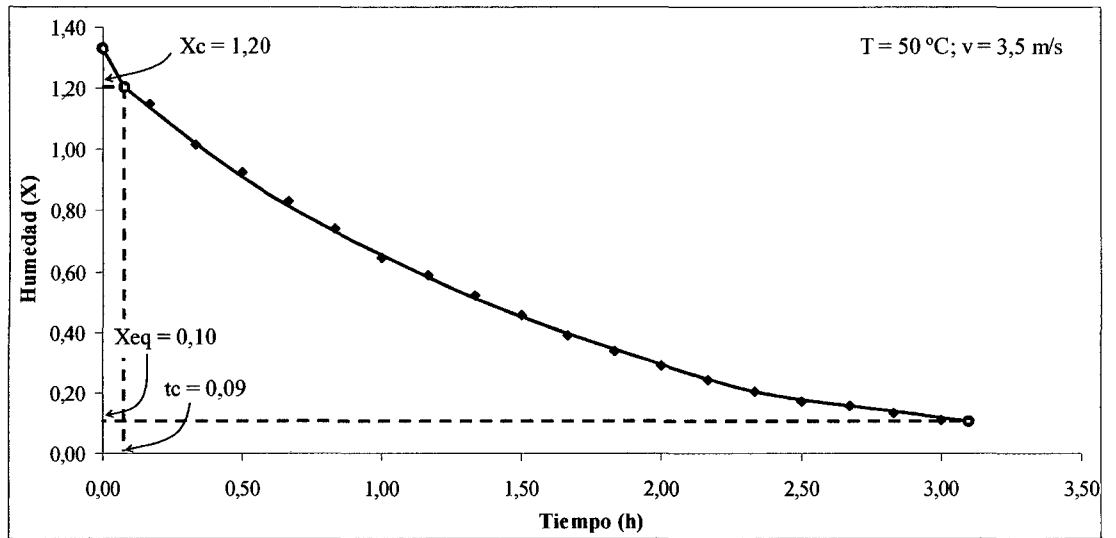
**Figura 9:** Contenido de humedad libre en función del tiempo ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 2,5$  m/s)

Fuente: Elaboración propia



**Figura 10:** Contenido de humedad libre en función del tiempo ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 3,0\text{ m/s}$ )

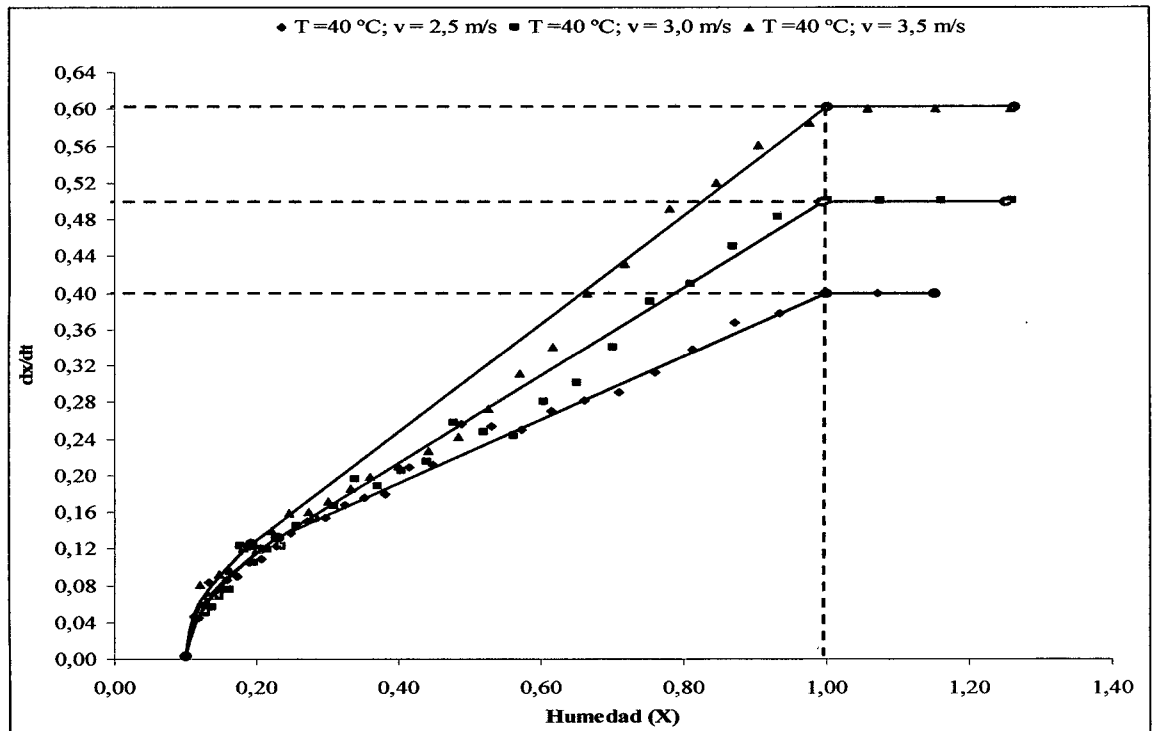
Fuente: Elaboración propia



**Figura 11:** Contenido de humedad libre en función del tiempo ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 3,5\text{ m/s}$ )

Fuente: Elaboración propia

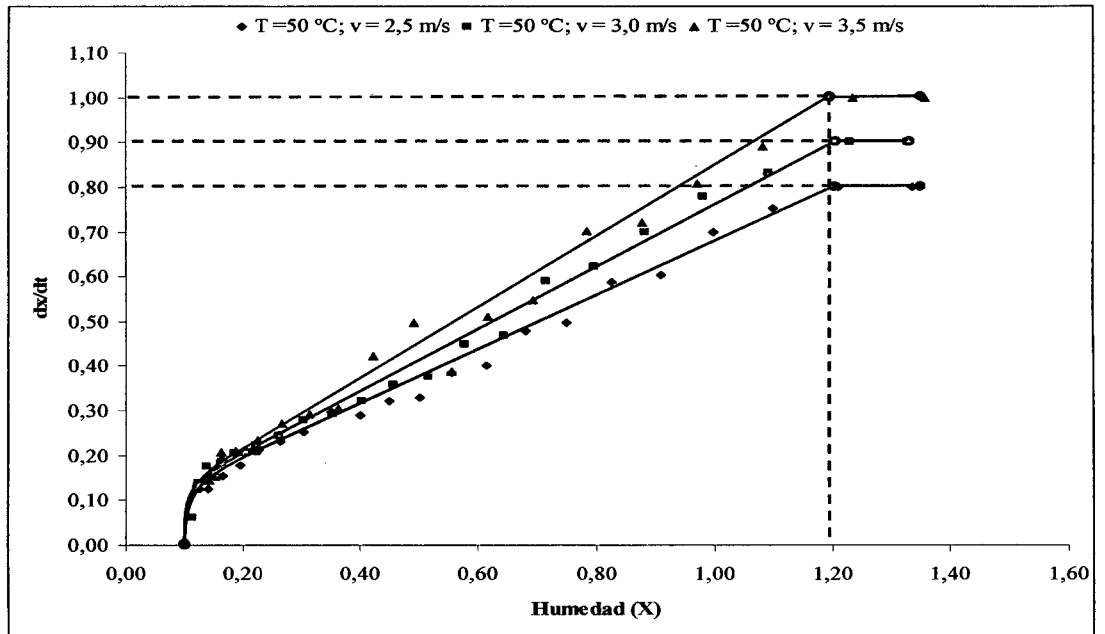
Otra forma de evaluar el efecto de la temperatura y la velocidad del aire de secado para la determinación del tiempo de secado, es mediante el uso de las curvas de velocidad de secado ( $dx/dt$ ) en función del contenido de humedad libre. Dichas curvas se muestran en las Figuras 12 y 13 para las temperaturas y velocidades de aire de secado establecidas en el experimento.



**Figura 12:** Curvas de velocidad de secado ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 2,5, 3,0$  y  $3,5\text{ m/s}$ )

Fuente: Elaboración propia





**Figura 13:** Curva de velocidad de secado ( $T = 50^\circ\text{C}$ ;  $v = 2,5, 3,0$  y  $3,5 \text{ m/s}$ )

Fuente: Elaboración propia

Se observa que al aumentar la velocidad del aire de secado, manteniendo la temperatura constante, se logra un incremento de la velocidad de secado, tal como se muestra en las Figuras 12 y 13, traduciéndose en la reducción del tiempo de secado.

Los valores utilizados para el cálculo de la cinética de secado se encuentran en las Tablas 8, 9, 10, 11, 12 y 13 de los Anexos.

## Análisis ANVA

Para el análisis de varianza se calculó la suma de cuadrados obteniendo los valores totales por nivel de cada factor y en combinación de niveles, utilizando el paquete estadístico Statgraphics Plus 5.1 con el cual se obtuvieron los siguientes resultados.

**Tabla 5:** Análisis de varianza para el modelo estadístico factorial DCA para los tiempos de secado de hojuelas de plátano.

Fuente	GL	Sum Cuad	Cuad Med	F <sub>0</sub>	F <sub>tabular</sub> (5%)	
<b>A : A</b>	1	18,5328	18,5328	141,59	4,41	*
<b>B : B</b>	2	1,1733	0,5867	4,48	3,55	*
<b>A B</b>	2	0,0653	0,0327	0,25	3,55	ns
<b>Error</b>	18	2,3560	0,1309			
<b>TOTAL</b>	<b>23</b>	<b>22,1275</b>				

A : Temperatura del aire de secado.

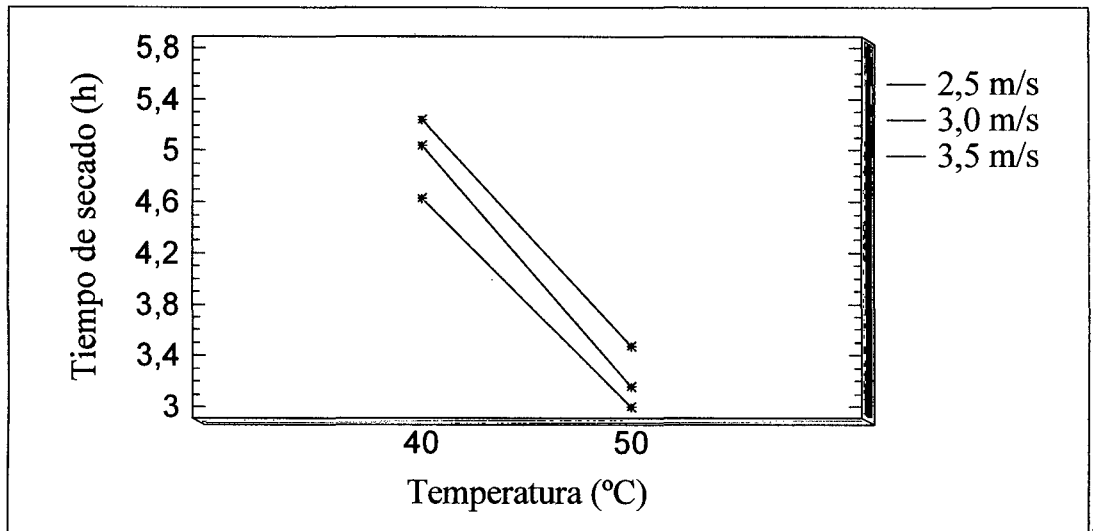
B : Velocidad del aire de secado.

AB : Interacción de los dos factores anteriores.

Fuente: Elaboración propia

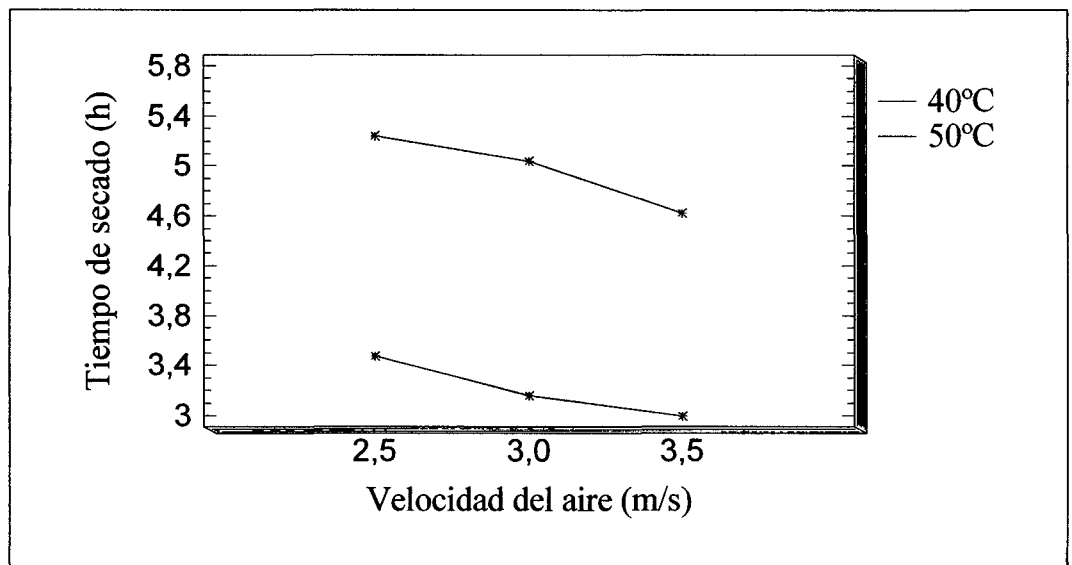
El análisis ANVA, con un nivel de significancia del 95%, reporta para el factor temperatura del aire  $F_c = 141,59$ ; mayor que el valor de la tabla  $F_{0,05,1,18} = 4,41$ , para el factor velocidad del aire  $F_c = 4,48$ ; mayor que el valor de la tabla  $F_{0,95,2,18} = 3,55$  y para la interacción de factores  $F_c = 0,25$ ; menor que el valor de la tabla  $F_{0,95,2,18} = 3,55$ .

Las Figuras correspondientes a las respuestas promedio para cada combinación de los tratamientos, mejoran la interpretación de los resultados del experimento los cuales se muestran a continuación.



**Figura 14:** Tiempo de secado en función de la temperatura.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 15:** Tiempo de secado en función de la velocidad del aire.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 14 muestra que existe relación inversa entre la temperatura y el tiempo de secado. Asimismo, la velocidad del aire de secado también presenta relación inversa con respecto al tiempo de secado. Dichas relaciones son corroboradas en la Figura 15.

### Comparación de medias

Debido a que se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_A$ ) para algún  $i \neq j$ , es necesario investigar cuales tratamientos resultaron diferentes, o cuales tratamientos provocan la diferencia.

**Tabla 6:** Desviación estándar para la prueba de diferencia mínima significativa y Tukey del análisis de efectos principales.

PRUEBA	FACTOR - A	FACTOR - B
LSD	0,3103	0,3800
TUKEY	0,3103	0,4619

Fuente: Elaboración propia

Los tratamientos del factor A muestran diferencia estadística significativa para las dos pruebas de comparación, con un nivel de confianza del 95.0%. Con respecto al factor B tenemos que dos pares de tratamientos presentan diferencias estadísticas no significativas a un nivel de confianza del 95.0%.

#### IV. DISCUSION

Se observa que con temperaturas de 40 y 50 °C y una velocidad del aire de 3,5 m/s se necesita entre 4,83 y 3,00 horas de operación respectivamente, para alcanzar una humedad final de 10 % (BH) en las hojuelas de plátano de 5 mm de espesor y humedad inicial de 59.92 %. Es similar a lo reportado (Carranza, 2002), quien refiere que el tiempo de secado de plátano con un espesor de 3 mm, para disminuir una humedad inicial de 57 % (BH) a una humedad final de 11,46 % con una velocidad de aire promedio de 7,45 m/s y temperatura de 50 °C, se necesita 2,67 de tiempo de secado. El menor tiempo de secado, reportado (Carranza, 2002), es presumiblemente debido al menor espesor del material utilizado y a la vez mayor velocidad del aire de operación.

El tiempo de secado promedio para los tres niveles de velocidad del aire que se necesita para llegar a la humedad final de 10 % es de 1,6 veces menos a 50 °C que a 40 °C. Se puede establecer también que las curvas de secado tienen función lineal y exponencial en el periodo de velocidad constante y decreciente, respectivamente; para los diferentes niveles de temperatura y velocidad del aire. Trabajando con cilantro (De Montellano, 2004) refieren que el tiempo necesario para llegar a la humedad final de 5 %, con respecto de la humedad inicial, a 5 m/s es 2 veces menor a 55 °C que a 45 °C y casi tres veces menor a 55 °C que a 35 °C. Por lo tanto se relaciona lo reportado sobre la reducción del tiempo de secado, en función del cambio de temperatura, con lo obtenido en el presente trabajo. Además, coincide con lo demostrado que las curvas de secado tienen una tendencia lineal y exponencial del contenido de humedad en función del tiempo para las tres distintas temperatura de trabajo.

Las curvas de velocidad de secado de hojuelas de plátano en función de la humedad de secado, se desarrollaron en su gran trayectoria en el periodo de velocidad decreciente. Esto coincide con otro reporte (Ortiz, 2003), donde concluyen que el secado de plátano se desarrolla principalmente en el periodo de velocidad decreciente, como es el caso común de todas las frutas. Sin embargo se afirma que (Sandoval, 2006) si al fruto se le somete a un pre tratamiento se observa la presencia definida de los tres periodos de velocidad de secado.

El efecto de la velocidad del aire es de suma importancia, para la obtención de hojuelas secas, ya que a medida que la velocidad del aire aumenta, el tiempo crítico de secado disminuye para la obtención de hojuelas con un 10 % de humedad en base húmeda. Esto coincide con lo reportado (Sandoval, 2006), que a velocidad de flujo de aire más elevada la rapidez de secado es mayor y que en el periodo de velocidad decreciente la temperatura superficial del fruto es mayor al aplicar una elevada velocidad del aire. Lo contrario sucede para el caso del cilantro (De Montellano, 2004), concluyendo que la temperatura de bulbo seco tiene una fuerte influencia en el tiempo de secado.

La harina de plátano obtenida en esta investigación, a partir de la molienda de las hojuelas de plátano, presenta mayor contenido de proteína 4,81 %, en comparación con lo obtenido por otros investigadores (Guevara, 1980 y Reyes, 1991; citado por Rosales, 1996) que fue de 3,69 y 3,75 % respectivamente. El porcentaje de almidón obtenido fue de tan solo 61,74 % menor a 79 % reportado (Arcila, 2002), esto presumiblemente debido a la composición de la materia prima y en función de la variedad.

Los parámetros cinéticos de la humedad crítica y humedad de equilibrio, permanecen constantes cuando se realiza el secado a temperatura constante, pero a diferentes velocidades del aire de secado.

## V. CONCLUSIONES

1. La cinética de secado de hojuelas de plátano con diferentes niveles de temperatura y velocidad del aire de secado presenta periodo de secado a velocidad constante y velocidad decreciente con humedades críticas promedio a 40 y 50 °C de 1,00 y 1,20 Kg H<sub>2</sub>O/Kg ss respectivamente, para los experimentos realizados en el secador de bandejas del Laboratorio de Ingeniería de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.
2. El tiempo utilizado para disminuir la humedad de las hojuelas hasta un 10 % (BH) a una velocidad de 2,5 m/s y temperaturas de 40 y 50 °C es de 5,49 y 3,80 horas respectivamente; asimismo a una velocidad del aire de 3,0m/s y temperaturas de 40 y 50 °C solamente se necesita de 5,31 y 3,67 horas respectivamente; lo cual significa una disminución promedio en el tiempo de secado de tan solo 3,35 %.
3. Los parámetros de temperatura y velocidad del aire de secado que nos proporciona menor tiempo para el secado de las hojuelas de plátano son de 50 °C y 3,5 m/s respectivamente, tal como se muestra en las Tablas 14 y 17 del Anexo, en donde se aprecia que para disminuir la humedad de las hojuelas de plátano hasta 10 % (BH) se necesita un tiempo promedio de 3,00 horas mucho menor que para los otros tratamientos.
4. En el análisis ANVA, a un nivel de significancia del 95 %, se determinó importancia estadística significativa de cada factor y no existencia de interacción entre factores. La Prueba LSD, a un nivel de confianza del 95 %, reporta que hay diferencia significativa entre los tiempos de secado utilizando los dos niveles de temperatura y existe diferencia



significativa entre niveles 1 (2,5 m/s) y 3 (3,5 m/s) de la velocidad del aire de secado; la prueba de Tukey reportó los mismos resultados.

5. Las mejores condiciones para el secado de la hojuelas de plátano son:

- Temperatura : 50 °C
- Velocidad del aire : 3,5 m/s
- Espesor de las hojuelas de plátano : 5 mm

Dando los siguientes parámetros cinéticos;

- Tiempo crítico de secado : 0,09 horas
- Humedad crítica : 1,20 Kg H<sub>2</sub>O/Kg ss
- Humedad de equilibrio : 0,10 Kg H<sub>2</sub>O/Kg ss

6. Queda demostrado que a temperatura constante e incrementando la velocidad del aire de secado; los parámetros cinéticos  $X_c$  y  $X_{eq}$  permanecen constantes.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Realizar estudios para la optimización del aprovechamiento de la energía utilizando el equipo secador de bandejas, uno de los puntos de partida recomendable sería la utilización del calor perdido en la zona de resistencias.
2. Realizar investigaciones con otro tipo de productos de diferentes contenidos de humedad, componente del cual dependerá las variaciones de velocidad de secado.
3. Diseñar un sistema de recolección de datos digital tanto del peso como de la temperatura de operación del secador del laboratorio de Ingeniería para la obtención de resultados más precisos.
4. Se sugiere la posterior comparación de las curvas de secado modeladas a temperaturas y velocidades cambiantes en hojuelas de plátano con datos experimentales de otros productos alimenticios similares al plátano que puedan sustentar lo acertado de las curvas obtenidas en la presente investigación.
5. Hacer un estudio a nivel industrial y una evaluación económica sobre los costos de producción, teniendo como base este trabajo de investigación.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carranza, J. y Sánchez, M. 2002. “Cinética de secado de *Musa paradisiaca* L. “Plátano” y *Manihot esculenta* Grantz “Yuca””. Revista Amazónica de Investigación. Iquitos: Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias. Volumen 2 N° 1, pp. 15-25.
- Castro, W. y Castro, E. 2006. Manual de prácticas de análisis de productos agroindustriales. Tercera Edición. Chachapoyas – Amazonas, 195 pp.
- Carranza, J y Sánchez, M. 2002. Cinética de secado de *Musa paradisiaca* L. “Plátano” y *Manihot esculenta* Grantz “Yuca”. En Revista Amazónica de Investigación. Iquitos. Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias. Volumen II, N° 1, pp. 15 – 25.
- Centro Peruano de Estudios Sociales (CIPES). 2008. “Evolución de las exportaciones de plátano”. En: <http://www.cepes.org.pe>. (Consulta 20 de Febrero 2008).
- De Montellano, V. 2004. Análisis y simulación de procesos de secado de cilantro, perejil y epazote bajo condiciones de temperaturas cambiantes. Tesis presentada para optar el Grado Académico de Licenciatura En Ingeniería De Alimentos. México: Universidad De Las Américas Puebla. Departamento de Ingeniería Química y Alimentos.
- Eyzaguirre, R. 2006. Métodos estadísticos para la investigación I. Primera Edición. Editorial la Molina. Lima, 145 pp.
- Gaspareto, O. Oliveira, L, Da Silva, P y Magalhaes, M. 2004. “Influencia del tratamiento osmótico en el secado de la banana “Nanica” (*Musa cavendishii*, L.) en Secador de Lecho Fijo”. En Información Tecnológica, Volumen 15, no.6, p.9-16. ISSN 0718-0764.
- Giambastiani, G y Rubiolo, O. 2002. “Efecto del almacenaje y el secado sobre la calidad de los granos”

En:<http://agro.uncor.edu/~ceryol/documentos/postcosecha/calidadalmacenamiento.pdf>

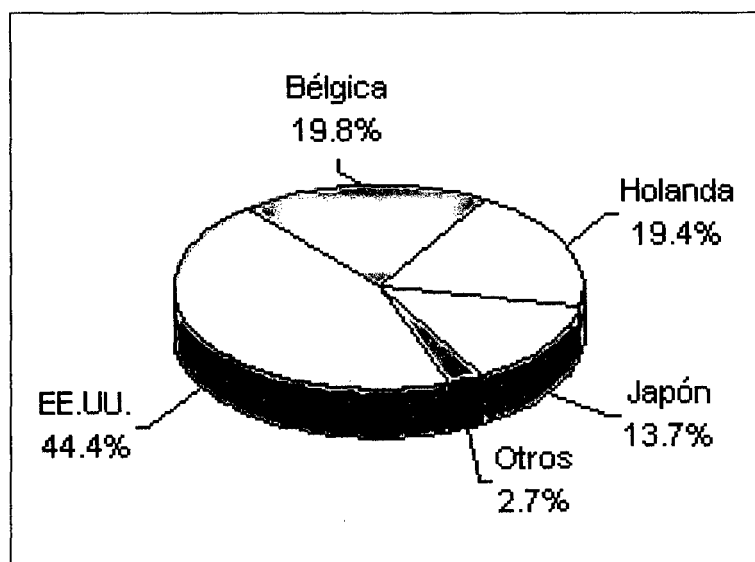
(Consulta 20 de febrero del 2008).

- Gutierrez, H y De La Vara, R. 2004. Análisis y diseño de experimentos. Editorial Mc GRAW HILL. Primera Edición. México, 571 pp.
- Geankoplis, C. 2003. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Editorial C.E.C.S.A. Segunda Edición. México, 1008 pp.
- Ibarz, A. 2005. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Editorial Mundi Prensa. Ultima Edición. México, 985 pp.
- Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA). 2007. “El banano y e plátano bajo un cultivo orgánico” En: <http://www.inia.gob.pe/> (Consulta 11 de noviembre 2007).
- Ministerio de Agricultura (MINAG). 2008. “Estadística agraria 2007, precios, exportación, producción”. En: <http://www.minag.gob.pe/estadistica.shtml>. (Consulta 20 de febrero 2008).
- Montgomery, D. 2002. Diseños y análisis de experimentos. Editorial Iberoamericana. Segunda Edición. México 687 pp.
- Mostacero, J. Mejía, F y Gamarra, O. 2002. Taxonomía de las fanerógamas útiles del Perú. Editorial Normas Legales SAC. Primera Edición. Trujillo – Perú, 960 pp.
- Muños, D y Cabrera, G. 2006. “El secado directo e indirecto de piña” En: <http://www.unicauca.edu.co/biotecnologia/ediciones/vol4/7.pdf>. (Consulta el 20 de febrero del 2008).
- Ocampo, A. 2006. “Modelo cinético del secado de la pulpa de mango”. Revista EIA. Colombia: Escuela de Ingeniería de Antioquia. Colombia. Volumen 5, pp. 119-128.

- Ocón, J. Y Tojo, G. 1980. Problemas de ingeniería química. Editorial Aguilar. Tercera Edición. Madrid. Vol. I y II, 416 pp.
- Ortiz, B. 2003. Secado con bomba de calor para la deshidratación de alimentos. Tesis presentada para optar el Grado Académico de Licenciatura en Ingeniería Química con Área en Ingeniería de Procesos. México: Universidad de las Américas Puebla. Departamento de Ingeniería Química y Alimentos.
- Peralta, V. 2005. “Monografía del plátano”. En: <http://www.sdr.gob.mx/beta1/contenidos/CadenasAgropecuarias/docs/72148.235.138.1326-07-2007MONOGRAFIA%20DE%20PLATANO.pdf> (Consulta 11 de noviembre de 2007).
- Perry, R y Green, D. 2002. Manual del Ingeniero Químico. Tomo IV. Editorial Hispanoamericana. México, 980 pp.
- Rosales, J. y Tang, T. 1996. “Composición química y digestibilidad de insumos alimenticios de la zona de Ucayali”. Folia Amazónica. Iquitos: Instituto de Investigación de la Amazonia Peruana. Volumen 8, N° 2. pp. 13 – 27.
- Sandoval, S. Rodríguez, J. Méndez, L y Sánchez, J. 2006. “Rapidez de secado reducida: una aplicación al secado convectivo de plátano Roátan” Revista Mexicana de Ingeniería Química. México: Universidad Autónoma Metropolitana. Volumen 5, N° 1, pp. 35-38.
- Vásquez, R. et ál. 2005. “Paquete tecnológico para el cultivo del plátano” En: <http://www.campocolima.gob.mx/paginaOEIDRUS/PaquetesTecnologicos/PTPlatano.pdf>. (Consulta 20 de febrero 2008).
- Vega, A. et ál. 2006. “Simulación matemática del proceso de secado de la Gracilaria Chilena (*Gracilaria chilensis*)”. En Revista chilena de ingeniería, vol. XV N° 1, 2007, pp. 55-64.

- Ventura, R. y Zavala, A. 1994. Métodos estadísticos básicos en la investigación. Editorial Agraria. Primera Edición 208 pp.
- Treybal, R. 1991. Operaciones de transferencia de masa. México. p. 858.

## VIII. ANEXOS



**Figura 16:** Exportaciones de plátanos peruanos a diversos países a precio FOB  
2000-2005

Fuente: CEPES

**Tabla 7:** Composición de la harina de plátano obtenida.

CARACTERÍSTICA	PORCENTAJE (%)
Humedad	10,25
Proteína	4,81
Grasa	0,50
Almidón	61,74
Azúcares reductores	66,75

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8:** Valores experimentales del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo en el secado de hojuelas de plátano a temperatura de 40°C y velocidad del aire de 2,5 m/s.

Tiempo (h)	X (Kg H <sub>2</sub> O/Kg ss)	B.H (%)	dx/dt	X Promedio
0,00	1,288	56,26		
0,17	1,193	54,37	0,569	1,240
0,33	1,108	52,54	0,508	1,151
0,50	1,033	50,80	0,449	1,071
0,67	0,966	49,11	0,404	1,000
0,83	0,903	47,43	0,378	0,935
1,00	0,842	45,69	0,368	0,872
1,17	0,785	43,98	0,338	0,814
1,33	0,733	42,30	0,312	0,759
1,50	0,685	40,64	0,290	0,709
1,67	0,638	38,94	0,281	0,662
1,83	0,593	37,22	0,270	0,616
2,00	0,552	35,54	0,249	0,572
2,17	0,509	33,74	0,253	0,530
2,33	0,467	31,81	0,257	0,488
2,50	0,432	30,14	0,211	0,449
2,67	0,397	28,41	0,208	0,414
2,83	0,367	26,85	0,179	0,382
3,00	0,338	25,26	0,175	0,352
3,17	0,310	23,66	0,168	0,324
3,33	0,284	22,13	0,154	0,297
3,50	0,259	20,60	0,149	0,272
3,67	0,237	19,14	0,136	0,248
3,83	0,216	17,77	0,124	0,226
4,00	0,198	16,53	0,108	0,207
4,17	0,181	15,30	0,104	0,189
4,33	0,166	14,22	0,089	0,173
4,50	0,152	13,16	0,085	0,159
4,67	0,139	12,22	0,074	0,145
4,83	0,125	11,14	0,083	0,132
5,00	0,119	10,61	0,055	0,122
5,17	0,116	10,42	0,045	0,118
5,33	0,109	9,80	0,046	0,113
5,58	0,102	9,28	0,033	0,106

Fuente: Elaboración propia



**Tabla 9:** Valores experimentales del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo en el secado de hojuelas de plátano a temperatura de 40°C y velocidad del aire de 3,0 m/s.

Tiempo (h)	X (Kg H <sub>2</sub> O/Kg ss)	B.H (%)	dx/dt	X <sub>Promedio</sub>
0,00	1,316	56,80		
0,17	1,206	54,67	0,656	1,261
0,33	1,117	52,76	0,537	1,162
0,50	1,036	50,88	0,485	1,077
0,67	0,966	49,12	0,422	1,001
0,83	0,900	47,35	0,397	0,933
1,00	0,838	45,57	0,373	0,869
1,17	0,781	43,85	0,337	0,809
1,33	0,728	42,12	0,320	0,755
1,50	0,674	40,25	0,325	0,701
1,67	0,628	38,58	0,273	0,651
1,83	0,582	36,76	0,281	0,605
2,00	0,541	35,09	0,244	0,561
2,17	0,500	33,31	0,247	0,520
2,33	0,457	31,35	0,258	0,478
2,50	0,421	29,62	0,215	0,439
2,67	0,387	27,89	0,205	0,404
2,83	0,356	26,22	0,188	0,371
3,00	0,323	24,40	0,195	0,339
3,17	0,295	22,78	0,167	0,309
3,33	0,270	21,24	0,152	0,283
3,50	0,246	19,71	0,145	0,258
3,67	0,225	18,37	0,122	0,236
3,83	0,206	17,03	0,119	0,215
4,00	0,188	15,81	0,105	0,197
4,17	0,168	14,31	0,123	0,178
4,33	0,155	13,39	0,076	0,161
4,50	0,152	13,22	0,076	0,154
4,67	0,141	12,36	0,067	0,147
4,83	0,132	11,63	0,056	0,136
5,00	0,123	10,98	0,050	0,128
5,17	0,121	10,78	0,050	0,122
5,33	0,113	10,18	0,045	0,117

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 10:** Valores experimentales del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo en el secado de hojuelas de plátano a temperatura de 40°C y velocidad del aire de 3,5 m/s.

Tiempo (h)	X (Kg H <sub>2</sub> O/Kg ss)	B.H (%)	dx/dt	X <sub>Promedio</sub>
0,00	1,314	56,78		
0,17	1,202	54,59	0,670	1,258
0,33	1,104	52,47	0,587	1,153
0,50	1,015	50,36	0,537	1,060
0,67	0,939	48,43	0,453	0,977
0,83	0,872	46,58	0,404	0,906
1,00	0,819	45,01	0,320	0,845
1,17	0,745	42,68	0,445	0,782
1,33	0,693	40,91	0,312	0,719
1,50	0,640	39,01	0,316	0,666
1,67	0,592	37,17	0,289	0,616
1,83	0,548	35,39	0,264	0,570
2,00	0,504	33,51	0,263	0,526
2,17	0,463	31,65	0,245	0,484
2,33	0,420	29,59	0,256	0,442
2,50	0,384	27,72	0,221	0,402
2,67	0,349	25,86	0,208	0,366
2,83	0,316	24,03	0,196	0,333
3,00	0,286	22,23	0,182	0,301
3,17	0,260	20,61	0,158	0,273
3,33	0,233	18,90	0,159	0,246
3,50	0,210	17,35	0,139	0,222
3,67	0,190	15,98	0,119	0,200
3,83	0,170	14,54	0,120	0,180
4,00	0,154	13,35	0,096	0,162
4,17	0,139	12,19	0,092	0,146
4,33	0,127	11,29	0,069	0,133
4,50	0,114	10,22	0,080	0,121
4,67	0,101	9,18	0,060	0,107
4,83	0,095	8,68	0,037	0,098

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 11:** Valores experimentales del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo en el secado de hojuelas de plátano a temperatura de 50°C y velocidad del aire de 2,5 m/s.

Tiempo (h)	X (Kg H <sub>2</sub> O/Kg ss)	B.H (%)	dx/dt	X <sub>Promedio</sub>
0,00	1,404	57,55		
0,17	1,268	55,03	0,815	1,336
0,33	1,152	52,63	0,695	1,210
0,50	1,046	50,20	0,640	1,099
0,67	0,953	47,88	0,553	1,000
0,83	0,867	45,50	0,520	0,910
1,00	0,785	43,05	0,489	0,826
1,17	0,715	40,76	0,422	0,750
1,33	0,644	38,28	0,423	0,680
1,50	0,585	35,99	0,359	0,615
1,67	0,526	33,59	0,351	0,555
1,83	0,473	31,28	0,316	0,500
2,00	0,423	28,90	0,303	0,448
2,17	0,375	26,48	0,289	0,399
2,33	0,325	23,81	0,298	0,350
2,50	0,283	21,39	0,253	0,304
2,67	0,244	19,03	0,232	0,264
2,83	0,209	16,72	0,214	0,226
3,00	0,179	14,69	0,179	0,194
3,17	0,153	12,88	0,153	0,166
3,33	0,129	10,94	0,125	0,141
3,50	0,123	10,27	0,126	0,126

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 12:** Valores experimentales del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo en el secado de hojuelas de plátano a temperatura de 50°C y velocidad del aire de 3,0 m/s.

Tiempo (h)	X (Kg H <sub>2</sub> O/Kg ss)	B.H (%)	dx/dt	X <sub>Promedio</sub>
0,00	1,305	56,61		
0,17	1,154	53,56	0,906	1,229
0,33	1,033	50,79	0,724	1,093
0,50	0,927	48,09	0,636	0,980
0,67	0,838	45,56	0,535	0,882
0,83	0,753	42,91	0,511	0,795
1,00	0,678	40,38	0,446	0,715
1,17	0,608	37,77	0,421	0,643
1,33	0,544	35,19	0,386	0,576
1,50	0,485	32,62	0,353	0,514
1,67	0,429	29,96	0,336	0,457
1,83	0,376	27,26	0,318	0,402
2,00	0,327	24,58	0,293	0,351
2,17	0,281	21,85	0,278	0,304
2,33	0,240	19,30	0,244	0,260
2,50	0,203	16,81	0,222	0,222
2,67	0,169	14,40	0,204	0,186
2,83	0,144	12,54	0,151	0,156
3,00	0,130	11,52	0,175	0,137
3,17	0,116	10,40	0,138	0,123
3,25	0,113	10,13	0,062	0,114

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 13:** Valores experimentales del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo en el secado de hojuelas de plátano a temperatura de 50°C y velocidad del aire de 3,5 m/s.

Tiempo (h)	X (Kg H <sub>2</sub> O/Kg ss)	B.H (%)	dx/dt	X <sub>Promedio</sub>
0,00	1,325	56,35		
0,17	1,148	52,72	1,064	1,236
0,33	1,018	49,70	0,779	1,083
0,50	0,926	47,41	0,549	0,972
0,67	0,829	44,66	0,586	0,878
0,83	0,739	41,84	0,539	0,784
1,00	0,648	38,69	0,547	0,693
1,17	0,587	36,33	0,367	0,617
1,33	0,522	33,68	0,387	0,554
1,50	0,457	30,79	0,387	0,490
1,67	0,387	27,27	0,422	0,422
1,83	0,337	24,58	0,304	0,362
2,00	0,288	21,78	0,291	0,312
2,17	0,243	19,02	0,270	0,265
2,33	0,204	16,48	0,233	0,224
2,50	0,170	14,14	0,211	0,187
2,67	0,155	13,04	0,207	0,162
2,83	0,131	11,24	0,144	0,143
3,00	0,110	9,93	0,139	0,120

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 14:** Tiempos de secado de las hojuelas de plátano por tratamiento.

REPETICIÓN	A1			A2		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3
1	5,58	5,33	4,83	3,33	2,47	2,83
2	5,00	5,50	4,50	3,50	3,17	3,00
3	4,87	4,33	4,67	3,17	3,33	3,17
4	5,50	5,00	4,50	3,88	3,67	3,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 15:** Comparación de los tratamientos del factor A con un nivel de significación de 0,05 por el método LSD.

Comparación	Diferencia	LSD	Hipótesis	Signif $\alpha = 0,05$
$ T_{A1}-T_{A2} $	1,7575	> 0,3103	$\mu_{A1} \neq \mu_{A2}$	*

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 16:** Comparación de los tratamientos del factor B con un nivel de significación de 0,05 por el método LSD.

Comparación	Diferencia	LSD	Hipótesis	Signif $\alpha = 0,05$
$ T_{B1}-T_{B2} $	0,2538	< 0,3800	$\mu_{B1} = \mu_{B2}$	ns
$ T_{B1}-T_{B3} $	0,5413	> 0,3800	$\mu_{B1} \neq \mu_{B3}$	*
$ T_{B2}-T_{B3} $	0,2875	< 0,3800	$\mu_{B2} \neq \mu_{B3}$	ns

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 17:** Cuadro de doble entrada para el método LSD para el factor B.

	<b>T<sub>B1</sub></b> <b>4,3538</b>	<b>T<sub>B2</sub></b> <b>4,1000</b>	<b>T<sub>B3</sub></b> <b>3,8125</b>
<b>T<sub>B1</sub></b>	-----	0,2538	0.5413*
<b>T<sub>B2</sub></b>		-----	0,2875
<b>T<sub>B3</sub></b>			-----

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 18:** Comparación de los tratamientos del factor A con un nivel de significación de 0,05 por el método Tukey.

Comparación	Diferencia	ALS <sub>(T)</sub>	Hipótesis	Signif $\alpha = 0,05$
$ T_{A1}-T_{A2} $	1,7575	> 0,3103	$\mu_{A1} \neq \mu_{A2}$	*

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 19:** Comparación de los tratamientos del factor B con un nivel de significación de 0,05 por el método Tukey.

Comparación	Diferencia	ALS <sub>(T)</sub>	Hipótesis	Signif $\alpha = 0,05$
$ T_{B1}-T_{B2} $	0,2538	< 0,4619	$\mu_{B1} = \mu_{B2}$	ns
$ T_{B1}-T_{B3} $	0,5413	> 0,4619	$\mu_{B1} \neq \mu_{B2}$	*
$ T_{B2}-T_{B3} $	0,2875	< 0,4619	$\mu_{B2} \neq \mu_{B3}$	ns

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 20:** Cuadro de doble entrada para el método Tukey para el factor B.

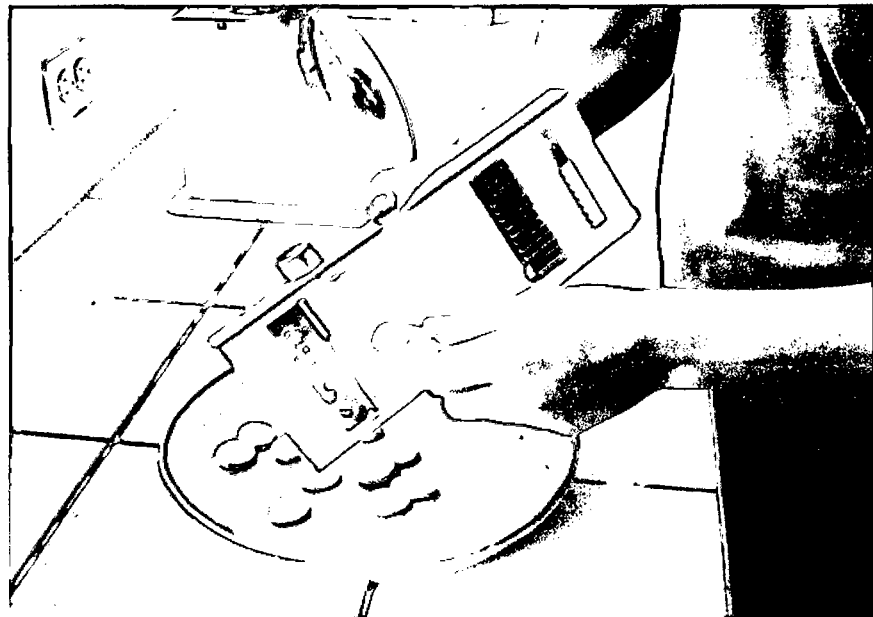
	<b>T<sub>B1</sub></b> <b>4,3538</b>	<b>T<sub>B2</sub></b> <b>4,1000</b>	<b>T<sub>B3</sub></b> <b>3,8125</b>
<b>T<sub>B1</sub></b>	-----	0,2538	0,5413*
<b>T<sub>B2</sub></b>		-----	0,2875
<b>T<sub>B3</sub></b>			-----

Fuente: Elaboración propia



**Figura 17:** Selección y acondicionamiento de la materia prima.

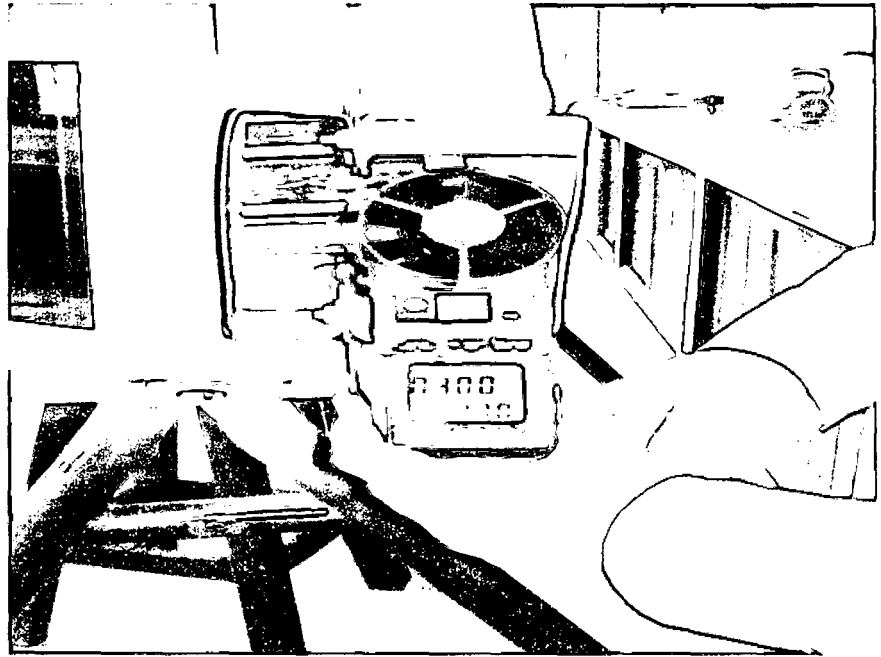
**FUENTE:** Elaboración propia.



**Figura 18:** Preparación de las hojuelas de plátano verde

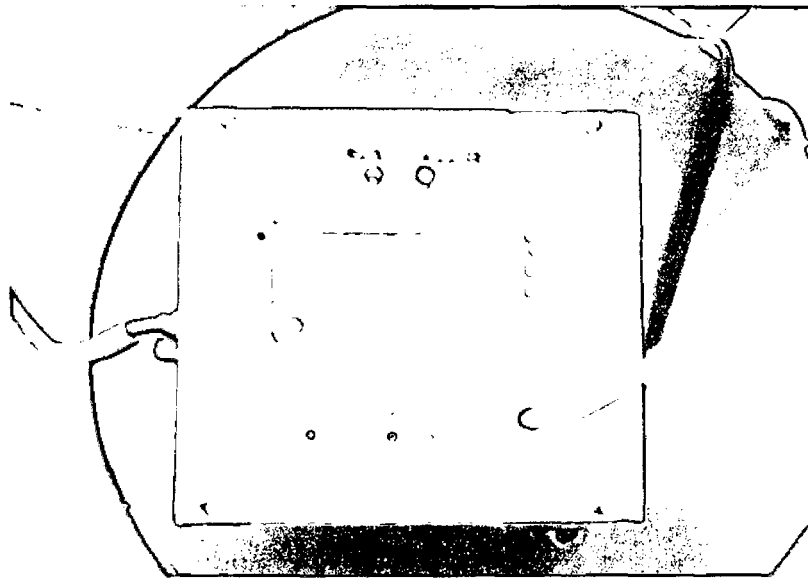
**FUENTE:** Elaboración propia.





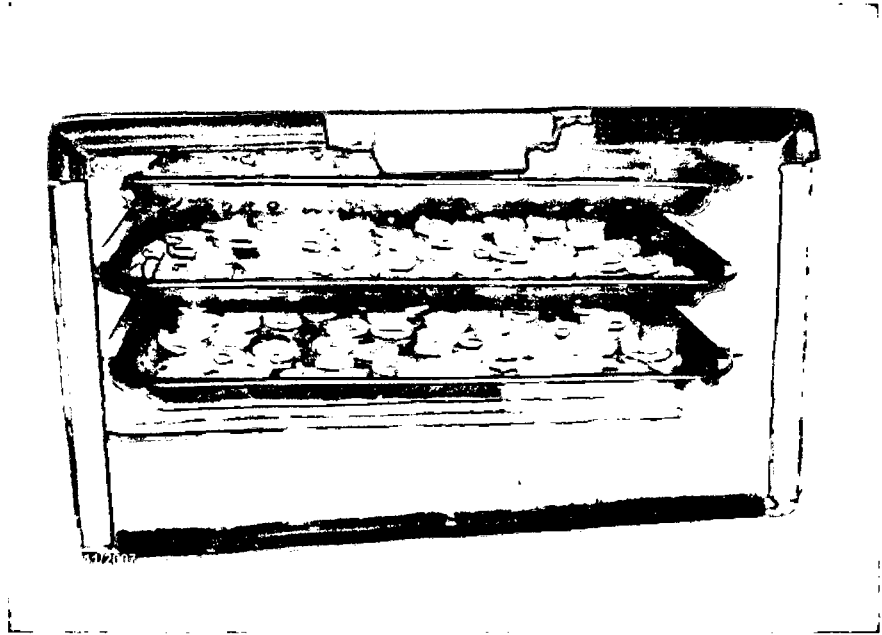
**Figura 19:** Acondicionamiento del equipo a los diferentes niveles de velocidad del  
aire

**FUENTE:** Elaboración propia.



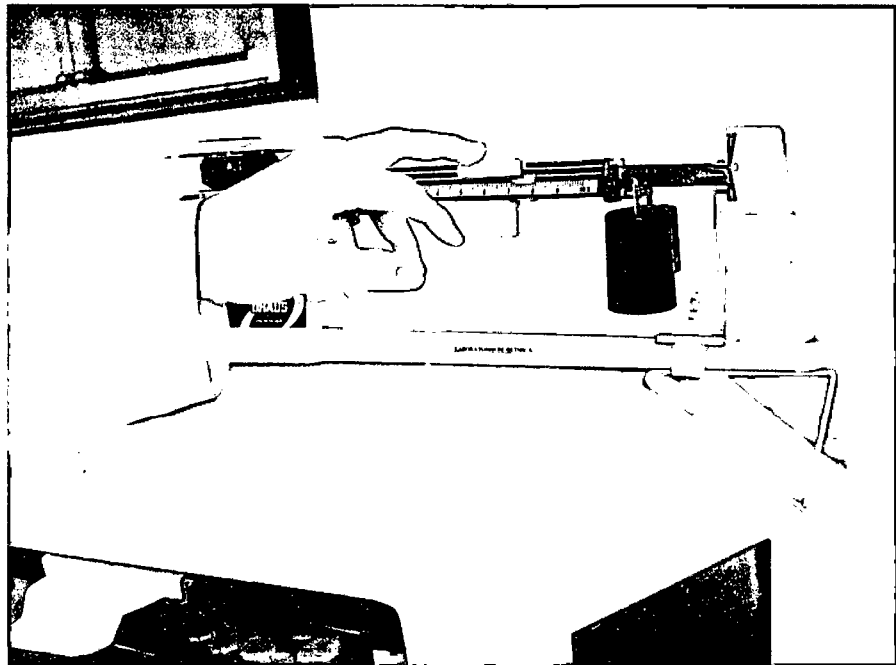
**Figura 20:** Acondicionamiento del equipo a los diferentes niveles de temperatura del aire

**FUENTE:** Elaboración propia.



**Figura 21:** Secado de las hojuelas de plátano en el secador de bandejas

FUENTE: Elaboración propia.



**Figura 22:** Toma de lecturas a diferentes intervalos de tiempos.

FUENTE: Elaboración propia.