

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Estudio comparativo de la incidencia de la Forma geométrica del  
Alimento en la Velocidad de Secado aplicado al Melón  
Cantaloupe”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO DE ALIMENTOS**

Presentada por:

Richard Davi Suárez Quirumbay

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2009

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por darme las fuerzas  
para realizar todos mis actos,  
a mis padres por el sacrificio  
durante mis años de estudio,  
a mis hermanas por su apoyo  
incondicional, a Fabiola  
Cornejo y todos los  
profesores por su  
colaboración y a todos mis  
amigos.

## **DEDICATORIA**

A MIS PADRES:

PIEDAD Y SEGUNDO

A MIS HERMANAS:

SHIRLEY Y KAREN

A MIS FAMILIARES.

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

Ing. Priscila Castillo S.  
COORDINADORA  
INGENIERÍA EN ALIMENTOS  
PRESIDENTE

---

Msc. Fabiola Cornejo Z.  
DIRECTORA DE TESIS

---

Ing. Grace Vásquez V.  
VOCAL

---

Msc. Karin Coello O.  
VOCAL

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

---

RICHARD SUÁREZ QUIRUMBAY

## RESUMEN

Los procesos de secado, se han convertido en uno de los métodos más utilizados y eficaces para la conservación de productos alimenticios, con la finalidad de conservar sus características nutritivas, y disminuir peso, con lo que se consigue ahorros importantes, en el almacenamiento y transporte de los mismos. Se fundamenta en la pérdida de agua libre del alimento, causante de las reacciones de deterioro, para lo cual existen diferentes equipos y metodologías, con el objetivo de reducir el contenido de agua.

Por la importancia de los procesos de secado en la actualidad, y su aplicación industrial para diferentes productos alimenticios, se hace imperante el conocimiento de los parámetros, que determinan la cinética de secado, tales como: humedad relativa del ambiente, características de la materia prima, condiciones de proceso, forma del alimento, etc.

Existen muchas teorías de cinética y velocidad de secado como son: La Teoría de Difusión, Teoría de Capilaridad, Teoría de Evaporación-Condensación, Teoría de Luikov, etc.; los cuáles para su base de estudio y cálculos matemáticos, utilizan parámetros físicos como lo son: el peso, espesor y tamaño de la muestra, pero que en muchos casos omiten la forma, característica importante, que varía en los alimentos por naturaleza o presentación final.

El presente trabajo de investigación, buscó estudiar la incidencia de la forma del alimento en la velocidad de secado, para así poder diseñar los diferentes procesos, de acuerdo a la materia prima a utilizar, basados en teorías existentes.

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un secador de cabina discontinuo, con condiciones de proceso conocidas, cuyo medio desecador fue aire caliente. La materia prima utilizada fue el melón de la variedad Cantaloupe, escogida principalmente por su disponibilidad dentro del mercado. Las muestras utilizadas fueron estructuradas de diferentes formas, pero manteniendo una misma área superficial de contacto con el aire caliente.

Luego de realizados los cálculos matemáticos con los datos experimentales, se procedió al análisis de los mismos, con la finalidad de conocer, como varía la cinética con respecto a la forma del producto, y así establecer diferencias en la velocidad de secado.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	IV
ABREVIATURAS .....	VII
SIMBOLOGÍAS .....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
INTRODUCCIÓN .....	1
 CAPITULO 1	
1. GENERALIDADES	
1.1 Características de la Materia Prima .....	2
1.2 Agua en los Alimentos .....	4
1.2.1. Isotermas de Desorción .....	5
1.2.2. Monocapa de BET .....	8
1.3. Secado .....	11
1.3.1. Fundamentos de Eliminación de Agua .....	13
1.3.2. Secado de Frutas .....	16
1.3.3. Factores que afectan la Velocidad de Secado .....	19
1.3.3.1. Área Superficial .....	20
1.3.3.2 Geometría .....	21



1.3.4. Características del producto seco .....	21
--	----

## CAPITULO 2

### 2. METODOLOGÍA.

2.1. Características de la Materia Prima.....	25
2.1.1. Cálculo de área de exposición .....	26
2.1.1.1. Cubo .....	26
2.1.1.2. Cilindro.....	27
2.1.1.3. Esfera .....	27
2.2. Determinación de Curvas de Secado. ....	28
2.2.1. Curva de Humedad libre vs. Tiempo.....	29
2.2.2. Velocidad de Secado vs. Humedad Libre. ....	31
2.3. Determinación del Coeficiente de Difusión y transferencia de masa.....	32
2.3.1 Coeficiente de transferencia de masa.....	32
2.3.2 Coeficientes de difusión efectiva. ....	33
2.3.2.1 Esfera .....	34
2.3.2.2 Lámina .....	34
2.3.2.3 Cilindro.....	35
2.4. Análisis Físico – Químicos.....	35
2.4.1. Isotermas de Desorción. ....	35
2.4.2. Encogimiento. ....	38

## CAPITULO 3

## 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Isotermas de desorción .....	39
3.2 Monocapa de BET .....	41
3.3 Curva de secado .....	42
3.3.1 Pérdida de Humedad libre vs Tiempo .....	42
3.3.2 Velocidad de Secado vs Humedad Libre .....	43
3.4 Coeficientes de transferencia de masa .....	45
3.5 Coeficientes de Difusividad Efectiva.....	46
3.6 Encogimiento .....	49

## CAPITULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones .....	51
Recomendaciones .....	53

## APÉNDICES

## BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

$a_w$	Actividad de Agua.
Bet	Monocapa de Brunauer-Emmett-Teller
Cp	Calor específico.
Ca	Calcio.
Cal	Calorías.
Ec	Ecuación.
Fe	Hierro.
h	Hora.
Hbs	Humedad en base seca
Hbh	Humedad en base húmeda
K	Potasio.
K	Conductividad Térmica
$K_g$	Coefficiente de transferencia de masa
Kg	Kilogramo.
lb	Libra.
m	Metro
$m^2$	Metro cuadrado
$mm^2$	Milímetro cuadrado
Na	Sodio
P	Fósforo
s	Segundo
s.s	Sólidos secos.
Sh	Número de Sherwood
Sc	Número de Schmidt
r	radio
Re	Número de Reynolds
t	Tiempo
T	Temperatura
V	Velocidad del aire.
Vit	Vitamina

## SIMBOLOGÍA

A	Área
C	Constante de la ecuación de BET.
°C	Grados centígrados.
D	Diámetro o longitud característica
$D_{ef}$	Coeficiente de difusividad efectiva
$D_m$	Difusividad de agua en aire
$D_{wn}$	Difusividad teórica del agua en aire
H <sub>2</sub> O	Agua
L	Lado
Ma	Peso molecular del aire
n	Constante de forma
R	Velocidad de secado.
$X_o$	Humedad inicial
X	Humedad libre.
$X_t$	Humedad total
$X^*$	Humedad de equilibrio.
$X_c$	Humedad crítica.
$X_m$	Fracción másica de agua en la monocapa
$W_i$	Peso inicial.
$W_s$	Peso sólido secos
$W_f$	Peso final
$\partial$	Derivada
$\beta_n$ :	Raíces de primera clase y de orden cero
%	Porcentaje
$\Delta$	Delta
$\rho$	Densidad
$\mu$	Viscosidad
$\pi$	Constante Pi

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1.	Melón Cantaloupe. ....2
Figura 1.2.	Isotermas de adsorción y desorción. ....6
Figura 1.3.	Isotermas de desorción de algunos productos. ....8
Figura 1.4.	Isoterma de sorción de carne cruda a 25°C. ....10
Figura 1.5.	Curva de pérdida de humedad en secado en batch. ....17
Figura 1.6.	Curva de Velocidad de secado. ....18
Figura 2.1.	Área de Exposición en la forma Cúbica. ....26
Figura 2.2.	Área de Exposición en la forma Cilíndrica. ....27
Figura 2.3.	Área de Exposición en la forma Esférica. ....27
Figura 2.4.	Balanza, Termómetro y Termohigrómetro. ....29
Figura 3.1.	Isoterma de desorción de melón fresco a 32° C, presión 1 atm. ....40
Figura 3.2.	Humedad libre vs Tiempo .....42
Figura 3.3.	Velocidad de secado vs Humedad Libre. ....44
Figura 3.4.	Coeficientes de difusividad efectiva. ....47

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición nutricional del melón fresco.....	4
Tabla 2. Áreas de contacto con las diferentes formas.....	28
Tabla 3. Sales y actividades utilizadas en la isoterma.....	36
Tabla 4. Monocapa de BET. ....	42
Tabla 5. Coeficientes de Trasferencia de Masa.....	45
Tabla 6. Coeficientes de Difusividad efectiva. ....	48
Tabla 7. Coeficientes de Transferencia de masa con Difusividades efectivas calculadas.....	48
Tabla 8. Encogimiento de las diferentes formas geométricas después del secado. ....	52

## INTRODUCCIÓN

El secado, es uno de los procesos tradicionales de conservación de alimentos de mayor interés en la actualidad; consiste en la remoción del agua libre, para lo cual se utiliza aire caliente como medio desecador. El secado, implica mecanismos complejos y simultáneos de transferencia de calor, masa y momento, por lo que se hace necesario el diseño de modelos matemáticos válidos para predecir las características del proceso. Muchas veces estos modelos no pueden ser estudiados independientemente sin la parte práctica, ya que a pesar de los estudios y progresos alcanzados, las mayores incertidumbres consisten en la medición o determinación de los parámetros usados en estos modelos, y la variación de los resultados en el producto final, al cambiar alguno de estos.

Las exigencias del mercado y la idea de conservar por mayor lapso de tiempo las frutas, han hecho que los industriales, busquen diferentes presentaciones en: color, tamaño, forma, envase, etc; con la finalidad de abarcar un mayor número de consumidores. Es por esto, que el presente trabajo busca determinar, las consecuencias y diferencias en la velocidad de secado, al variar la forma del alimento; a través de la construcción de las curvas de secado, y determinación de parámetros como: el Coeficiente de Transferencia de Masa, Difusividad Efectiva y Porcentaje de reducción del área de contacto.

# CAPITULO 1

## 1. GENERALIDADES.

### 1.1 Características de la Materia Prima.

El Ecuador por las características de su clima y suelo, tiene el privilegio de contar con diversos productos agrícolas, siendo una de las alternativas más importantes el Melón, el cuál será la materia prima, base de este estudio. Dentro del país, se lo cultiva en algunas provincias tales como: Santa Elena, Los Ríos, El Oro y Manabí.



FIGURA 1.1. MELÓN CANTALOUPE



El melón es considerado dentro del grupo de fruta climatérica; y entre los aspectos botánicos generales se puede mencionar:

Familia: Cucurbitácea

Género: Cucumis

Especie: Cucumis melo

Se trata de una planta herbácea, que se presenta en diversas variedades botánicas, las cuales se diferencian significativamente entre sí en aspectos tales como: sensibilidad al frío, su capacidad de conservación, su actividad metabólica y sobre todo, su apariencia en la forma, tamaño y estructura de la cáscara. En lo relacionado a los suelos, el melón no es muy exigente, por lo que brinda la posibilidad de cultivarlo en una amplia variedad de superficies, permitiendo de esta manera su crecimiento y desarrollo en diversas zonas rurales del país, ayudando a la economía de familias ecuatorianas (7).

El Melón con el que se va a realizar la presente investigación, pertenece al Grupo Reticulatus y a la variedad Cataloupe; del que se puede decir que es de origen americano, tiene forma esférica, y su característica principal, es la presencia de un reticulado grueso en toda la superficie. La pulpa es de color salmón y aromática, factores que aumenta al terminar su etapa de maduración, entre los 60-65 días a partir del inicio del cultivo (7).

TABLA 1.  
COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DEL MELÓN FRESCO

Cal (c/100g)	30
Na (mg.)	12
Ca (mg.)	14
Fe (mg.)	0.4
P (mg.)	16
K (mg.)	250
Vit. A (U.I.)	1000
Vit.B1 (mg.)	0.03
Vit.B2 (mg.)	0.02
Vit.B3 (mg.)	0.02
Vit.C (mg.)	30

### 1.2 Agua en los Alimentos.

Uno de los compuestos más importantes en los alimentos, es la humedad. La humedad, en forma de moléculas de agua, está ligado de varias formas a la fruta, entre las que se puede mencionar: (a) grupos iónicos, tales como carboxylos y ácidos aminos y (b) grupos hidrógenos, tales como hidróxidos y amidas (3).

El agua, es el componente del alimento que mayor interés representa en los tratamientos industriales por ser el responsable de diversas reacciones de deterioro; las cuales reducen la calidad del producto, y disminuyen el tiempo de vida útil. Por tanto, la disminución de contenido de agua en un alimento, reduce la posibilidad de su alteración biológica, lo que aumenta su valor agregado y aumenta su tiempo de vida útil, permitiendo la conservación de sus propiedades nutritivas (Tabla1).

#### **1.2.1 Isotermas de Desorción.**

A temperatura constante y bajo condiciones de equilibrio, existe la relación entre el contenido de humedad y la actividad de agua (o la humedad relativa de equilibrio), de la cual resulta dos curvas de velocidad de sorción.

El estado de equilibrio isoterma, depende del método en que ha sido alcanzado; si es ganancia de agua, se denomina *adsorción*; y al contrario si hay una reducción de esta humedad (pérdida de agua), se denomina *desorción* (6).

El cambio en la velocidad de sorción por parte de la fruta, es representada por medio de un gráfico (curva), donde en el eje de las x se coloca la  $a_w$ , y en y la humedad en base seca.

Para la realización de este, se mantiene la muestra (alimento) en un medio con condiciones controladas, tales como presión y temperaturas constantes. Se asume que la superficie de la fruta no ofrece resistencia a la transferencia de masa, este método está basado en la ecuación de Difusión de Fick's.

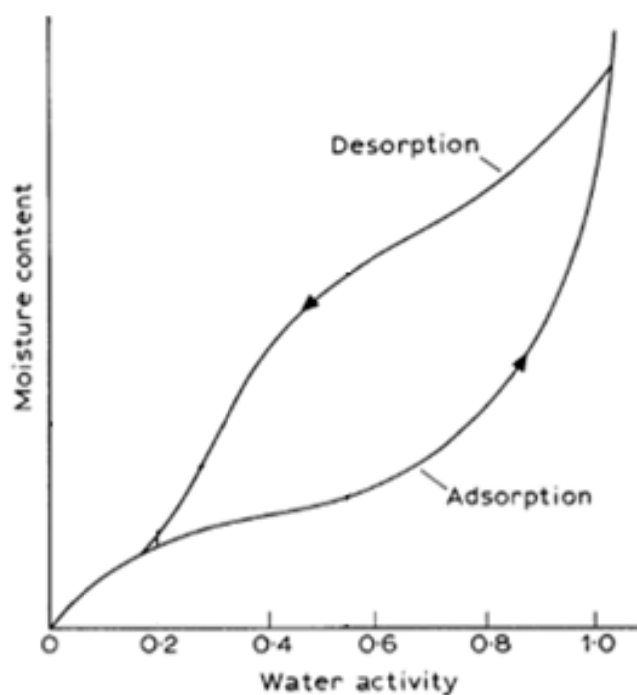


FIGURA 1.2. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN Y DESORCIÓN(2).

A medida que transcurre el secado (desorción), por la disminución de agua del alimento, los solutos pueden sobresaturarse, por lo que las isotermas de desorción alcanzan gran relevancia, dentro de las diferentes variantes de

los procesos en la industria alimenticia. Estas permiten determinar parámetros de proceso, y de utilidad en el diseño de equipos de secado, la selección del material de empaquetamiento, la predicción de la vida útil del producto, y de la evolución en el contenido de humedad durante el almacenamiento.

Una de los parámetros que se puede determinar de las isothermas de desorción, es la humedad de equilibrio, la cual se alcanza después de haber expuesto el sólido el tiempo suficiente dentro del sistema, hasta alcanzar el equilibrio, momento en que el alimento tiene el mismo contenido de humedad que el sistema.

Los valores de contenido de humedad de equilibrio, varían de acuerdo con la muestra húmeda que se seque por desorción, o bien una muestra seca que adsorba humedad por adsorción. En los cálculos de secado, se usa el valor de equilibrio por desorción.

En general, el contenido de humedad, se expresa en base seca como kilogramo de agua por kilogramo de sólido completamente seco ( $\text{KgH}_2\text{O/Kg sólido seco}$ ), o también

Kg H<sub>2</sub>O/100 Kg de sólido seco; en unidades del sistema inglés se expresa como lbH<sub>2</sub>O/100 lb de sólido seco (6).

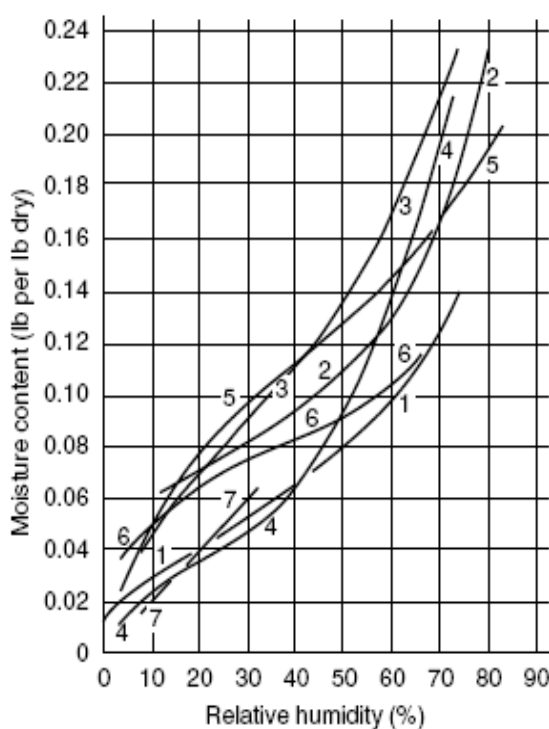


FIGURA 1.3. ISOTERMAS DE DESORCIÓN DE ALGUNOS PRODUCTOS

(1.-huevos sólidos, 2.-carne, 3.-bacalao, 4.-café, 5.-gel de almidón, 6.-patata, 7.-jugo de naranja) (6).

### 1.2.2. Monocapa de BET

La máxima estabilidad del alimento, es proporcionada por la  $a_w$  correspondiente al valor de la monocapa de Brunauer-Emmett-Teller (BET). Por tanto, el valor de la monocapa,

representa el contenido de humedad, en el cual el alimento es más estable.

En una primera aproximación, el volumen requerido por la monocapa de BET, puede ser tomado en el punto donde se observa una inclinación en la trayectoria de la isoterma, pero para una mayor precisión de cálculo, se puede realizar por el método numérico de la ecuación de BET (9).

$$\frac{a_w}{X(1-a_w)} = \frac{1}{X_m} + \frac{C-1}{X_m C} (a_w)$$

(Ec1)

Donde:  $X_m$ : Es la fracción másica de agua en el material, equivalente a una capa unimolecular de agua, cubriendo la superficie de cada partícula.

$C$ : Es una constante a una temperatura determinada, y es relacionada al calor de absorción o desorción de agua en la partícula.  $C$  es dependiente de la temperatura.

$X$ : es el contenido de humedad en Kg H<sub>2</sub>O/Kg s.s. (base seca).

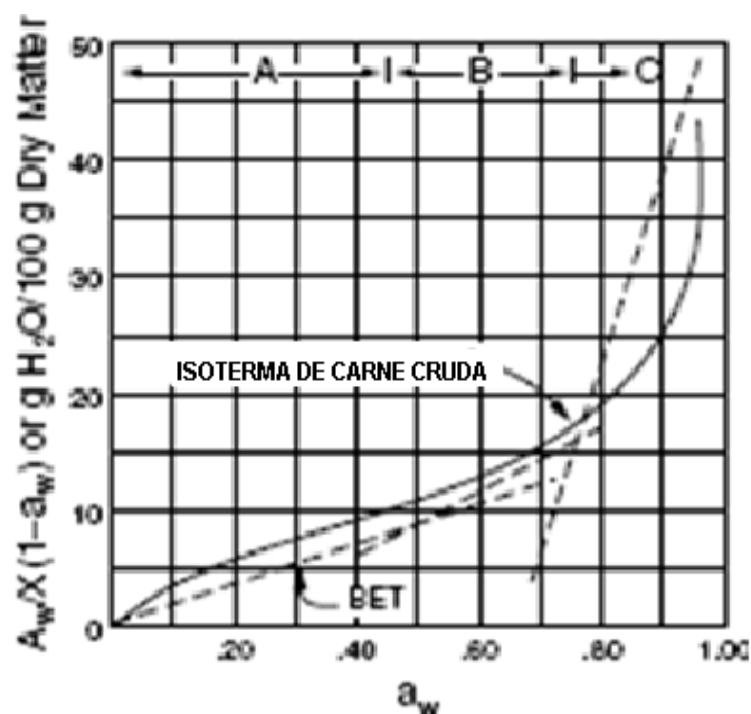


FIGURA 1.4. ISOTERMA DE SORCIÓN DE CARNE CRUDA  
A 25°C (6).

La relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad en la zona A es mejor descrita por la ecuación de BET.

La gráfica de  $a_w/X(1 - a_w)$  vs  $a_w$ , es llamada la gráfica de BET(Figura 1.4.). La gráfica puede ser lineal e inclinada, e interceptada por una línea, que es usada para determinar la constante  $X_m$ , correspondiente al contenido de humedad, en el cual las moléculas de agua, cubren la superficie de las partículas sólidas en la capa monomolecular.



La región de máxima estabilidad de un producto, es usualmente en la zona B, cuando el contenido de humedad en el producto baja a un nivel insuficiente, para cubrir las moléculas sólidas en la capa monomolecular y la velocidad de oxidación de lípidos aumenta.

### 1.3 Secado.

El secado es un procedimiento de conservación, cuyo objetivo es eliminar la totalidad del agua libre de un alimento hasta la monocapa de BET.

Existen diferentes denominaciones de este sistema de conservación: desecación, secado y deshidratación; pueden considerarse sinónimos aunque algunos autores establecen diferencias, únicamente cuantitativas, entre ellos (9):

- 1 *Desecación*: es la eliminación de agua hasta la humedad final, en que el producto esté en equilibrio con el aire de secado. Esta humedad final oscila entre 0.12 y 0.14 Kg de agua por Kg de producto húmedo. El valor de  $a_w$  alcanzado, debe ser lo suficientemente bajo para inhibir el crecimiento microbiano, así como para limitar las reacciones enzimáticas.

- 2 *Secado*: es la eliminación de agua de un alimento, con una humedad final mayor al 2.5% de agua (base seca).
- 3 *Deshidratación*: es cuando se tiene la finalidad de alcanzar una eliminación de agua, no más del 2.5% hasta un nivel próximo al 0% de agua (base seca), sin lograr llegar a este, sino hasta la mocosidad.

La presencia de agua en los alimentos, como ya se ha mencionado anteriormente, contribuye en gran medida a su deterioro, es aquí donde se basan los objetivos principales de los diferentes procesos de secado o de reducción de contenido de agua. Además, existen otras razones importantes para la disminución de agua en un alimento, por ejemplo; disminución de peso de los mismos, con lo cual se consigue ahorros importantes en el almacenamiento y transporte.

Con la eliminación de agua, se presentan dos problemas importantes, los cuales hay que tenerlos muy en cuenta. Como primer punto se puede mencionar, una alteración en la calidad nutricional y organoléptica. Por otra parte, un consumo considerable de energía, factor primordial en el campo industrial, donde uno de los objetivos es el ahorro de esta.

### 1.3.1 Fundamentos de Eliminación de Agua.

El secado es descrito como operaciones simultáneas de transferencia de calor y masa (transporte interno). Estas dos operaciones controlan la velocidad de secado de la mayoría de los alimentos. La difusión de la masa (humedad y soluto) y la conductividad térmica, afectan fuertemente la velocidad de secado, y es aquí donde se denota la importancia de la determinación experimental de estos parámetros para cada alimento. En general, ambos, transferencia de masa y calor, son afectadas fuertemente por la estructura física del alimento (porosidad), en menor grado por la temperatura y el contenido de humedad. En la interfase (superficie), la transferencia de masa y calor son importantes en las primeras etapas de secado, cuando las condiciones de secado (velocidad del aire, temperatura y humedad) tienen efectos decisivos en la velocidad de secado (12).

#### Transferencia de Calor.

El calor necesario para el proceso de secado, puede ser calculado por medio de la Ley de Fourier's. Para materiales homogéneos (4).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left( \frac{k}{\rho C_p} \right) \nabla^2 \quad (\text{Ec } 2)$$

Donde:  $k$ : Es la conductividad térmica ( $\text{kW}/(\text{m } ^\circ\text{K})$ ),  
 $\rho$ : Es la densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  
 $C_p$ : Calor específico del material ( $\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{K})$ ),  
 $T$ : Es la temperatura ( $^\circ\text{K}$ )  
 $t$ : Es el tiempo (s)

Los parámetros  $k/\rho C_p$  constituyen la difusividad térmica. Para materiales heterogéneos, la conductividad térmica efectiva, es usada dentro de la Ley de Fourier's(4).

### **Transferencia de Masa.**

La transferencia de masa dentro del proceso de secado, está basado en la evaporación de agua, ubicada solamente en la superficie. Se usa un coeficiente de transferencia de masa, el cuál es análogo a la convección en la transferencia de calor. El flujo de masa se da por la diferencia de presión de vapor en la superficie del alimento, y la presión de vapor en el aire que rodea la superficie. El agua del interior se difunde hacia la capa superficial y de ahí hacia el aire caliente. Una vez finalizado esto, la difusión es similar a la conducción (4).

La difusión de la humedad en sólidos durante el secado, es un proceso complejo, que puede envolver varios mecanismos,

tales como difusión molecular, flujo capilar, flujo de Knudsen, flujo hidrodinámico o difusión superficial. Si se combina todos estos estudios en uno, la difusión efectiva, puede ser definida desde la segunda Ley de Fick's, como se denota a continuación mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (\text{Ec 3})$$

Donde:  $D_{ef}$ : Difusividad efectiva ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

$X$ : Humedad del alimento ( $\text{Kg H}_2\text{O}/\text{Kg s.s.}$ ).

$t$ : Tiempo (s).

$x$ : Longitud característica (m).

La transferencia de humedad en un medio heterogéneo, puede ser convenientemente analizado usando la Ley de Fick's de materiales homogéneos, en el cual la heterogeneidad de los alimentos es compensado por el uso del Coeficiente de Difusividad efectiva.

La ecuación 3, nos muestra el cambio de distribución la humedad del material, que describe el movimiento de humedad en el alimento a medida que transcurre el proceso de secado.

### **1.3.2 Secado de Frutas.**

El secado de frutas es una actividad agroindustrial con excelentes perspectivas en el futuro. La extracción del agua de estos productos tiene la ventaja de inhibir el crecimiento microbiano; bajando los costos de envasado, almacenamiento y de transporte. El proceso de secado puede llevarse a cabo por diversos sistemas, pero la elección va a depender siempre de la naturaleza del producto, forma, calidad requerida, costo del procesamiento y condiciones de operación. El secado puede reducir parcial o totalmente el volumen de agua libre en el alimento, obteniéndose una mejora en las condiciones microbiológicas, organolépticas y fisicoquímicas. Por tanto, el secado es un proceso que permite un período mayor de almacenamiento y comercialización, ya que posibilita la ausencia de microorganismos, insectos, roedores o cualquier otro elemento de contaminación.

#### **Curvas de Secado.**

Una curva de interés para el diseño de secado de frutas es la que relaciona el tiempo de secado con la pérdida de humedad (Figura 1.5.). En esta curva se puede observar la disminución de la cantidad de agua en la muestra a medida que transcurre el tiempo; la cual puede ser directamente analizada para la

determinación de tiempos de secado de grandes masas, hasta llegar al más bajo nivel de humedad.

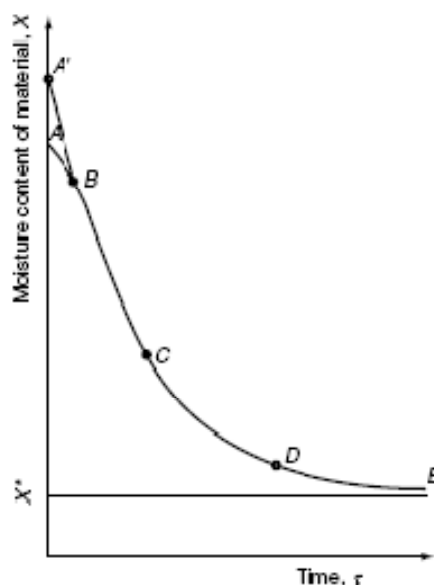


FIGURA 1.5. CURVA DE PÉRDIDA DE HUMEDAD EN SECADO EN BATCH (6).

Si el proceso se lleva a cabo en las mismas condiciones de proceso, para mejores resultados es conveniente comparar en una gráfica donde se coloca la velocidad de secado versus el contenido de humedad libre (Figura1.6.) (6). En la curva se puede definir las diferentes etapas, tales como: A-B, es un período de equilibrio, donde la superficie busca un equilibrio con el aire. Este período es usualmente corto comparado con el tiempo total de secado. B-C es el periodo de velocidad

constante, aquí la superficie del alimento se encuentra saturada con agua; como el agua es evaporada desde la interfase, el agua del interior se mueve hacia la superficie. En la Figura 1.6 se muestra la curva de las diferentes etapas que transcurre durante el secado (6). La velocidad de secado, es limitado por la velocidad de transferencia de calor hacia el alimento desde el aire caliente. La temperatura es usualmente la temperatura de bulbo húmedo. La siguiente etapa correspondiente a C-D, representa el período de velocidad decreciente, este es caracterizado por un ligero incremento de la temperatura del producto, la velocidad de secado es controlada por la difusión de la humedad hacia la superficie.

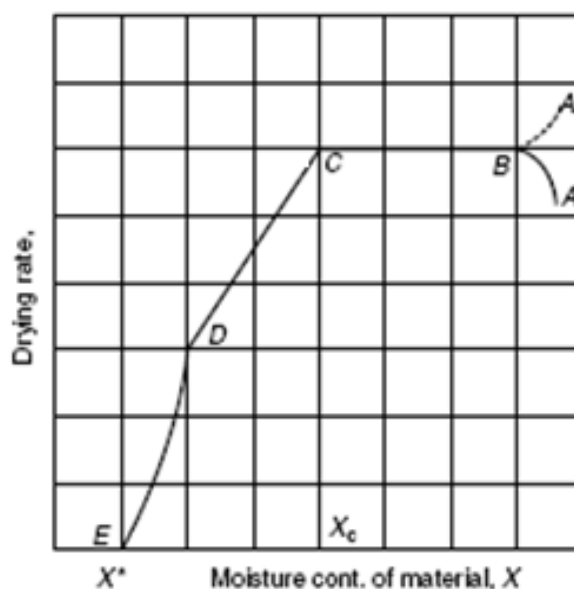


FIGURA 1.6 CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO (6).



Durante el período de velocidad decreciente, el movimiento de humedad es gobernado por factores internos tales como la geometría celular del alimento, tamaño del poro, temperatura de la superficie del alimento, y factores externos tales como la velocidad de aire. La velocidad de secado es reducida comparada con el período de velocidad constante

Algunos autores (10), indican que pueden existir más de un período de velocidad decreciente, dependiendo de los puntos de inflexión de la curva (Figura 1.6). En esta curva, el segundo período de velocidad decreciente comienza en el punto D, donde humedad relativa de equilibrio comienza a bajar por debajo del 100%. La deshidratación, es a través de la parte de la isoterma donde el material es llevado a cabo por la multimolecular desorción y condensación capilar. El calor por parte del agua, en esta etapa es mayor comparado con el calor de vaporización del agua pura.

### **1.3.3 Factores que afectan la Velocidad de Secado.**

Son varios los factores que afectan la velocidad de secado, estos pueden variar ligeramente dependiendo del tipo y sistema de secado a utilizar. Sin embargo, en general, los siguientes factores tienen gran relevancia: (6).

1. Naturaleza del material: composición física y química, contenido de humedad, etc.
2. Tamaño, forma y arreglo de las muestras a ser secadas.
3. Temperatura de bulbo húmedo, o humedad relativa o presión parcial de vapor de agua en el aire (todas están relacionadas e indican la cantidad de humedad en el aire).
4. Temperatura del aire; y
5. Velocidad del aire.

#### **1.3.3.1 Área Superficial.**

El área superficial está relacionada al tamaño, pero también depende de la forma. El área superficial es complicado medir en formas irregulares y estas son calculadas por medio de métodos indirectos y computarizados asumiendo un área específica. Es sencillo el cálculo cuando se trata de formas cerradas y geometrías comunes. Para alimentos, la porosidad está fuertemente ligado al área superficial. El área superficial es un parámetro importante en procesos que implican transferencia de calor y masa, ya que cuando existe una mayor área de contacto entre el medio desecador y la fruta, el proceso se desarrollará con mayor eficiencia debido a la mayor transferencia

de masa y calor. Es decir que el área superficial juega un papel importante en la pérdida de humedad.

### 1.3.3.2 Geometría.

La variación de forma geométrica de un alimento afecta la transferencia de masa y calor. La difusión de humedad de sólido se puede cuantificar por medio de la segunda ley de Fick's.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^n D_{ef}(t_m, X) \frac{\partial X}{\partial r} \right] \quad (\text{Ec } 4)$$

Donde:  $n$ : Es Constante de acuerdo a forma;  $n=0$  para formas planas, 1 para cilindros, 2 esferas.

$r$ : Es la distancia radial, medida desde centro del sólido.

Estos parámetros alcanzan su valor máximo de  $r$ , es decir que para una forma plana  $2r$  de espesor si se seca de ambos lados.

### 1.3.4 Características del producto seco.

El tejido celular presenta una turgencia típica. Las paredes celulares están bajo tensión y el contenido celular bajo la

compresión. La pared celular posee una resistencia y elasticidad, que la hace capaz de admitir determinados esfuerzos y volver después a su estado original. Pero superado este límite, la modificación de la estructura se hace irreversible. Al cesar la fuerza causante de la deformación, la célula no regresa a su estado original libre de tensiones. Este tipo de deformación plástica se produce, en mayor o menor medida, cuando se secan tejidos vegetales o animales, con excepción en el secado por liofilización, en las dimensiones originales de los tejidos congelados rápidamente se conservan inalteradas después del secado.

En piezas vegetales se puede apreciar de mejor manera este efecto, ya que el contenido celular está sometido a una corriente de aire caliente, el primer efecto es la evaporación de agua desde la superficie húmeda. La concentración de solutos en la superficie aumenta, el agua de las soluciones diluidas de las capas más profundas se mueve hacia la superficie, a través de las paredes celulares como consecuencia del gradiente de concentraciones. Esta pérdida de fluido celular provoca una contracción del volumen de las células del producto seco, cuyo proceso se puede dividir por etapas, explicadas con detalle a continuación: La primera etapa en la

contracción de los tejidos es la depresión de la capa superficial de células, produciendo un encogimiento hasta un núcleo húmedo e incomprensible. A medida que prosigue el secado, las células de las capas superficiales se aplastan cada vez más (8).

Continuando con el secado, el encogimiento o contracción empieza a manifestarse en toda la pieza, la superficie se habrá secado y endurecido, mientras que el centro permanece húmedo y plástico (8). Las últimas fases de la contracción tiene lugar en el centro principalmente y la pieza adopta formas como la indicada en la figura 1.7, aunque lo normal es que presente forma distorsionada irregularmente (8).

Cuando se seca una muestra de tejido vegetal como las frutas, el agua evaporada en la superficie se sustituye de forma constante por el agua del interior. Si el movimiento del agua tiene lugar en forma líquida, las sustancias disueltas, no volátiles, tienden a acompañar al agua en su marcha a la superficie (8).

Por otra parte existe una expulsión del jugo celular y el movimiento también hacia la superficie.

Si el cuerpo es blando puede contraerse rápidamente bajo las fuerzas externas.

También, se puede mencionar que existe una pérdida irreversible del Flavor característico del alimento. Sin embargo, si se forma una capa delgada de producto seco en la superficie durante los primeros momentos del secado, los componentes volátiles responsables del aroma y flavor quedan retenidos porque la capa del alimento actúa como una película semipermeable que deje atravesar el vapor de agua (6).

# **CAPÍTULO 2**

## **2. METODOLOGÍA.**

### **2.1 Características de la Materia Prima.**

En el presente trabajo se utilizó como materia prima el Melón de la variedad Cantaloupe, cuya principal característica es el reticulado que presenta en la superficie. Esta variedad fue escogida por ser uno de los frutos más abundantes y tradicionales del Ecuador, especialmente el originario de la zona norte de la Península de Santa Elena.

Entre los aspectos fisiológicos tomados en cuenta en la elección del fruto, se puede mencionar, el grado de madurez y la cantidad de azúcar. En lo que respecta al grado de madurez, se consideraron aspectos sensoriales tales como color, olor, textura y sabor. Se consideró un buen grado de madurez a un color intermedio entre verde y amarillo, un olor característico a fruta fresca, una textura firme en la superficie y pulpa y el sabor natural de esta variedad.

La determinación de sólidos solubles se la realizó por el método refractométrico, obteniéndose  $4.5 \pm 2^\circ$  Brix, para una fruta de grado de madurez óptimo.

### 2.1.1 Cálculos de Áreas de Exposición.

Para determinar únicamente el área de contacto del alimento con el aire caliente, se utilizó las ecuaciones matemáticas aplicadas a superficies de sólidos, considerando la parte que no se encuentra expuesta con el aire. En esta investigación se estudiaron tres formas:

#### 2.1.1.1 Cubo.

En esta forma sólo se tuvo contacto en cinco de las seis caras del cubo.

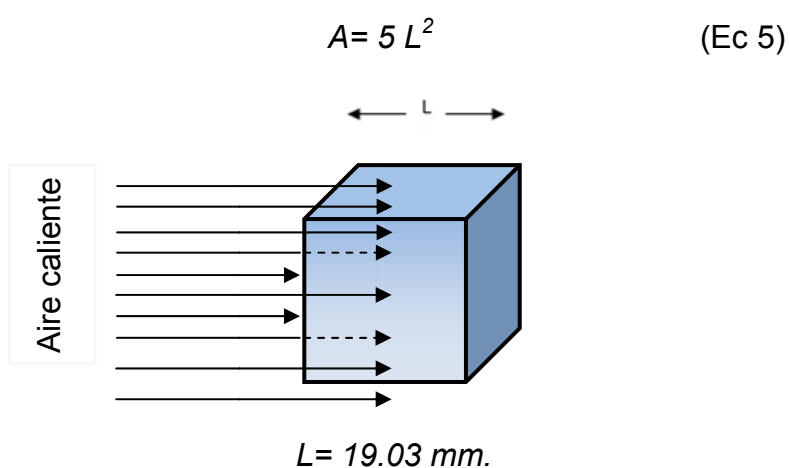


FIGURA 2.1 ÁREA DE EXPOSICIÓN EN LA FORMA CÚBICA.



### 2.1.1.2 Cilindro.

La única área fuera del alcance del aire caliente fue una de las bases circulares.

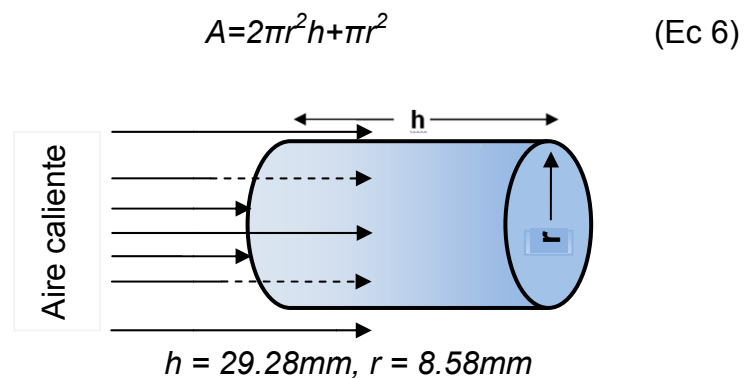


FIGURA 2.2 ÁREA DE EXPOSICIÓN EN LA FORMA CILÍNDRICA.

### 2.1.1.3 Esfera.

El aire en contacto con la esfera, sólo alcanza la mitad del área superficial de la misma.

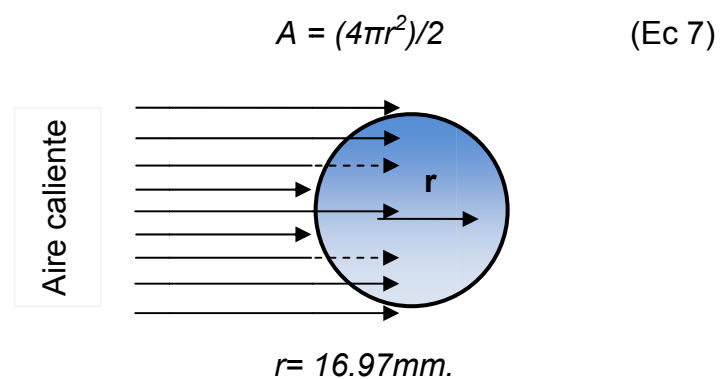


FIGURA 2.3 ÁREA DE EXPOSICIÓN EN LA FORMA ESFÉRICA

Una de las características que se mantuvo constante fue el área de contacto con el aire caliente, la cual fue la misma para todas las formas (Tabla 2).

TABLA 2.

ÁREA DE CONTACTO DE LAS DIFERENTES FORMAS.

CUBO	CILINDRO	ESFERA
1810 mm <sup>2</sup>	1810 mm <sup>2</sup>	1810 mm <sup>2</sup>

## 2.2. Determinación de Curvas de Secado.

La determinación de estas curvas permite representar gráficamente la variación de diversos parámetros a medida que transcurre el proceso de secado. Las curvas de mayor interés en la descripción de la cinética de secado son: la humedad libre vs tiempo, y velocidad de secado vs humedad libre. Para la obtención de los diferentes datos se colocaron las muestras en un secador de cabina con condiciones de proceso conocidas (Apéndice B), con flujo de aire caliente de 4.19 m/s, a una temperatura de 55 °C. El monitoreo de pérdida de peso se realizó cada 10 minutos hasta llegar a un peso constante (Apéndice C).

Los parámetros de humedad relativa, temperatura ambiente, temperatura de salida del aire caliente fueron registrados mediante

un Termohigrómetro digital marca Extech, mientras que la temperatura de operación del secador se lo realizó con un termómetro de mercurio convencional; y los pesos con una balanza de precisión (Figura 2.4).

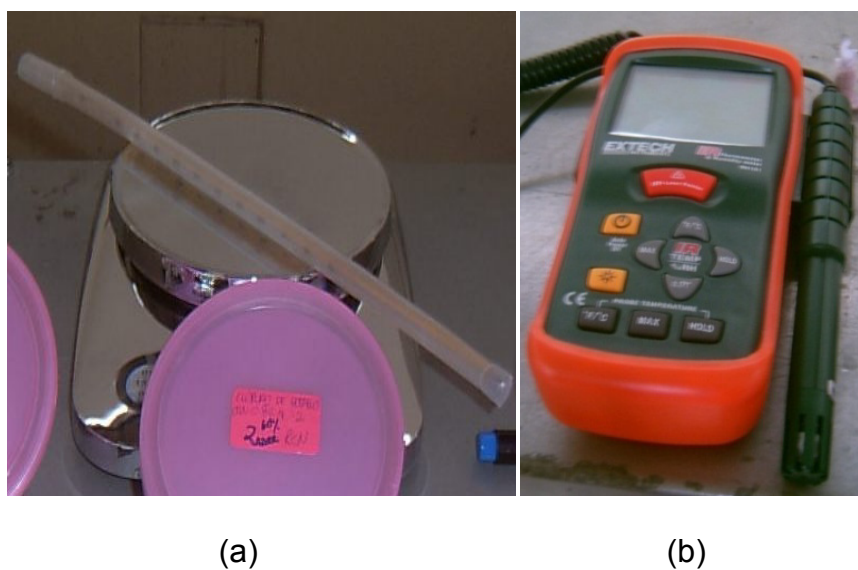


FIGURA 2.4. (a)BALANZA Y TERMÓMETRO; (b)TERMOHIGRÓMETRO.

### 2.2.1. Curva Humedad libre vs. Tiempo.

Para la representación de esta curva fue necesario determinar dos variables de proceso como fueron:

1. Humedad Libre en  $\text{KgH}_2\text{O} / \text{Kg s.s.}$
2. Tiempo de secado.

La humedad libre se la obtuvo mediante la siguiente fórmula matemática (13).

$$X = X_t \times X^* \quad (\text{Ec } 8)$$

Donde:  $X$ : Humedad libre (KgH<sub>2</sub>O/Kg s.s.).  
 $X_t$ : Humedad en Base Seca (KgH<sub>2</sub>O/Kg s.s.).  
 $X^*$ : Humedad en equilibrio (KgH<sub>2</sub>O/Kg s.s.).

La Humedad en Base Seca se define con la relación entre la cantidad de agua del alimento y la cantidad de sólidos secos, y se calculó mediante la siguiente ecuación (13):

$$X_t = \frac{W_i - W_s}{W_s} \quad (\text{Ec } 9)$$

En la que:  $X_t$ : Humedad en Base Seca (KgH<sub>2</sub>O/Kg s.s.).  
 $W_i$ : Peso Inicial de la Muestra (Kg.).  
 $W_s$ : Peso de sólidos secos (Kg.).

El peso de sólidos secos está dado por el porcentaje inicial de sólidos en la muestra, se los determinó mediante la siguiente ecuación (13):

$$W_s = W_i \times \%Brix_i \quad (\text{Ec } 10)$$

Donde:  $Brix_i$ : Grados Brix Inicial (%)  
 $W_i$ : Peso Inicial de la Muestra (Kg).

La humedad de equilibrio se la determinó mediante la isoterma de desorción del melón, ubicando en el eje de la “x” la humedad relativa del aire caliente, interceptando la isoterma y leyendo en el eje de las “y” la humedad de equilibrio. Aquí también se hizo uso de la carta psicométrica para la determinación de la humedad relativa del aire caliente, a la temperatura de operación del secador (Apéndice D).

### 2.2.2. Velocidad de Secado vs. Humedad Libre.

Otra curva de interés como se describió en el Capítulo 1 es la gráfica de Velocidad de secado vs Humedad libre. La humedad libre se calculó según la ecuación 8, mientras que para hallar la velocidad de secado (R) se consideró la siguiente fórmula:

$$R = \frac{W_s \Delta X}{A \Delta t} \quad (\text{Ec 11})$$

Donde:  $W_s$ : Peso de sólidos secos.

$A$  : Área de la muestra.

$\Delta X$  : Diferencial de las humedades libres medias.

$\Delta t$  : Diferencial del tiempo en horas.

$R$ : Velocidad de secado ( $\text{KgH}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )

## 2.3 Determinación del Coeficiente de Difusión y Transferencia de Masa.

La fuerza de secado está dado por la diferencia de humedades entre el alimento y el aire caliente. Es aquí donde interviene dos parámetros matemáticos conocidos como: coeficiente de transferencia de masa y coeficiente de difusión efectiva.

### 2.3.1 Coeficiente de transferencia de masa.

La determinación de los coeficientes de transferencia de masa es un proceso análogo a los utilizados en la transferencia de calor; donde el número de Nusselt es remplazado por el de Sherwood; el cuál puede fue calculado mediante la ecuación 12 y 13.

$$Sh = \frac{Kg D}{D_{wn}} \quad (Ec 12)$$

Donde:  $Sh$  : Número de Sherwood.

$D$  : Diámetro o Longitud característica. (m).

$D_{wm}$ : Difusividad del agua en aire (Kg mol/m.s)

$Kg$ : Coeficiente de Transferencia de masa.

$$Sh = 0.0023 Re^{0.81} Sc^{0.44} \quad (Ec 13)$$

Donde:  $Re$ : el número de Reynolds

$Sc$ : número de Schmidt

$$Re = \frac{D V \rho}{\mu} \quad (Ec\ 14)$$

Donde:  $D$ : Diámetro de la partícula (m).

$V$ : Velocidad de aire (m/s).

$\rho$ : Densidad del aire (Kg/m<sup>3</sup>).

$\mu$ : Viscosidad del aire (Pa-s).

$$Sc = \frac{\mu}{\rho Dm} = \frac{\mu}{Ma Dwn} \quad (Ec\ 15)$$

Donde:  $\mu$  : Viscosidad del aire

$\rho$  : Densidad del aire

$Ma$ : Peso Molecular del Aire (Kg/Kgmol) = 29

$Dm$ : Difusividad del agua en aire (m<sup>2</sup>/s) = 2.2x10<sup>-5</sup>

$Dwm$ : Difusividad del agua en aire (Kg mol/m.s)

### 2.3.2 Coeficientes de difusión efectiva.

Para determinar los coeficientes de transferencia de masa fundamentados en la teoría de difusión, se utilizó la Ley de

Fick's modificada para diferentes geometrías, estas ecuaciones se explican a continuación:

### 2.3.2.1 Esfera.

$$\frac{X-X^*}{X_o-X^*} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-n^2 D_{ef} t}{r^2}\right) \quad (\text{Ec } 16)$$

Donde:  $X$ : Contenido de humedad en el tiempo  $t$

$X_o$ : Contenido de humedad inicial

$X^*$ : Contenido de humedad de equilibrio

$r$ : Radio de la esfera

### 2.3.2.2 Lámina.

$$\frac{X - X^*}{X_o - X^*} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{h_n^2} \exp\left(\frac{-h_n^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right) \quad (\text{Ec } 17)$$

Donde:  $X$ : Contenido de humedad en el tiempo  $t$

$X_o$ : Contenido de humedad inicial

$X^*$ : Contenido de humedad de equilibrio

$L$ : Radio es el espesor de la lámina

$h_n$ :  $2n-1$



### 2.3.2.3 Cilindro.

$$\frac{X - X^*}{X_o - X^*} = \frac{4}{r_a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} \exp(-\beta_n^2 D_{ef} t)$$

(Ec 18)

Donde:  $X$ : Contenido de humedad en el tiempo  $t$

$X_o$ : Contenido de humedad inicial

$X^*$ : Contenido de humedad de equilibrio

$r_a$ : es el radio del cilindro

$\beta_n$ : raíces de primera clase y de orden cero

El coeficiente difusional efectivo ( $D_{ef}$ ) para cada forma geométrica, se calculó a partir de la pendiente de la línea recta, obtenida al graficar el  $\ln (X-X^*)/(X_o-X^*)$  en función del tiempo de secado (Apéndice E).

## 2.4. Análisis Físico – Químicos.

### 2.4.1. Isotermas de Desorción.

Para la realización de la isoterma de desorción del melón se aplicó el método isopiéstico. Este consistió en colocar una muestra de melón triturado de alrededor de 2 g y un material de referencia (sales con  $a_w$  conocida), fueron colocados en una estufa a una temperatura constante de 32°C.

En la tabla 3, se indica las sustancias químicas con sus respectivas  $a_w$ .

TABLA 3.  
SALES Y ACTIVIDADES UTILIZADAS EN LA ISOTERMA

SAL	$a_w$
Nitrato de Potasio	0.97
Cloruro de Potasio	0.88
Nitrato de Sodio	0.78
Cloruro de Sodio	0.75.
Carbonato de Potasio	0.432
Cloruro de Magnesio	0.328
Hidróxido de Sodio	0.0745

La ganancia o pérdida de peso está relacionada con la actividad de agua proporcionada por las sales en solución acuosa saturada. La Isoterma habría alcanzado su equilibrio cuando llegó a peso constante.

Para realizar la isoterma se tomó en cuenta:

- Humedad en Base Seca.
- Actividades de agua de las sales.

La determinación de la humedad en base seca, se realizó a partir de la Humedad en base húmeda del producto, a través de la siguiente ecuación:

$$Hbh = 1 - \frac{W_i(1 - X_i)}{W_f} \quad (\text{Ec } 19)$$

Donde:  $W_i$ : Peso inicial de la muestra.

$X_i$ : Humedad inicial de la muestra.

$W_f$ : Peso final de la muestra.

Remplazando el resultado de la ecuación 19 en la 20, finalmente obtenemos la humedad en base seca.

$$Hbs = \frac{Hbh}{1 - Hbh} \quad (\text{Ec } 20)$$

Todos los ensayos y mediciones se realizó por duplicado, por lo que para los cálculos finales se utiliza un promedio de los pesos obtenidos al alcanzar el equilibrio (Apéndice A), la isoterma para una mejor precisión fue realizada mediante el programa Water Analyzer.

### 2.4.2. Encogimiento.

Uno de las características que se da en el secado, es el encogimiento del producto, por lo que se analizó la varianza del mismo, relacionado el área superficial final e inicial del alimento, con el objetivo de conocer el porcentaje de reducción durante el proceso de secado. Esta medición para las diferentes formas (esferas, cubo y cilindro), se calculó por la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de Reducción} = \frac{\text{Área final}}{\text{Área inicial}} * 100$$

(Ec 21)

# CAPITULO 3

## 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.1 Isoterma de Desorción.

Luego de realizar los cálculos de humedades e ingresar los datos obtenidos en Water Analyser Software, el cual ajusta la isoterma al modelo de GAB, podemos apreciar la Isoterma de Desorción (Figura 3.1); con una clara tendencia de curva signoide, característica de los productos alimenticios; y con un índice de correlación de datos,  $R^2=0.9870594$  (Tabla 4), un valor cercano a uno, que nos da un nivel de confianza razonable, de que los datos tienen relación entre sí, y se asemejan a los requeridos por el modelo (Ec1).

En la gráfica 3.1, se puede apreciar una tendencia exponencial hasta una  $a_w$  de alrededor de 0.75, la cual se da por la no influencia de los sólidos insolubles con la actividad de agua y donde el alimento no ofrece ningún tipo de resistencia a la pérdida de agua, corroborando la teoría de diferentes autores estudiosos del tema (2).

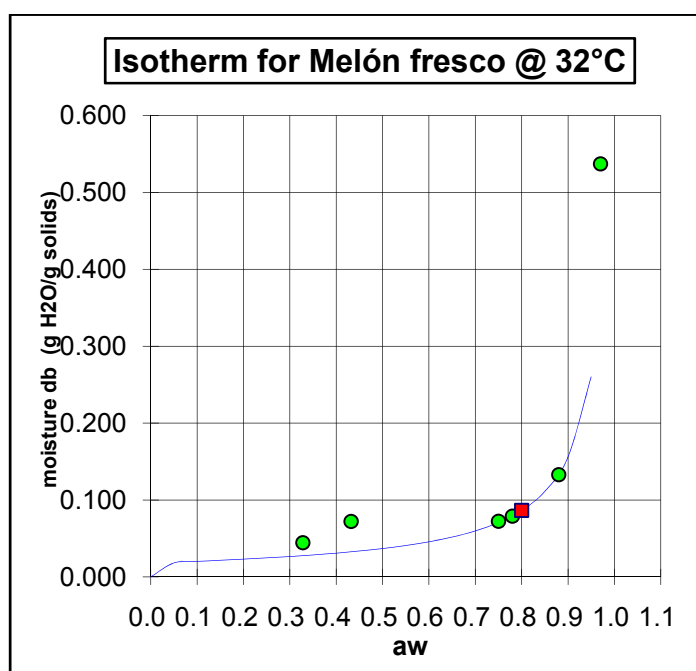


FIGURA 3.1. ISOTERMA DE DESORCIÓN DE MELÓN FRESCO A 32° C, PRESIÓN 1 ATM.

Como segundo punto de análisis, la curva de la isoterma comienza a aplanarse hasta una  $a_w$  cercana a 0.45, con lo que se puede apreciar pequeños cambios o deltas de humedad, es en esta parte donde comienzan a tomar importancia los sólidos insolubles de la muestra de melón fresco; donde el agua es retenida en los capilares de la muestra por condensación capilar. Además de que cierta proporción de agua aún se encuentra en forma líquida, permitiendo seguir con el proceso de secado. Después de este período a  $a_w$  menores a 0.45, es notorio, que los cambios de humedad comienzan a ser prácticamente insignificantes, debido a la no presencia de agua en

forma líquida, indicativo de que el secado está llegando a su punto culminante, es en esta parte de la isoterma donde se calcula el valor de la monocapa, y humedad de equilibrio entre la muestra de melón y el aire caliente como medio desecador, siendo 0.025 Kg H<sub>2</sub>O/Kg s.s (Apéndice D).

### **3.2. Monocapa de BET.**

Una vez obtenido y comprendido la isoterma de desorción del melón de la variedad cantaloupe, se procedió al cálculo del monocapa de forma directa gracias a Water Analyser Software, el cual nos dio como resultado una Monocapa de 0.0186 KgH<sub>2</sub>O/Kgs.s. El cálculo fue fundamentado en la ecuación 1 del modelo de BET, lo que nos indica el valor de la fracción másica correspondiente a la última capa de agua, que va a cubrir la superficie del sólido una vez realizado el secado, y donde el fruto seco va a tener su mayor estabilidad. De acuerdo a las humedades libres (Apéndice C), alcanzadas en peso constante de las muestras secas, nos damos cuenta, que no se alcanzó llegar hasta el valor de la monocapa bajo las condiciones de secado en las que se realizaron las pruebas. Para llegar hasta el valor de BET una de las mejores opciones sería trabajar con temperaturas mayores a 55°C, que en nuestro caso fue la temperatura de operación del secador, con lo cual también se bajaría la humedad relativa del aire dentro de la cámara de secado.

TABLA 4.  
MONOCAPA DE BET.

<b>0.0186 KgH<sub>2</sub>O/Kgs.s.</b>
<b>R<sup>2</sup>= 0.987059384</b>

### 3.3 Curvas de Secado.

#### 3.3.1 Pérdida de Humedad libre Vs Tiempo.

En las siguiente gráfica (Figura 3.2.), se puede observar la tendencia de la reducción de la humedad libre en función del tiempo.

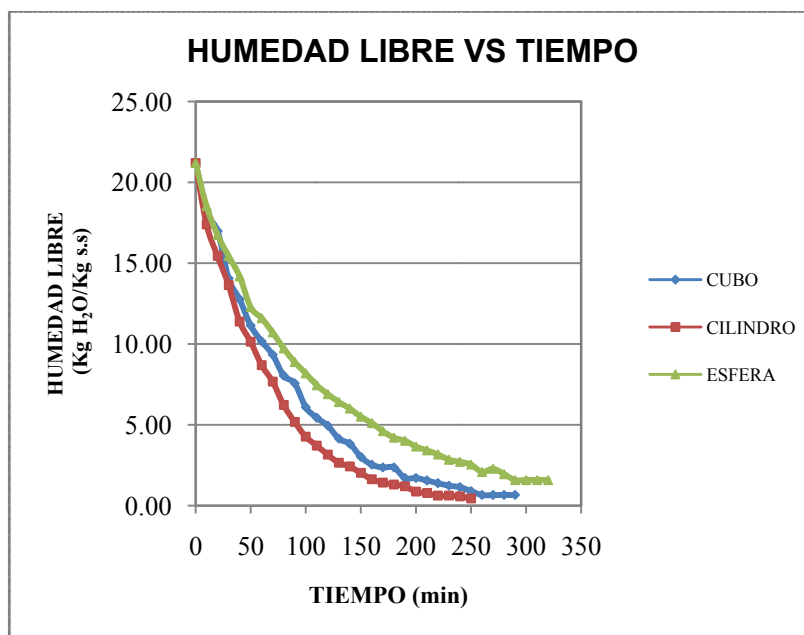


FIGURA 3.2. HUMEDAD LIBRE VS TIEMPO



En el inicio de la curva existe una reducción de humedad de forma lineal, aproximadamente por los 60 primeros minutos; es en este intervalo de tiempo donde se desarrolla el período de velocidad constante. Luego de esta etapa, en las tres curvas, se observa una disminución de humedad con menor rapidez, es aquí donde se va a desarrollar la mayor parte del secado, es decir el período de velocidad decreciente. Relacionando las tres curvas, podemos observar, que la correspondiente a la esfera posee menor pendiente, debido a la menor rapidez con la que pierde agua comparada con las otras muestras, llegando a una humedad libre promedio de  $1.58 \text{ KgH}_2\text{O/Kg s.s}$  en 325 min. Observando con mayor detenimiento la gráfica 3.2, es notorio que después de los 60 minutos, la forma cúbica se desarrolla sobre los cilindros, es decir los cubos perdieron agua con menor rapidez, alcanzando una humedad libre promedio de  $0.66 \text{ KgH}_2\text{O/Kgs.s}$  en alrededor de 290 min; mientras que los cilindros alcanzaron una humedad promedio de  $0.44 \text{ KgH}_2\text{O/Kg s.s.}$  con un tiempo de 250 min.

### **3.3.2 Velocidad de secado vs humedad libre.**

A continuación se puede apreciar la cinética de secado, relacionando la humedad libre con la velocidad de secado de cada forma (Figura 3.3); de esta podemos mencionar, que la

humedad crítica promedio de las muestras de melón sometidas al proceso es de 15.1 Kg H<sub>2</sub>O/Kgs.s. además que la forma cilíndrica es la que tiene mayor velocidad de secado, principalmente en el período de velocidad decreciente, seguida de la cubica y finalmente de las muestra esféricas. Se pueden apreciar claramente un primer período de velocidad constante en las 3 formas; de estas la velocidad promedio de los cilindros se desarrolló similarmente a los cubos siendo esta 1.35 Kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>h hasta llegar a la humedad crítica, mientras que la de la forma esférica fue de 1.25 Kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>h.

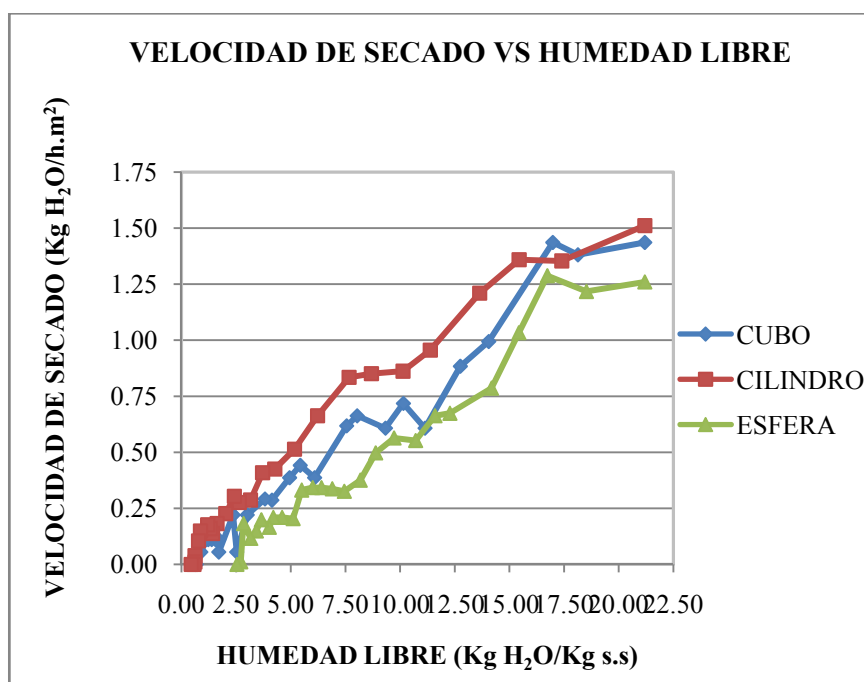


FIGURA 3.3. VELOCIDAD DE SECADO VS HUMEDAD  
LIBRE

Después de llegar a la velocidad crítica, se puede percibir un período de velocidad decreciente, donde en su mayoría sería de forma lineal, con lo que se comprueba que el modelo de difusión es el fundamento predominante en la pérdida de humedad en el secado de esta clase de fruto; igual que el período de velocidad constante, la velocidad de la forma cilíndrica predomina sobre las otras dos formas, seguida de la forma cúbica y luego de la esférica.

### 3.4 Coeficientes de Transferencia de Masa.

Otro parámetro de interés, como lo es coeficiente de transferencia de masa ( $kg$ ), tiene gran relevancia al estudiar la transferencia de agua, desde el interior de las muestras de melón hacia el medio desecador dentro del secado. Los resultados obtenidos por las ECUACIONES 9,10,11,12 explicadas en el capítulo 2, se muestran a continuación (Tabla 5).

TABLA 5.

COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA

Kg ( $Kg mol H_2O / m^2 s$ )		
CUBO	CILINDRO	ESFERA
7.703884E-04	7.70427E-04	7.70357E-04

Al obtener los coeficientes de transferencia de masa de la muestra de la melón cortado en diferentes formas geométricas, podemos observar que los 3 valores (cubo, cilindro y esfera), en una visión rápida son prácticamente iguales a  $7.70 \times 10^{-4}$ , con una variación solo en las milésimas de la base del resultado expresado en notación científica, lo que resulta para efecto de este estudio investigativo un valor de poca utilidad por la cercanía de los valores obtenidos, confirmando que este tipo cálculo se asemejan más a la parte teórica, principalmente por el motivo de que muchos datos utilizados en estos modelos empíricos matemáticos, son asumidos o tomados de experiencias anteriormente realizadas.

### **3.5 Coeficientes de Difusividad Efectiva.**

De acuerdo a lo expresado en el capítulo 2, los coeficientes de difusividad efectiva, fueron calculados de acuerdo a las ecuaciones 13,14,15 integrada de la segunda Ley de Fick para las diferentes geometrías y tiempos largos de secado; la pendiente de la recta al graficar el primer término de la ecuación vs el tiempo corresponde al  $D_{ef}$  (Figura 3.3.) y Tabla 6.

Como se pudo observar, los resultados de los coeficientes de difusividad efectiva alcanzados nos permiten realzar un análisis enfocado en los objetivos planteados en un principio.

Entre los puntos relevantes se puede recalcar, que una vez realizado el proceso de secado, la forma que tuvo un mayor coeficiente de difusividad fue la forma de cilindro con  $1.96 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , es decir que fue esta muestra la que ofreció menor resistencia a la migración de la humedad, seguido por la forma cúbica con  $2.13 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , y por último la forma esférica fue la geometría que ofreció mayor resistencia a la salida o éxodo de agua hacia el exterior con un coeficiente de difusividad efectiva de  $1.39 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , una explicación o asunción de esto es que, la muestra de forma cilíndrica fue la que tuvo menor encogimiento durante el proceso de secado y por ende mantuvo un mayor área de exposición con relación al aire caliente y por lo tanto una mayor difusividad de humedad.

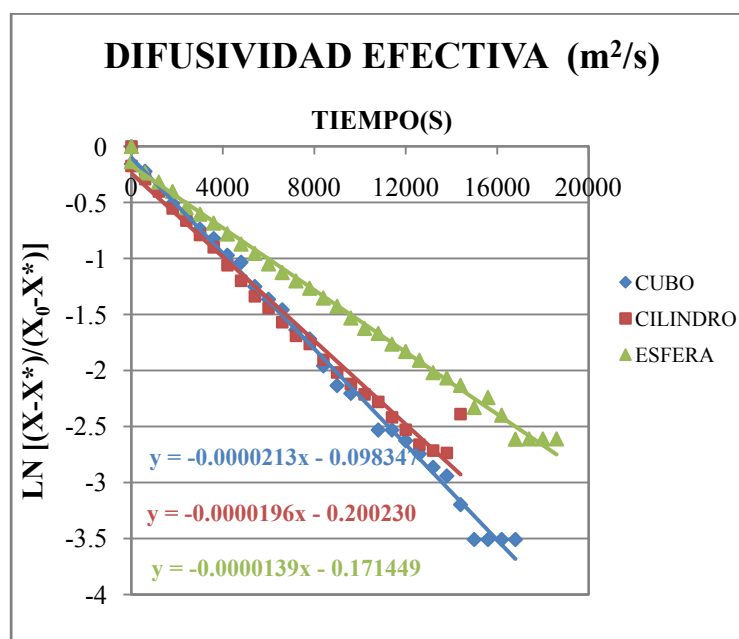


FIGURA 3.4. COEFICIENTES DE DIFUSIVIDAD EFECTIVA

TABLA 6.  
COEFICIENTES DE DIFUSIVIDAD EFECTIVA

<b>D<sub>ef</sub></b>		
<b>CUBO</b>	<b>CILINDRO</b>	<b>ESFERA</b>
2.13E-05	1.96E-04	1.39E-05

Con los nuevos coeficientes de difusividad efectiva se volvió a calcular los coeficientes de transferencia de masas dándonos como resultados (Tabla 7), donde hay claramente una superioridad del coeficiente de transferencia de masa del cilindro con  $2.621992 \times 10^{-3}$  Kg molH<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s, seguido a forma cúbica con  $7.565030 \times 10^{-4}$  Kg molH<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s y finalmente, las esferas con  $5.956940 \times 10^{-4}$  Kg molH<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s; tendencia que vuelven a afirmar la diferencia en velocidad de secado, donde los cilindros predominaban al transferir masa seguida de los cubos y finalizando con las esferas; cuyos valores más útiles que los detallados y analizados en el numeral 3.4 del capítulo 3.

TABLA 7.  
COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA CON  
DIFUSIVIDADES EFECTIVAS CALCULADAS.

<b>Kg (Kg molH<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s)</b>		
<b>CUBO</b>	<b>CILINDRO</b>	<b>ESFERA</b>
7.565030E-04	2.621992E-03	5.956940E-04

### 3.6 Encogimiento.

Para el análisis del encogimiento se consideró las áreas iniciales y finales de contacto, para así observar el porcentaje de reducción de las mismas en las diferentes formas geométricas luego de ser sometidas al proceso de secado (Tabla 8).

TABLA 8.  
ENCOGIMIENTO DE LAS DIFERENTES FORMAS GEOMÉTRICAS  
DESPUÉS DEL SECADO.

	Área Inicial (cm <sup>2</sup> )	Área Final (cm <sup>2</sup> )	% de Reducción	% Promedio
Cubo1	18.10	4.86	73.15	72.92
Cubo2	18.10	6.00	66.85	
Cubo3	18.10	3.84	78.78	
Cilindro 1	18.10	7.53	58.39	61.67
Cilindro 2	18.10	6.36	64.86	
Cilindro 3	18.10	6.92	61.76	
Esfera 1	18.10	3.80	79.00	84.62
Esfera 2	18.10	2.54	85.96	
Esfera 3	18.10	2.01	88.89	

De acuerdo al porcentaje de reducción de áreas, luego de realizado el secado de las muestras de melón, podemos observar una clara diferencia de estos valores, siendo el de mayor porcentaje de reducción la forma esférica, la cual obtuvo una disminución promedio

de 84.62% con relación a su área inicial, luego continúa la forma cúbica con un 72.92% y finalmente la cilíndrica con un 61.67%.

Por los datos resultantes, podemos inducir, que la forma cilíndrica es la que menor reducción de área tuvo, por efecto, a medida que avanzaba el secado existía una mayor área de transferencia y de contacto, entre el aire caliente y la muestra de melón, es decir, que al existir un menor encogimiento porcentual, hay una mayor porosidad, y por ende, una mejor transferencia de humedad desde el interior de la fruta analizada hacia el gas desecante.



# CAPITULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### **Conclusiones.**

1. La forma geométrica del sólido, juega un papel importante dentro del mecanismo de transferencia de agua entre el alimento y el aire caliente utilizado como medio de secado, observándose una superioridad en la velocidad de secado en la forma cilíndrica después de terminado el secado en comparación con las otras dos geometrías, fue la que sufrió una menor reducción del área superficial en relación a las esferas y cubos, a pesar de comenzar la experimentación con áreas de contacto iguales para las tres formas.
2. Las curvas de secado nos permiten observar claramente dos períodos de velocidad de secado, el constante y el decreciente en las diferentes formas, donde se puede observar que la curva correspondiente a los cilindros se desarrolla sobre la de los cubos y esferas.

3. La difusión, es el mecanismo predominante en la pérdida de agua durante el proceso de secado de las muestras de melón, como en la mayoría de las frutas independiente de la forma geométrica.
4. Al ser la difusión el mecanismo de pérdida de agua del melón, los coeficientes de Difusividad Efectiva son un buen parámetro de comparación de Velocidad de secado, donde el mayor valor lo tuvo la muestra cilíndrica seguida de la cúbica y finalmente la esférica.

**Recomendaciones.**

1. Los estudios de cinética de secado tienen que ser investigaciones específicas; es decir que no se puede generalizar, ya que el mecanismo y velocidad de pérdida de agua, varían de acuerdo a las características del alimento y condiciones de proceso.
2. Cuando se desarrolle un nuevo producto deshidratado, es importante definir la forma del producto que se va a comercializar debido a que este incide directamente en el proceso de secado.
3. Realizar nuevas investigaciones con diferentes alimentos ecuatorianos, con la finalidad de ofrecer al mercado, nuevas alternativas de productos con valor agregado y colaborar al crecimiento de nuestra industria.

# Anexos

## APÉNDICE A

### DATOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA ISOTERMA

Pruebas	Reactivos	Sistema (g)	Muestra Inicial (g)	Sistema+ Muestra (g)	Muestra final (g)	Aw= %ERH/100	H bh	Hbs (g H <sub>2</sub> O/ gs.s)	aw	Promedio Hbs
1	Nitrato de potasio	1,074	2,143	3,217	0,176	0,97	0,45207386	0,82506351	0,97	0,53708653
2		1,0891	2,0121	3,1012	0,1131		0,19942971	0,24910955		
1	Cloruro de potasio	1,1009	2,0045	3,1054	0,0884	0,88	0,02039027	0,01998282	0,88	0,13304954
2		1,1505	2,0251	3,1756	0,1172		0,22244454	0,28608189		
1	Nitrato de Sodio	1,0067	2,2141	3,2208	0,0959	0,78	0,03894161	0,037482	0,78	0,0791303
2		1,1647	1,9365	3,1012	0,1042		0,16369962	0,19574261		
1	Cloruro de sodio	1,0921	2,0352	3,1273	0,0884	0,75	0,0360181	0,0347659	0,75	0,07238472
2		1,1403	1,9876	3,1279	0,1055		0,15220853	0,17953534		
1	Carbonato de potasio	1,5288	2,0806	3,6094	0,0714	0,432	0,31130252	0,23739947	0,432	0,07224525
2		1,1808	1,9249	3,1057	0,1197		0,27635338	0,38188997		
1	Cloruro de magnesio	1,0983	2,0919	3,1902	0,1036	0,328	0,09135618	0,10054124	0,328	0,04458276
2		1,1592	2,0365	3,1957	0,0906		0,01150662	0,01137573		
1	Hidróxido de sodio	1,7627	2,0725	3,8352	0,0629	0,0745	0,48271065	0,32555958	0,0745	0,01282316
2		1,8174	2,0041	3,8215	0,0706		0,27740085	0,21716038		
3		1,41	2,3892	3,7992	0,17		0,36756471	0,58118943		

**APÉNDICE B**

**CONDICIONES DE PROCESO**

DATOS INICIALES DE MELÓN	
°Brix	4,50%
Humedad inicial	95,50%
Sólidos	0,045 g/100g melón

CONDICIONES DE LOS EXPERIMENTOS	
Temperatura de Trabajo (°C)	55 ± 5
Velocidad de Aire Caliente (m/s)	4,19
Temperatura Ambiente °C	25,9
Humedad Relativa Ambiente (%)	81,30
Número de muestras x prueba	1
Área de contacto de la muestra (cm <sup>2</sup> )	18,10

## APÉNDICE C

### PRUEBAS DE SECADO

#### CUBO 1

Tiempo (h)	Tiempo (min)	Muestra (g)	Humedad (base seca) $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$X=X_t-X^*$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	Factor X	X promedio $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta X$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta t$ (h)	Ls/A (kg/m <sup>2</sup> )	velocidad de secado R $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{h.m}^2}$
0.00	0.00	4.50	21.22	21.20	20.99	19.26	2.72	0.17	0.11	1.82
0.17	10.00	3.80	17.77	17.74	17.53	16.54	1.98	0.17	0.11	1.33
0.33	20.00	3.40	15.79	15.77	15.55	14.57	1.48	0.17	0.11	0.99
0.50	30.00	3.00	13.81	13.79	13.58	13.08	1.23	0.17	0.11	0.83
0.67	40.00	2.80	12.83	12.80	12.59	11.85	1.23	0.17	0.11	0.83
0.83	50.00	2.50	11.35	11.32	11.11	10.61	0.99	0.17	0.11	0.66
1.00	60.00	2.30	10.36	10.33	10.12	9.63	1.23	0.17	0.11	0.83
1.17	70.00	2.10	9.37	9.35	9.13	8.39	0.49	0.17	0.11	0.33
1.33	80.00	1.80	7.89	7.86	7.65	7.90	0.99	0.17	0.11	0.66
1.50	90.00	1.90	8.38	8.36	8.15	6.91	1.48	0.17	0.11	0.99
1.67	100.00	1.40	5.91	5.89	5.68	5.43	0.49	0.17	0.11	0.33
1.83	110.00	1.30	5.42	5.39	5.18	4.94	0.74	0.17	0.11	0.50
2.00	120.00	1.20	4.93	4.90	4.69	4.20	0.74	0.17	0.11	0.50

2.17	130.00	1.00	3.94	3.91	3.70	3.45	0.49	0.17	0.11	0.33
2.33	140.00	0.90	3.44	3.42	3.21	2.96	0.74	0.17	0.11	0.50
2.50	150.00	0.80	2.95	2.93	2.71	2.22	0.49	0.17	0.11	0.33
2.67	160.00	0.60	1.96	1.94	1.73	1.73	0.00	0.17	0.11	0.00
2.83	170.00	0.60	1.96	1.94	1.73	1.73	0.49	0.17	0.11	0.33
3.00	180.00	0.60	1.96	1.94	1.73	1.23	0.49	0.17	0.11	0.33
3.17	190.00	0.40	0.98	0.95	0.74	0.74	0.00	0.17	0.11	0.00
3.33	200.00	0.40	0.98	0.95	0.74	0.74	0.00	0.17	0.11	0.00
3.50	210.00	0.40	0.98	0.95	0.74	0.74	0.00	0.17	0.11	0.00
3.67	220.00	0.40	0.98	0.95	0.74	0.74	0.00	0.17	0.11	0.00
3.83	230.00	0.40	0.98	0.95	0.74	0.74	0.00	0.17	0.11	0.00



## CUBO 2

Tiempo (h)	Tiempo (min)	Muestra (g)	Humedad (base seca) $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$X=X_t-X^*$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	Factor X	X promedio $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta X$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta t$ (h)	Ls/A (kg/m <sup>2</sup> )	velocidad de secado R $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{h.m}^2}$
0.00	0.00	4.80	21.22	21.20	20.99	19.13	2.08	0.17	0.12	1.49
0.17	10.00	4.00	17.52	17.49	17.28	17.05	1.62	0.17	0.12	1.16
0.33	20.00	3.90	17.06	17.03	16.82	15.43	2.08	0.17	0.12	1.49
0.50	30.00	3.30	14.28	14.25	14.04	13.35	1.62	0.17	0.12	1.16
0.67	40.00	3.00	12.89	12.86	12.65	11.73	1.16	0.17	0.12	0.83
0.83	50.00	2.60	11.04	11.01	10.80	10.57	0.46	0.17	0.12	0.33
1.00	60.00	2.50	10.57	10.55	10.34	10.11	0.93	0.17	0.12	0.66
1.17	70.00	2.40	10.11	10.09	9.87	9.18	1.16	0.17	0.12	0.83
1.33	80.00	2.10	8.72	8.70	8.49	8.02	0.93	0.17	0.12	0.66
1.50	90.00	1.90	7.80	7.77	7.56	7.10	0.69	0.17	0.12	0.50
1.67	100.00	1.70	6.87	6.85	6.63	6.40	0.46	0.17	0.12	0.33
1.83	110.00	1.60	6.41	6.38	6.17	5.94	0.69	0.17	0.12	0.50
2.00	120.00	1.50	5.94	5.92	5.71	5.24	0.69	0.17	0.12	0.50
2.17	130.00	1.30	5.02	4.99	4.78	4.55	0.69	0.17	0.12	0.50
2.33	140.00	1.20	4.56	4.53	4.32	3.86	0.69	0.17	0.12	0.50
2.50	150.00	1.00	3.63	3.60	3.39	3.16	0.23	0.17	0.12	0.17

2.67	160.00	0.90	3.17	3.14	2.93	2.93	0.00	0.17	0.12	0.00
2.83	170.00	0.90	3.17	3.14	2.93	2.93	0.23	0.17	0.12	0.17
3.00	180.00	0.90	3.17	3.14	2.93	2.70	0.23	0.17	0.12	0.17
3.17	190.00	0.80	2.70	2.68	2.47	2.47	0.23	0.17	0.12	0.17
3.33	200.00	0.80	2.70	2.68	2.47	2.24	0.23	0.17	0.12	0.17
3.50	210.00	0.70	2.24	2.22	2.00	2.00	0.23	0.17	0.12	0.17
3.67	220.00	0.70	2.24	2.22	2.00	1.77	0.46	0.17	0.12	0.33
3.83	230.00	0.60	1.78	1.75	1.54	1.31	0.23	0.17	0.12	0.17
4.00	240.00	0.50	1.31	1.29	1.08	1.08	0.23	0.17	0.12	0.17
4.17	250.00	0.50	1.31	1.29	1.08	0.85	0.23	0.17	0.12	0.17
4.33	260.00	0.40	0.85	0.83	0.61	0.61	0.00	0.17	0.12	0.00
4.50	270.00	0.40	0.85	0.83	0.61	0.61	0.00	0.17	0.12	0.00
4.67	280.00	0.40	0.85	0.83	0.61	0.61	0.00	0.17	0.12	0.00
4.83	290.00	0.40	0.85	0.83	0.61	0.00	0.00	0.17	0.12	0.00

### CUBO 3

Tiempo (h)	Tiempo (min)	Muestra (g)	Humedad (base seca) $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kg ss}}$	$X=X_t-X^*$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	Factor X	X promedio $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kg ss}}$	$\Delta X$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kg ss}}$	$\Delta t$ (h)	Ls/A (kg/m <sup>2</sup> )	velocidad de secado R $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{h.m}^2}$
0.00	0.00	4.40	21.22	21.20	20.99	19.98	1.52	0.17	0.11	0.99
0.17	10.00	4.00	19.20	19.18	18.97	18.46	2.53	0.17	0.11	1.66
0.33	20.00	3.80	18.19	18.17	17.95	15.93	2.78	0.17	0.11	1.82
0.50	30.00	3.00	14.15	14.13	13.91	13.16	1.52	0.17	0.11	0.99
0.67	40.00	2.70	12.64	12.61	12.40	11.64	1.52	0.17	0.11	0.99
0.83	50.00	2.40	11.12	11.10	10.88	10.13	1.26	0.17	0.11	0.83
1.00	60.00	2.10	9.61	9.58	9.37	8.86	1.01	0.17	0.11	0.66
1.17	70.00	1.90	8.60	8.57	8.36	7.85	1.01	0.17	0.11	0.66
1.33	80.00	1.70	7.59	7.56	7.35	6.84	1.01	0.17	0.11	0.66
1.50	90.00	1.50	6.58	6.55	6.34	5.83	1.01	0.17	0.11	0.66
1.67	100.00	1.30	5.57	5.54	5.33	4.82	0.76	0.17	0.11	0.50
1.83	110.00	1.10	4.56	4.53	4.32	4.07	0.51	0.17	0.11	0.33
2.00	120.00	1.00	4.05	4.03	3.81	3.56	0.25	0.17	0.11	0.17
2.17	130.00	0.90	3.55	3.52	3.31	3.31	0.51	0.17	0.11	0.33
2.33	140.00	0.90	3.55	3.52	3.31	2.80	0.51	0.17	0.11	0.33
2.50	150.00	0.70	2.54	2.51	2.30	2.30	0.25	0.17	0.11	0.17

2.67	160.00	0.70	2.54	2.51	2.30	2.05	0.25	0.17	0.11	0.17
2.83	170.00	0.60	2.03	2.01	1.79	1.79	0.25	0.17	0.11	0.17
3.00	180.00	0.60	2.03	2.01	1.79	1.54	0.25	0.17	0.11	0.17
3.17	190.00	0.50	1.53	1.50	1.29	1.29	0.00	0.17	0.11	0.00
3.33	200.00	0.50	1.53	1.50	1.29	1.29	0.25	0.17	0.11	0.17
3.50	210.00	0.50	1.53	1.50	1.29	1.04	0.25	0.17	0.11	0.17
3.67	220.00	0.40	1.02	1.00	0.78	0.78	0.00	0.17	0.11	0.00
3.83	230.00	0.40	1.02	1.00	0.78	0.78	0.25	0.17	0.11	0.17
4.00	240.00	0.40	1.02	1.00	0.78	0.53	0.25	0.17	0.11	0.17
4.17	250.00	0.30	0.52	0.49	0.28	0.28	0.00	0.17	0.11	0.00
4.33	260.00	0.30	0.52	0.49	0.28	0.28	0.00	0.17	0.11	0.00
4.50	270.00	0.30	0.52	0.49	0.28	0.28	0.00	0.17	0.11	0.00
4.67	280.00	0.30	0.52	0.49	0.28	0.28	0.00	0.17	0.11	0.00
4.83	290.00	0.30	0.52	0.49	0.28	0.00	0.00	0.17	0.11	0.00

### CILINDRO 1

Tiempo (h)	Tiempo (min)	Muestra (g)	Humedad (base seca) $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$X=X_t-X^*$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	Factor X	X promedio $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta X$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta t$ (h)	Ls/A (kg/m <sup>2</sup> )	velocidad de secado R $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{h.m}^2}$
0.00	0.00	5.20	21.22	21.20	20.99	18.85	3.63	0.17	0.13	2.82
0.17	10.00	4.20	16.95	16.92	16.71	15.22	2.14	0.17	0.13	1.66
0.33	20.00	3.50	13.96	13.93	13.72	13.08	1.92	0.17	0.13	1.49
0.50	30.00	3.20	12.68	12.65	12.44	11.16	1.71	0.17	0.13	1.33
0.67	40.00	2.60	10.11	10.09	9.87	9.45	1.28	0.17	0.13	0.99
0.83	50.00	2.40	9.26	9.23	9.02	8.16	1.28	0.17	0.13	0.99
1.00	60.00	2.00	7.55	7.52	7.31	6.88	1.28	0.17	0.13	0.99
1.17	70.00	1.80	6.69	6.67	6.46	5.60	1.50	0.17	0.13	1.16
1.33	80.00	1.40	4.98	4.96	4.75	4.10	1.07	0.17	0.13	0.83
1.50	90.00	1.10	3.70	3.68	3.46	3.04	0.64	0.17	0.13	0.50
1.67	100.00	0.90	2.85	2.82	2.61	2.40	0.43	0.17	0.13	0.33
1.83	110.00	0.80	2.42	2.39	2.18	1.97	0.43	0.17	0.13	0.33
2.00	120.00	0.70	1.99	1.97	1.75	1.54	0.21	0.17	0.13	0.17
2.17	130.00	0.60	1.56	1.54	1.33	1.33	0.21	0.17	0.13	0.17

2.33	140.00	0.60	1.56	1.54	1.33	1.11	0.43	0.17	0.13	0.33
2.50	150.00	0.50	1.14	1.11	0.90	0.69	0.21	0.17	0.13	0.17
2.67	160.00	0.40	0.71	0.68	0.47	0.47	0.00	0.17	0.13	0.00
2.83	170.00	0.40	0.71	0.68	0.47	0.47	0.00	0.17	0.13	0.00
3.00	180.00	0.40	0.71	0.68	0.47	0.47	0.21	0.17	0.13	0.17
3.17	190.00	0.40	0.71	0.68	0.47	0.26	0.21	0.17	0.13	0.17
3.33	200.00	0.30	0.28	0.26	0.05	0.05	0.00	0.17	0.13	0.00
3.50	210.00	0.30	0.28	0.26	0.05	0.05	0.00	0.17	0.13	0.00
3.67	220.00	0.30	0.28	0.26	0.05	0.05	0.00	0.17	0.13	0.00
3.83	230.00	0.30	0.28	0.26	0.05	0.05	0.00	0.17	0.13	0.00
4.00	240.00	0.30	0.28	0.26	0.05			0.17	0.13	0.00

## CILINDRO 2

Tiempo (h)	Tiempo (min)	Muestra (g)	Humedad (base seca) $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$X=X_t-X^*$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	Factor X	X promedio $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta X$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta t$ (h)	Ls/A (kg/m <sup>2</sup> )	velocidad de secado R $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{h.m}^2}$
0.00	0.00	4.91	21.22	21.20	20.99	19.70	2.29	0.17	0.12	1.67
0.17	10.00	4.34	18.64	18.62	18.41	17.41	1.67	0.17	0.12	1.23
0.33	20.00	3.90	16.65	16.63	16.41	15.74	1.40	0.17	0.12	1.03
0.50	30.00	3.60	15.29	15.27	15.06	14.33	1.36	0.17	0.12	0.99
0.67	40.00	3.28	13.84	13.82	13.61	12.97	1.15	0.17	0.12	0.85
0.83	50.00	3.00	12.58	12.55	12.34	11.82	1.00	0.17	0.12	0.73
1.00	60.00	2.77	11.54	11.51	11.30	10.82	0.95	0.17	0.12	0.70
1.17	70.00	2.56	10.59	10.56	10.35	9.87	0.84	0.17	0.12	0.61
1.33	80.00	2.35	9.64	9.61	9.40	9.04	0.70	0.17	0.12	0.51
1.50	90.00	2.19	8.91	8.89	8.67	8.34	0.61	0.17	0.12	0.45
1.67	100.00	2.04	8.23	8.21	8.00	7.72	0.61	0.17	0.12	0.45
1.83	110.00	1.92	7.69	7.66	7.45	7.11	0.59	0.17	0.12	0.43
2.00	120.00	1.77	7.01	6.99	6.77	6.52	0.43	0.17	0.12	0.31
2.17	130.00	1.66	6.51	6.49	6.28	6.10	0.50	0.17	0.12	0.36

2.33	140.00	1.58	6.15	6.13	5.91	5.60	0.43	0.17	0.12	0.31
2.50	150.00	1.44	5.52	5.49	5.28	5.17	0.32	0.17	0.12	0.23
2.67	160.00	1.39	5.29	5.27	5.05	4.85	0.43	0.17	0.12	0.31
2.83	170.00	1.30	4.88	4.86	4.65	4.42	0.34	0.17	0.12	0.25
3.00	180.00	1.20	4.43	4.41	4.19	4.08	0.20	0.17	0.12	0.15
3.17	190.00	1.15	4.20	4.18	3.97	3.88	0.29	0.17	0.12	0.22
3.33	200.00	1.11	4.02	4.00	3.79	3.58	0.36	0.17	0.12	0.27
3.50	210.00	1.02	3.62	3.59	3.38	3.22	0.27	0.17	0.12	0.20
3.67	220.00	0.95	3.30	3.27	3.06	2.95	0.11	0.17	0.12	0.08
3.83	230.00	0.90	3.07	3.05	2.84	2.84	0.00	0.17	0.12	0.00
4.00	240.00	0.90	3.07	3.05	2.84	2.84		0.17	0.12	0.00
4.17	250.00	0.90	3.07	3.05	2.84			0.17	0.12	0.00



### CILINDRO 3

Tiempo (h)	Tiempo (min)	Muestra (g)	Humedad (base seca) $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$X=X_t-X^*$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	Factor X	X promedio $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta X$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta t$ (h)	Ls/A ( $\text{kg/m}^2$ )	velocidad de secado R $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{h.m}^2}$
0.00	0.00	4.88	21.22	21.20	20.99	19.32	2.12	0.17	0.12	1.54
0.17	10.00	4.15	17.90	17.87	17.66	17.21	1.62	0.17	0.12	1.18
0.33	20.00	3.95	16.99	16.96	16.75	15.59	2.14	0.17	0.12	1.56
0.50	30.00	3.44	14.66	14.64	14.43	13.45	1.80	0.17	0.12	1.31
0.67	40.00	3.01	12.71	12.68	12.47	11.65	1.41	0.17	0.12	1.03
0.83	50.00	2.65	11.07	11.04	10.83	10.24	1.18	0.17	0.12	0.86
1.00	60.00	2.39	9.88	9.86	9.65	9.05	1.18	0.17	0.12	0.86
1.17	70.00	2.13	8.70	8.67	8.46	7.87	1.00	0.17	0.12	0.73
1.33	80.00	1.87	7.52	7.49	7.28	6.87	0.89	0.17	0.12	0.65
1.50	90.00	1.69	6.70	6.67	6.46	5.98	0.82	0.17	0.12	0.60
1.67	100.00	1.48	5.74	5.71	5.50	5.16	0.68	0.17	0.12	0.50
1.83	110.00	1.33	5.06	5.03	4.82	4.48	0.64	0.17	0.12	0.46
2.00	120.00	1.18	4.37	4.35	4.14	3.84	0.52	0.17	0.12	0.38
2.17	130.00	1.05	3.78	3.76	3.54	3.32	0.41	0.17	0.12	0.30
2.33	140.00	0.95	3.33	3.30	3.09	2.91	0.36	0.17	0.12	0.27

2.50	150.00	0.87	2.96	2.94	2.72	2.54	0.39	0.17	0.12	0.28
2.67	160.00	0.79	2.60	2.57	2.36	2.16	0.32	0.17	0.12	0.23
2.83	170.00	0.70	2.19	2.16	1.95	1.84	0.23	0.17	0.12	0.17
3.00	180.00	0.65	1.96	1.93	1.72	1.61	0.23	0.17	0.12	0.17
3.17	190.00	0.60	1.73	1.71	1.50	1.38	0.20	0.17	0.12	0.15
3.33	200.00	0.55	1.50	1.48	1.27	1.18	0.25	0.17	0.12	0.18
3.50	210.00	0.51	1.32	1.30	1.09	0.93	0.16	0.17	0.12	0.12
3.67	220.00	0.44	1.00	0.98	0.77	0.77	0.05	0.17	0.12	0.03
3.83	230.00	0.44	1.00	0.98	0.77	0.72	0.05	0.17	0.12	0.03
4.00	240.00	0.42	0.91	0.89	0.68	0.68		0.17	0.12	0.00
4.17	250.00	0.42	0.91	0.89	0.68		0.00	0.17	0.12	0.00

### ESFERA 1

Tiempo (h)	Tiempo (min)	Muestra (g)	Humedad (base seca) $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$X=X_t-X^*$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	Factor X	X promedio $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta X$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta t$ (h)	Ls/A (kg/m <sup>2</sup> )	velocidad de secado R $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{h.m}^2}$
0.00	0.00	6.80	21.22	21.20	20.99	19.51	2.94	0.17	0.17	2.98
0.17	10.00	5.90	18.28	18.26	18.04	16.57	1.80	0.17	0.17	1.82
0.33	20.00	5.00	15.34	15.31	15.10	14.78	0.82	0.17	0.17	0.83
0.50	30.00	4.80	14.69	14.66	14.45	13.96	1.63	0.17	0.17	1.66
0.67	40.00	4.50	13.71	13.68	13.47	12.33	1.63	0.17	0.17	1.66
0.83	50.00	3.80	11.42	11.39	11.18	10.69	0.98	0.17	0.17	0.99
1.00	60.00	3.50	10.44	10.41	10.20	9.71	1.06	0.17	0.17	1.08
1.17	70.00	3.20	9.46	9.43	9.22	8.65	0.98	0.17	0.17	0.99
1.33	80.00	2.85	8.31	8.29	8.08	7.67	0.74	0.17	0.17	0.75
1.50	90.00	2.60	7.50	7.47	7.26	6.93	0.82	0.17	0.17	0.83
1.67	100.00	2.40	6.84	6.82	6.61	6.12	0.65	0.17	0.17	0.66
1.83	110.00	2.10	5.86	5.84	5.63	5.46	0.33	0.17	0.17	0.33
2.00	120.00	2.00	5.54	5.51	5.30	5.14	0.33	0.17	0.17	0.33
2.17	130.00	1.90	5.21	5.18	4.97	4.81	0.49	0.17	0.17	0.50

2.33	140.00	1.80	4.88	4.86	4.65	4.32	0.49	0.17	0.17	0.50
2.50	150.00	1.60	4.23	4.20	3.99	3.83	0.49	0.17	0.17	0.50
2.67	160.00	1.50	3.90	3.88	3.66	3.34	0.49	0.17	0.17	0.50
2.83	170.00	1.30	3.25	3.22	3.01	2.85	0.16	0.17	0.17	0.17
3.00	180.00	1.20	2.92	2.90	2.68	2.68	0.33	0.17	0.17	0.33
3.17	190.00	1.20	2.92	2.90	2.68	2.36	0.33	0.17	0.17	0.33
3.33	200.00	1.00	2.27	2.24	2.03	2.03	0.16	0.17	0.17	0.17
3.50	210.00	1.00	2.27	2.24	2.03	1.87	0.33	0.17	0.17	0.33
3.67	220.00	0.90	1.94	1.92	1.70	1.54	0.16	0.17	0.17	0.17
3.83	230.00	0.80	1.61	1.59	1.38	1.38	0.00	0.17	0.17	0.00
4.00	240.00	0.80	1.61	1.59	1.38	1.38	0.00	0.17	0.17	0.00
4.17	250.00	0.80	1.61	1.59	1.38	1.38	0.00	0.17	0.17	0.00
4.33	260.00	0.80	1.61	1.59	1.38	1.38	1.38	0.17	0.17	0.00

## ESFERA 2

Tiempo (h)	Tiempo (min)	Muestra (g)	Humedad (base seca) $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$X=X_t-X^*$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	Factor X	X promedio $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta X$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta t$ (h)	Ls/A ( $\text{kg/m}^2$ )	velocidad de secado R $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{h.m}^2}$
0.00	0.00	8.04	21.22	21.20	20.99	19.53	2.16	0.17	0.20	2.59
0.17	10.00	6.99	18.32	18.30	18.08	17.38	1.63	0.17	0.20	1.96
0.33	20.00	6.48	16.91	16.89	16.67	15.75	1.60	0.17	0.20	1.92
0.50	30.00	5.81	15.06	15.03	14.82	14.14	1.84	0.17	0.20	2.20
0.67	40.00	5.32	13.70	13.68	13.47	12.31	1.20	0.17	0.20	1.44
0.83	50.00	4.48	11.38	11.36	11.15	11.10	0.39	0.17	0.20	0.46
1.00	60.00	4.45	11.30	11.27	11.06	10.72	0.79	0.17	0.20	0.94
1.17	70.00	4.20	10.61	10.58	10.37	9.93	0.83	0.17	0.20	0.99
1.33	80.00	3.88	9.72	9.70	9.49	9.10	0.76	0.17	0.20	0.91
1.50	90.00	3.60	8.95	8.93	8.71	8.34	0.72	0.17	0.20	0.86
1.67	100.00	3.33	8.20	8.18	7.97	7.62	0.69	0.17	0.20	0.83
1.83	110.00	3.08	7.51	7.49	7.28	6.93	0.66	0.17	0.20	0.80
2.00	120.00	2.83	6.82	6.80	6.59	6.27	0.54	0.17	0.20	0.65
2.17	130.00	2.60	6.19	6.16	5.95	5.73	0.43	0.17	0.20	0.51
2.33	140.00	2.44	5.74	5.72	5.51	5.30	0.44	0.17	0.20	0.53

2.50	150.00	2.29	5.33	5.30	5.09	4.86	0.44	0.17	0.20	0.53
2.67	160.00	2.12	4.86	4.83	4.62	4.42	0.41	0.17	0.20	0.50
2.83	170.00	1.97	4.44	4.42	4.21	4.00	0.37	0.17	0.20	0.45
3.00	180.00	1.82	4.03	4.01	3.79	3.63	0.25	0.17	0.20	0.30
3.17	190.00	1.70	3.70	3.67	3.46	3.38	0.25	0.17	0.20	0.30
3.33	200.00	1.64	3.53	3.51	3.30	3.13	0.28	0.17	0.20	0.33
3.50	210.00	1.52	3.20	3.18	2.96	2.85	0.22	0.17	0.20	0.27
3.67	220.00	1.44	2.98	2.96	2.74	2.63	0.23	0.17	0.20	0.28
3.83	230.00	1.36	2.76	2.73	2.52	2.40	0.29	0.17	0.20	0.35
4.00	240.00	1.27	2.51	2.49	2.27	2.11	0.46	0.17	0.20	0.55
4.17	250.00	1.15	2.18	2.15	1.94	1.65	0.29	0.17	0.20	0.35
4.33	260.00	0.94	1.60	1.57	1.36	1.36	0.00	0.17	0.20	0.00
4.50	270.00	0.94	1.60	1.57	1.36	1.36	0.00	0.17	0.20	0.00
4.67	280.00	0.94	1.60	1.57	1.36	1.36	1.36	0.17	0.20	1.63
4.83	290.00	0.94	1.60	1.57	1.36		0.00	0.17	0.20	

### ESFERA 3

Tiempo (h)	Tiempo (min)	Muestra (g)	Humedad (base seca) $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$X=X_t-X^*$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	Factor X	X promedio $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta X$ $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{Kgss}}$	$\Delta t$ (h)	Ls/A ( $\text{kg/m}^2$ )	velocidad de secado R $\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{h.m}^2}$
0.00	0.00	8.10	21.22	21.20	20.99	19.90	1.59	0.17	0.20	1.92
0.17	10.00	7.31	19.05	19.03	18.82	18.31	1.21	0.17	0.20	1.46
0.33	20.00	6.94	18.04	18.01	17.80	17.10	1.41	0.17	0.20	1.71
0.50	30.00	6.43	16.64	16.62	16.40	15.69	1.26	0.17	0.20	1.53
0.67	40.00	5.91	15.21	15.19	14.98	14.43	1.04	0.17	0.20	1.26
0.83	50.00	5.51	14.12	14.09	13.88	13.39	0.99	0.17	0.20	1.19
1.00	60.00	5.15	13.13	13.10	12.89	12.40	0.96	0.17	0.20	1.16
1.17	70.00	4.79	12.14	12.12	11.90	11.44	0.93	0.17	0.20	1.13
1.33	80.00	4.45	11.21	11.18	10.97	10.51	0.82	0.17	0.20	0.99
1.50	90.00	4.11	10.28	10.25	10.04	9.68	0.62	0.17	0.20	0.75
1.67	100.00	3.85	9.56	9.54	9.33	9.06	0.58	0.17	0.20	0.70
1.83	110.00	3.66	9.04	9.02	8.80	8.49	0.58	0.17	0.20	0.70
2.00	120.00	3.43	8.41	8.39	8.17	7.91	0.48	0.17	0.20	0.58
2.17	130.00	3.24	7.89	7.86	7.65	7.43	0.44	0.17	0.20	0.53

2.33	140.00	3.08	7.45	7.42	7.21	6.99	0.41	0.17	0.20	0.50
2.50	150.00	2.92	7.01	6.99	6.77	6.58	0.41	0.17	0.20	0.50
2.67	160.00	2.78	6.63	6.60	6.39	6.17	0.45	0.17	0.20	0.55
2.83	170.00	2.62	6.19	6.16	5.95	5.72	0.34	0.17	0.20	0.41
3.00	180.00	2.45	5.72	5.70	5.48	5.37	0.25	0.17	0.20	0.30
3.17	190.00	2.37	5.50	5.48	5.27	5.13	0.32	0.17	0.20	0.38
3.33	200.00	2.27	5.23	5.20	4.99	4.81	0.29	0.17	0.20	0.35
3.50	210.00	2.14	4.87	4.85	4.63	4.52	0.33	0.17	0.20	0.40
3.67	220.00	2.06	4.65	4.63	4.41	4.20	0.29	0.17	0.20	0.35
3.83	230.00	1.90	4.21	4.19	3.98	3.91	0.16	0.17	0.20	0.20
4.00	240.00	1.85	4.08	4.05	3.84	3.74	0.10	0.17	0.20	0.12
4.17	250.00	1.78	3.88	3.86	3.65	3.65	0.77	0.17	0.20	0.93
4.33	260.00	1.50	3.12	3.09	2.88	2.88	0.11	0.17	0.20	0.13
4.50	270.00	1.46	3.01	2.98	2.77	2.77	0.66	0.17	0.20	0.80
4.67	280.00	1.22	2.35	2.32	2.11	2.11	0.74	0.17	0.20	0.90
4.83	290.00	0.95	1.61	1.58	1.37	1.37	0.00	0.17	0.20	0.00
5.00	300.00	0.95	1.61	1.58	1.37	1.37	0.00	0.17	0.20	0.00
5.17	310.00	0.95	1.61	1.58	1.37	1.37	0.00	0.17	0.20	0.00
5.33	320.00	0.95	1.61	1.58	1.37	1.37	1.37	0.17	0.20	1.65



## DATOS PROMEDIOS

	CUBO		CILINDRO		ESFERA	
Tiempo min	Humedad libre (KgH <sub>2</sub> O/Kgss )	velocidad de secado Rc (KgH <sub>2</sub> O/h.m <sup>2</sup> )	Humedad libre (KgH <sub>2</sub> O/Kgss )	velocidad de secado Rc (KgH <sub>2</sub> O/h.m <sub>2</sub> )	Humedad libre (KgH <sub>2</sub> O/Kgss )	velocidad de secado Rc (KgH <sub>2</sub> O/h.m <sub>2</sub> )
0	21.20	1.44	21.20	1.51	21.20	1.86
10	18.14	1.38	17.40	1.35	18.53	1.26
20	16.99	1.44	15.45	1.36	16.74	1.22
30	14.06	0.99	13.65	1.21	15.44	1.29
40	12.76	0.88	11.38	0.96	14.18	1.03
50	11.14	0.61	10.14	0.86	12.28	0.79
60	10.15	0.72	8.69	0.85	11.60	0.67
70	9.33	0.61	7.67	0.83	10.71	0.66
80	8.04	0.66	6.22	0.66	9.72	0.55
90	7.56	0.62	5.17	0.51	8.88	0.56
100	6.09	0.39	4.27	0.43	8.18	0.50
110	5.44	0.44	3.71	0.41	7.45	0.38
120	4.95	0.39	3.16	0.29	6.90	0.33
130	4.14	0.29	2.65	0.28	6.40	0.34
140	3.82	0.29	2.42	0.30	6.00	0.34
150	3.01	0.22	2.02	0.23	5.50	0.34
160	2.53	0.06	1.63	0.18	5.10	0.33
170	2.36	0.22	1.42	0.14	4.60	0.20
180	2.36	0.22	1.31	0.16	4.20	0.21
190	1.71	0.06	1.20	0.18	4.02	0.21
200	1.71	0.11	0.87	0.15	3.65	0.17
210	1.56	0.11	0.78	0.10	3.42	0.20
220	1.39	0.11	0.62	0.04	3.17	0.15
230	1.23	0.11	0.62	0.01	2.84	0.12
240	1.14	0.11	0.57	0.00	2.71	0.18
250	0.89	0.06	0.44	0.00	2.53	0.01
260	0.66	0.00	0.44	0.00	2.08	0.00
270	0.66	0.00	0.44	0.00	2.28	0.00
280	0.66	0.00	0.44	0.00	1.95	0.00
290	0.66	0.00			1.58	0.00

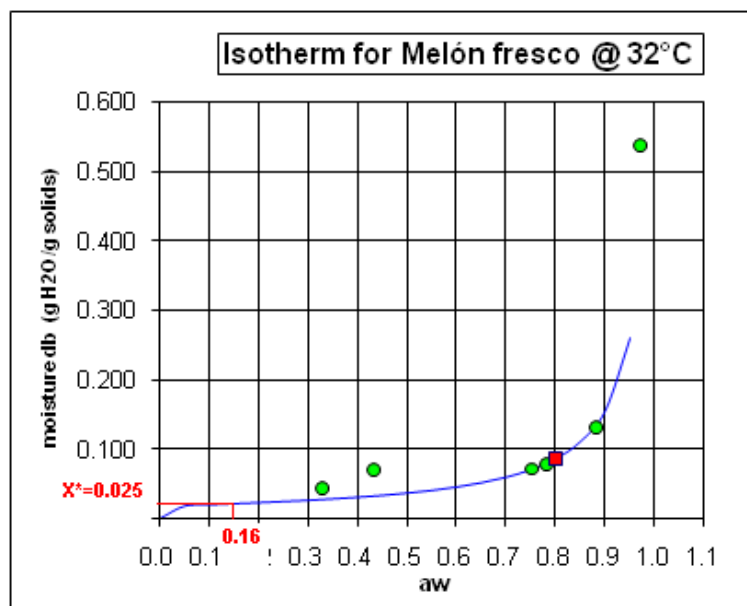
300		0.00			1.58	0.00
310		0.00			1.58	0.00
320		0.00			1.58	0.00

## APÉNDICE D

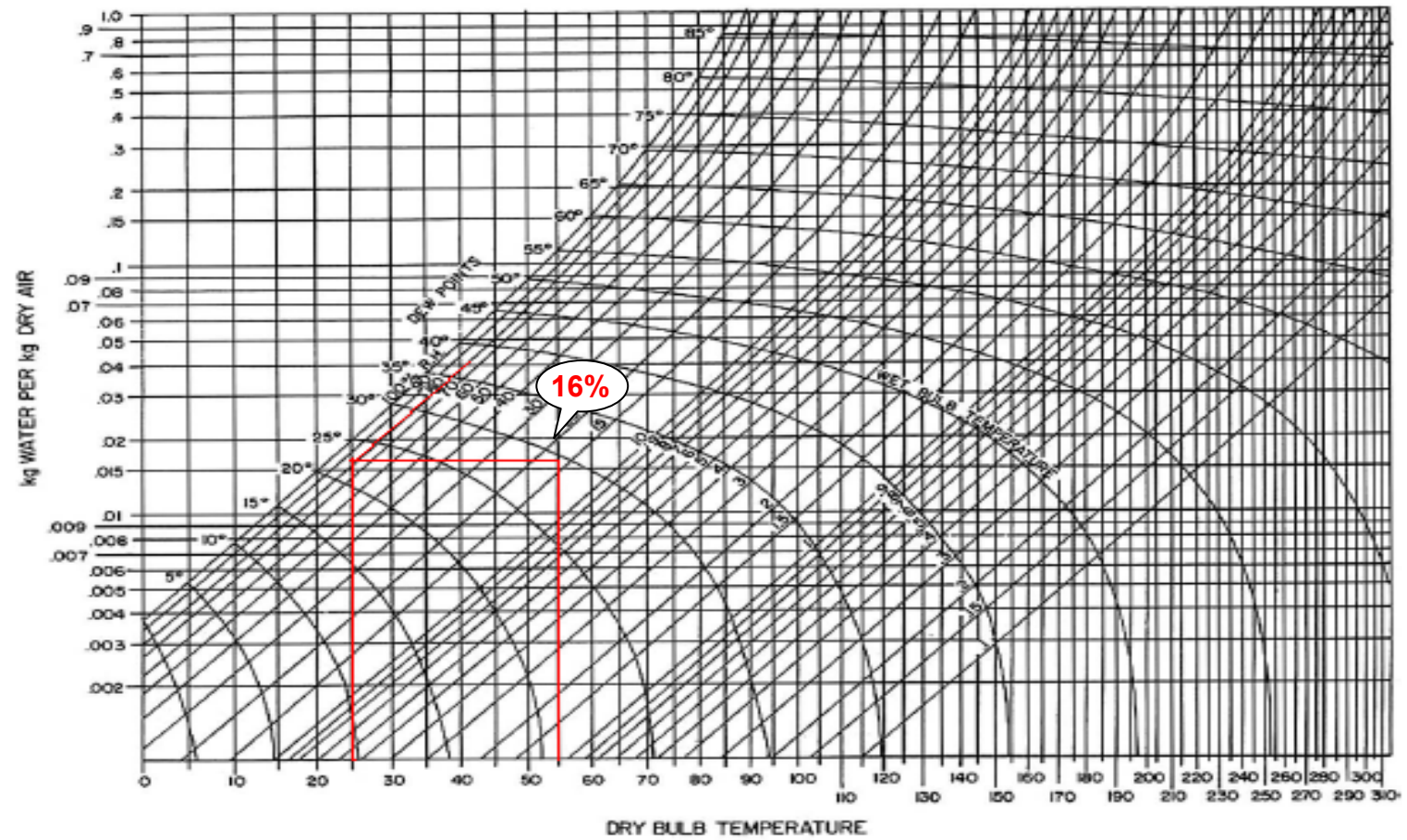
### DETERMINACIÓN DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO

#### CARTA PSICOMÉTRICA EN SISTEMA UNIDADES MÉTRICAS

°T ambiente	= 25.38 °C
Humedad Relativa Ambiente	= 81.3 %
°T de trabajo del Secador	= 55°C
Humedad Relativa Aire Caliente	= 16.0 %



## CARTA PSICOMÉTRICA



## APÉNDICE E

### CALCULO DE DIFUSIVIDAD

	CUBO			CILINDRO			ESFERA		
tiempo (min)	Humedad libre $X=X_t-X^*$ (KgH <sub>2</sub> O/Kgss )	$\frac{X-X^*}{X_o-X^*}$	$LN \frac{X-X^*}{X_o-X^*}$	Humedad libre $X=X_t-X^*$ (KgH <sub>2</sub> O/Kgss )	$\frac{X-X^*}{X_o-X^*}$	$LN \frac{X-X^*}{X_o-X^*}$	Humedad libre $X=X_t-X^*$ (KgH <sub>2</sub> O/Kgss )	$\frac{X-X^*}{X_o-X^*}$	$LN \frac{X-X^*}{X_o-X^*}$
0	21.20	1.00	0	21.20	1.00	0	21.20	1.00	0
0	18.14	0.86	-0.15611589	17.80	0.84	-0.17463143	18.53	0.87	-0.13481154
600	16.99	0.80	-0.22168309	15.84	0.75	-0.291719247	16.74	0.79	-0.2364813
1200	14.06	0.66	-0.41139457	14.19	0.67	-0.40219039	15.44	0.73	-0.317555
1800	12.76	0.60	-0.50840366	12.20	0.57	-0.553638409	14.18	0.67	-0.40240714
2400	11.14	0.53	-0.64412679	10.94	0.52	-0.662352415	12.28	0.58	-0.54668993
3000	10.15	0.48	-0.7372493	9.63	0.45	-0.7903297	11.60	0.55	-0.60408826
3600	9.33	0.44	-0.82169258	8.63	0.41	-0.899839563	10.71	0.50	-0.68377338
4200	8.04	0.38	-0.97129335	7.35	0.35	-1.060974725	9.72	0.46	-0.78068832
4800	7.56	0.36	-1.0331414	6.41	0.30	-1.198560555	8.88	0.42	-0.87141793
5400	6.09	0.29	-1.24990233	5.58	0.26	-1.337779326	8.18	0.39	-0.95428236
6000	5.44	0.26	-1.36427362	5.03	0.24	-1.442251403	7.45	0.35	-1.04820161
6600	4.95	0.23	-1.45864497	4.43	0.21	-1.569138816	6.90	0.32	-1.12513302
7200	4.14	0.19	-1.63746454	3.93	0.18	-1.690984248	6.40	0.30	-1.19981824

7800	3.82	0.18	-1.71808779	3.66	0.17	-1.763357402	6.00	0.28	-1.2650311
8400	3.01	0.14	-1.95790726	3.18	0.15	-1.903615728	5.50	0.26	-1.35285121
9000	2.53	0.12	-2.13440356	2.84	0.13	-2.017388274	5.10	0.24	-1.4274813
9600	2.36	0.11	-2.20397424	2.57	0.12	-2.119122801	4.60	0.22	-1.53162503
10200	2.36	0.11	-2.20397424	2.34	0.11	-2.212499982	4.2p0	0.20	-1.62369478
10800	1.71	0.08	-2.53106992	2.19	0.10	-2.280048064	4.02	0.19	-1.66870211
11400	1.71	0.08	-2.53106992	1.91	0.09	-2.417813776	3.65	0.17	-1.76450716
12000	1.56	0.07	-2.62713871	1.72	0.08	-2.527787037	3.42	0.16	-1.82987133
12600	1.39	0.06	-2.74367432	1.50	0.07	-2.661704924	3.17	0.15	-1.90816438
13200	1.23	0.06	-2.86392032	1.43	0.07	-2.714073917	2.84	0.13	-2.01879621
13800	1.14	0.05	-2.94158847	1.40	0.06	-2.73594946	2.71	0.13	-2.06562384
14400	0.89	0.04	-3.19773528	1.97	0.09	-2.388485686	2.53	0.12	-2.13289444
15000	0.66	0.03	-3.50918267				2.08	0.10	-2.33035211
15600	0.66	0.03	-3.50918267				2.28	0.11	-2.24095849
16200	0.66	0.03	-3.50918267				1.95	0.09	-2.39901909
16800	0.66	0.03	-3.50918267				1.58	0.07	-2.61300694
17400							1.58	0.07	-2.61037241
18000							1.58	0.07	-2.61037241
18600							1.58	0.07	-2.61037241

## **BIBLIOGRAFÍA.**

1. BARBOSA CÁNOVAS GUSTAVO V., VEGA-MERCADO HUMBERTO, Deshidratación de Alimentos. Editorial Acribia S.A.,2000.
2. BRENNAN JAMES G., Food Processing Handbook, Editorial Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
3. FENNEMA OWEN R., Food Chemistry, Tercera Edición, Editorial Marcel Dekker, 1996.
4. GEANKOPLIS C. J., Proceso de Transporte y Operaciones Unitarias, Compañía Editorial Continental S.A. México 1998, Tercera Edición.
5. MONTES MONTES EVERALDO JOAQUÍN, TORRES GALLO RAMIRO, ANDRADE PIZARRO RICARDO DAVID, PÉREZ SIERRA OMAR ANDRÉS, MARIMON ESCOBAR JOSÉ LUIS E MEZA HERAZO ISABEL INÉ, Modelado de la cinética de secado de ñame (*dioscorea rotundata*) en capa delgada, Revista Ingeniería e Investigación Vol. 28 No. 2, Agosto del 2008 (45-52).

6. MUJUMDAR ARUN S., Handbook of industrial drying. Editorial Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
7. PROGRAMA DE DESARROLLO AGRÍCOLA PENÍNSULA DE SANTA ELENA, Manual del Cultivo de Melón para exportación.
8. RODRIGUES SUELI, FERNANDES FABIANO A.N., Dehydration of melons in a ternary system followed by air-drying, Journal of Food Engineering. Formato html, Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com>
9. TOLEDO ROMEO T., Fundamentals of Food Process Engineering, Tercera Edición, Editorial Springer Science+Business Media, LLC, 2007.
10. TREYBAL ROBERT E., Operaciones de Transferencia de Masa, Segunda Edición, Editorial McGRAW-HILL.
11. WELTI-CHANES JORGE, VÉLEZ-RUIZ JORGE F., BARBOSA-CÁNOVAS GUSTAVO V., Engineering and food for the 21st century, Editorial CRC Press LLC, 2002.



12. WELTI-CHANES JORGE, JORGE VÉLEZ-RUIZ F., BARBOSA-CÁNOVAS GUSTAVO V., Transport phenomena in food processing, Editorial CRC Press LLC, 2003.
13. WILHELM L.R., SUTER D.A., BRUSEWITZ G.H., Food & Process Engineering Technology textbook, Editorial ERRATA,2005.