



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA**

**DESHIDRATADO DE TOMATE SALADETTE EN UN SECADOR DE  
CHAROLAS GIRATORIAS**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO EN ALIMENTOS**

**PRESENTA:  
MAYRA SOLEDAD GÓMEZ GÓMEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. RAÚL SALAS CORONADO**

**HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2009**

Este trabajo se realizó en las instalaciones del laboratorio de Ciencias Químico-Biológicas de la Universidad Tecnológica de la Mixteca

Parte de este trabajo se presentó en el 43° Congreso de Química, en el concurso Nacional de Carteles Estudiantiles (Nivel Licenciatura), organizado por la Sociedad Química de México, en Tijuana B. C., el 28 de Septiembre de 2008, obteniéndose mención honorífica.

Parte de este trabajo se presentó en el 9° Taller “Jóvenes en la Investigación Química” organizado por el departamento de Química del Cinvestav, en el Distrito Federal el 19 de Noviembre de 2008.

Dedico este trabajo a Dios por darme la dicha de contar con personas muy importantes y maravillosas en mi vida y por los logros obtenidos a lo largo de mi vida.

A mis padres Amanda y Aquí por su amor, apoyo incondicional, por ser mi ejemplo y guía y por estar conmigo en los momentos más felices y difíciles de mi vida.

A mis hermanas, a Norma por enseñarme que las cosas se pueden lograr con decisión y dedicación y a Lau por ser una gran amiga y por enseñarme a sonreír en momentos difíciles.

A mi sobrino Pepito por alegrarme los días con sus anécdotas y su cariño.

A mi abuelita Julia por su cariño y por ser una mujer extraordinaria. A mi abuelito Francisco por su apoyo y cariño.

A la Dra. Norma y al Dr. Raúl por su cariño, por brindarme sus conocimientos y por su apoyo para superarme profesionalmente.

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres por todo su apoyo a lo largo del transcurso de mi vida.

Al Dr. Raúl por su apoyo y orientación en la realización de la parte experimental y en la redacción del trabajo. A la Dra. Norma por su apoyo en el laboratorio y por enriquecer mi trabajo.

A mis maestros de la carrera por brindarme sus conocimientos y contribuir en mi formación profesional.

A mis amigos, a Fer por ser mi mejor amigo, por su cariño, por sus palabras de apoyo y por compartir momentos importantes. A Alemán, Ponzó y Cano por ser mis consejeros y amigos y por hacerme pasar momentos divertidos. A Willy, Jayro y Alba por formar parte importante de mi vida, por su amistad y cariño.

A Julio por los momentos maravillosos a su lado, por ser mi motivación, por su cariño, por estar a mi lado y escucharme en los momentos importantes de mi vida.

A Julio César y Juan Carlos por apoyarme en la mejora del secador de charolas, además de brindarme su amistad.

A Pavis, Fidel, Lucy, Diana y Gina por compartir información y fiestas.

A mis compañeras Yaya y Jesy por compartir experiencias a lo largo de la carrera.

Al Sr. Manuel de Jesús Martínez Ramírez por haberme apoyado con sus conocimientos sobre el cultivo de tomate y por proporcionarme los tomates empleados en el presente trabajo.

## RESUMEN

El tomate es la hortaliza que más se cultiva y consume en México. Este fruto tiene una capacidad antioxidante alta; sin embargo cuando se procesa, disminuye el contenido de antioxidantes, tales como el licopeno, ácido ascórbico y fenoles. A pesar de esto, el uso del tomate deshidratado cada vez es más común debido a que se puede utilizar en alimentos gourmet. Por tal motivo, en el presente estudio se realizó el deshidratado de tomate saladette en un secador de charolas diseñado y construido en la Universidad Tecnológica de la Mixteca. Las condiciones de secado empleadas fueron temperaturas de 45, 50 y 60 °C, con velocidades de aire de 0.6 y 1.2 m/s, con y sin rotación de charolas. Se utilizaron rebanadas de 6 mm de grosor, pretratadas con metabisulfito de sodio al 1%. Las curvas de secado obtenidas se analizaron en los períodos de velocidad constante y decreciente y se emplearon tres modelos matemáticos para predecir los tiempos de secado. A las rebanadas de tomate deshidratadas se les determinó el contenido de licopeno, ácido ascórbico, fenoles totales y color por métodos espectrofotométricos; así como la razón de rehidratación. Las mejores condiciones de secado fueron 60 °C, 0.6 m/s y rotación de charolas. Estas permitieron la menor degradación de licopeno (2.9%), ácido ascórbico (17.3%) y fenoles totales (2.1%). El análisis estadístico a un nivel de significancia del 5%, indicó que la rotación de charolas tiene una contribución sobre el color ( $a^*$ ), licopeno y ácido ascórbico.

# ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Hipótesis	3
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Importancia del estudio	4
1.4 Limitaciones del estudio	5
2. ANÁLISIS DE FUNDAMENTOS	6
2.1 Importancia del tomate	6
2.2 Indicadores de calidad en el tomate deshidratado	8
2.2.1 Color	8
2.2.1.1 Medición del color	8
2.2.1.2 El color en el tomate	9
2.2.2 Licopeno	10
2.2.3 Ácido ascórbico	11
2.2.4 Fenoles totales	12
2.3 Métodos empleados en el deshidratado de tomate	13
2.3.1 Deshidratado por aspersión	13
2.3.2 Deshidratado al sol	15
2.3.3 Deshidratado en un secador de túnel	17

2.3.4	Deshidratado en un secador de charolas estáticas	19
2.4	Factores que intervienen en el proceso de secado	23
2.4.1	Temperatura del aire	24
2.4.2	Humedad relativa del aire	24
2.4.3	Velocidad del aire	25
2.4.4	El agua en los alimentos	26
2.4.5	Pretratamientos	26
2.5	Curvas de secado	27
2.6	Modelos matemáticos	28
3.	METODOLOGÍA	30
3.1	Procedimiento general	30
3.2	Descripción del secador de charolas giratorias	31
3.3	Materiales, equipo y reactivos	32
3.4	Obtención del tomate	33
3.5	Selección y preparación del tomate	33
3.6	Determinación de humedad	33
3.7	Pretratamiento de las rebanadas de tomate	34
3.8	Curvas de secado	34
3.9	Deshidratado de tomate	36
3.10	Cuantificación de licopeno	36
3.11	Cuantificación de ácido ascórbico	36
3.12	Cuantificación de fenoles totales	37
3.13	Determinación de color	38
3.14	Razón de rehidratación	38
3.15	Análisis estadístico	39
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	40
4.1	Características del secado	40
4.2	Modelos matemáticos	43
4.3	Velocidad de secado	47
4.3.1	Evaluación del período de velocidad constante	47
4.3.2	Evaluación del período de velocidad decreciente	49



4.4 Color	53
4.5 Licopeno	55
4.6 Ácido ascórbico	56
4.7 Fenoles totales	58
4.8 Razón de rehidratación	60
4.9 Análisis PLS para las correlaciones lineales entre variables físicas, químicas y termodinámicas.	62
5. CONCLUSIONES	64
6. PERSPECTIVAS	65
7. BIBLIOGRAFÍA	66
8. APÉNDICES	70
9. ANEXOS	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b> Tomate ( <i>Lycopersicon esculentum</i> ).	6
<b>Figura 2.</b> Modelo de color CIE L*a*b*.	8
<b>Figura 3.</b> Estructura del licopeno.	10
<b>Figura 4.</b> Efecto del calentamiento sobre la degradación de licopeno (Shi <i>et al.</i> , 2000).	11
<b>Figura 5.</b> Curvas de degradación de ácido ascórbico en mitades de tomate (Marfil <i>et al.</i> , 2008).	12
<b>Figura 6.</b> Concentración de algunos fenoles en tomate Sorrento (Re <i>et al.</i> , 2002).	13
<b>Figura 7.</b> Representación esquemática de un secador por aspersion (Goula <i>et al.</i> , 2005).	14
<b>Figura 8.</b> Deshidratado de tomate en un secador solar de charolas (Rajkumar <i>et al.</i> , 2007).	16
<b>Figura 9.</b> Contenido de ácido ascórbico en tomate deshidratado en un secador solar de charolas (Rajkumar <i>et al.</i> , 2007).	17
<b>Figura 10.</b> Representación esquemática de un secador de túnel de flujo de aire a contracorriente.	18
<b>Figura 11.</b> Secador de charolas.	19
<b>Figura 12.</b> Curva de secado de mitades de tomate deshidratado en un secador de charolas estáticas (Zanoni <i>et al.</i> , 2000).	21
<b>Figura 13.</b> Contenido de ácido ascórbico, fenoles totales y licopeno en tres cultivos de Nueva Zelanda (Kerkhofs <i>et al.</i> , 2005).	22
<b>Figura 14.</b> Capacidad de rehidratación de tomate deshidratado sin pretratamiento (NAT) y pretratado con oleato de etilo alcalino (AEEO) (Doymaz, 2007).	23
<b>Figura 15.</b> Cinética de secado de tomate con diferentes porcentajes de humedad relativa (Krokida <i>et al.</i> , 2003).	25

<b>Figura 16.</b>	Curva de velocidad de secado.	27
<b>Figura 17.</b>	Diagrama general de trabajo.	30
<b>Figura 18.</b>	Secador de charolas giratorias.	31
<b>Figura 19.</b>	Actuadores presentes en el secador de charolas giratorias (resistencias, ventilador y motor).	32
<b>Figura 20.</b>	Curva de secado de tomate saladette.	41
<b>Figura 21.</b>	Efecto de la posición de las charolas en la cámara de secado sobre el contenido de agua en tomate saladette deshidratado.	42
<b>Figura 22.</b>	Relación de MR vs tiempo de datos experimentales y obtenidos de los modelos de Henderson & Pabis, Page y Wang & Singh en rebanadas de tomate deshidratado.	43
<b>Figura 23.</b>	Curva de velocidad de secado a 45 °C, 0.6 m/s y rotación de charolas.	47
<b>Figura 24.</b>	Isotermas de secado en el período de velocidad constante.	48
<b>Figura 25.</b>	Gráfica de ln (MR) en función del tiempo de secado a 60 °C, 1.2 m/s y 20 rpm.	50
<b>Figura 26.</b>	Relación de Arrhenius entre la difusividad efectiva y el recíproco de la temperatura absoluta.	52
<b>Figura 27.</b>	Rebanadas de tomate saladette deshidratado a 60 °C, 0.6 m/s y 20 rpm.	54
<b>Figura 28.</b>	Concentración de licopeno en rebanadas de tomate saladette deshidratado.	55
<b>Figura 29.</b>	Concentración de ácido ascórbico en rebanadas de tomate saladette deshidratado.	57
<b>Figura 30.</b>	Concentración de fenoles totales en rebanadas de tomate saladette deshidratado.	59
<b>Figura 31.</b>	Razón de rehidratación en rebanadas de tomate saladette deshidratado.	61

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
<b>Tabla 1.</b> Principales regiones productoras de tomate en el estado de Oaxaca.	3
<b>Tabla 2.</b> Valores de ángulo de matiz (h), cromaticidad (C) y luminosidad (L*) en polvo de tomate rehidratado (Candelas-Cadillo <i>et al.</i> , 2005).	15
<b>Tabla 3.</b> Valores de color en tomate deshidratado en un secador solar de charolas (Rajkumar, 2007).	16
<b>Tabla 4.</b> Clasificación de tomate deshidratado basado en valores de cromaticidad (Unadi <i>et al.</i> , 2002).	19
<b>Tabla 5.</b> Coordenadas cromáticas del sistema CIE L*a*b* para tomate de tres cultivos de Nueva Zelanda, deshidratados en un secador de charolas (Kerkhofs <i>et al.</i> , 2005).	21
<b>Tabla 6.</b> Modelos matemáticos para predecir curvas de secado.	29
<b>Tabla 7.</b> Condiciones de temperatura, velocidad de aire y rotación de charolas para el deshidratado de tomate.	34
<b>Tabla 8.</b> Clasificación de las variables de respuesta.	39
<b>Tabla 9.</b> Análisis de varianza de los tiempos de secado a las diferentes condiciones.	42
<b>Tabla 10.</b> Parámetros de los modelos matemáticos empleados para el deshidratado de tomate.	45
<b>Tabla 11.</b> Análisis de varianza de la constante de velocidad (k) del modelo de Page.	46
<b>Tabla 12.</b> Análisis de varianza de las velocidades en el período constante (R <sub>c</sub> ).	49
<b>Tabla 13.</b> Valores de D <sub>eff</sub> para el tomate deshidratado.	51
<b>Tabla 14.</b> Valores de E <sub>a</sub> para el tomate deshidratado.	52
<b>Tabla 15.</b> Valores de color para rebanadas de tomate deshidratado.	53

<b>Tabla 16.</b> Análisis de varianza del valor de $a^*$ .	54
<b>Tabla 17.</b> Análisis de varianza del contenido de licopeno en rebanadas de tomate deshidratado.	56
<b>Tabla 18.</b> Análisis de varianza del contenido de ácido ascórbico en rebanadas de tomate deshidratado.	58
<b>Tabla 19.</b> Análisis de varianza del contenido de fenoles totales en rebanadas de tomate deshidratado.	60
<b>Tabla 20.</b> Análisis de varianza de la razón de rehidratación en rebanadas de tomate deshidratado.	61
<b>Tabla 21.</b> Análisis de PLS de las variables químicas vs físicas.	62
<b>Tabla 22.</b> Análisis de PLS de las variables termodinámicas vs físicas.	62
<b>Tabla 23.</b> Análisis de PLS de las variables termodinámicas vs químicas.	63
<b>Tabla 24.</b> Análisis de PLS de las variables estudiadas vs tiempo.	63

## LISTA DE ABREVIATURAS

$E_a$	Energía de activación (kJ/mol)
H	Tono (°)
$L^*$	Luminosidad
C	Saturación
$a^*$	Valores positivos (rojo) y valores negativos (verde)
$b^*$	Valores positivos (amarillo) y valores negativos (azul)
$T_g$	Temperatura de transición vítrea
$M_e$	Contenido de humedad en equilibrio (kg de agua/kg de sólido seco)
$M_t$	Contenido de humedad en cualquier tiempo (kg de agua/kg de sólido seco)
$X_t$	Humedad al tiempo t (kg de agua/kg de sólido seco)
W	Peso del sólido húmedo (kg totales de agua)
$W_s$	Peso del sólido seco (kg de sólido seco)
X	Humedad libre (kg de agua libre/kg de sólido seco)
$X^*$	Humedad en equilibrio (kg de sólido seco)
R	Velocidad de secado (kg de agua/h m <sup>2</sup> )
$R_c$	Velocidad de secado en el período constante (kg de agua/h m <sup>2</sup> )
$L_s$	Peso del sólido seco (kg de sólido seco)
A	Área superficial expuesta (m <sup>2</sup> )
$M_o$	Contenido de humedad inicial (kg de agua/kg de sólido seco)
MR	Razón de humedad
$X_c$	Contenido de humedad en el período de velocidad constante (kg de agua/kg de sólido seco)
$t_c$	Tiempo en el período de velocidad constante
$T_{abs}$	Temperatura absoluta (K)
$D_{eff}$	Difusividad efectiva (m <sup>2</sup> /s)
$D_o$	Constante equivalente a la difusividad a temperaturas infinitamente altas (m <sup>2</sup> /s)
PLS	Mínimos cuadrados parciales (del inglés Partial Least Square)
TS	Tomate seco
CIE	Comisión Internacional de Iluminación

# 1. INTRODUCCIÓN

---

Las frutas y hortalizas juegan un papel muy importante para el hombre ya que contienen vitaminas, minerales, antioxidantes, fibra y carbohidratos esenciales para su alimentación. Sin embargo no se encuentran disponibles durante todo el año, ni en todas las regiones. Por lo que se han buscado métodos que permitan conservar sus nutrientes, así como sus propiedades, para poder tenerlos disponibles permanentemente. Uno de los métodos que se ha aplicado al tomate es el deshidratado.

El deshidratado de frutas y hortalizas es uno de los métodos más antiguos y más empleados para su conservación. El deshidratado consiste en la extracción del agua contenida en los alimentos por medios físicos hasta que el nivel de agua sea adecuada para su conservación por largos periodos, el nivel de agua se reduce por debajo del 10%. Con el deshidratado se aumenta la vida de anaquel de los alimentos mediante la reducción de la actividad de agua, lo que inhibe el crecimiento microbiano y la actividad de las enzimas. La reducción del peso y volumen en el secado también reduce los costos de transporte y almacenamiento (Sharma, 2003).

El deshidratado de frutas y hortalizas se realiza empleando diferentes procesos. El tipo de proceso depende del tipo de alimento y de las características finales del producto:

- Liofilización, consiste en congelar el alimento y una vez congelado se introduce en una cámara de vacío para que se evapore el agua por sublimación. Se emplea para obtener productos secos de alta calidad, pero con un alto costo.
- Deshidratación osmótica, es un proceso de eliminación de agua basado en el gradiente de agua y actividad de solubilidad a través de una membrana semipermeable de una célula. Implica sumergir el alimento de humedad alta en una solución osmótica, generalmente de azúcar o de NaCl.

- Secado al sol, se limita a climas calurosos y humedades relativas bajas (40-60%) con vientos fuertes. Generalmente se aplica a frutas y semillas, aunque también es frecuente para algunas hortalizas como los pimientos y tomates.
- Deshidratación atmosférica, consiste en pasar aire caliente sobre el alimento a secar.

El secado industrial se lleva a cabo con el último método en lotes o en procesos continuos. Los procesos continuos incluyen el secador de túnel, el secador rotatorio, secadores de tambor, el secador de charolas, entre otros. Por otra parte el secado industrial a temperaturas superiores a los 90 °C, ocasiona pérdidas de calidad con respecto al color, sabor, nutrientes y puede llegar a formar costras en el producto, impidiendo que se seque la parte interior de este (Andritsos *et al.*, 2003).

El secador de charolas es uno de los equipos más empleados a nivel planta piloto. En la Universidad Tecnológica de la Mixteca se construyó un secador de charolas giratorias, el cual opera de forma automática a las siguientes condiciones: temperatura de 20 a 60 °C, velocidad de aire de 0 a 1.2 m/s y rotación de charolas a 20 rpm. Las condiciones de temperatura y velocidad de aire son estables porque tiene un sistema electrónico que los controla (Pérez *et al.*, 2006). Sin embargo no se había realizado un análisis comparativo para observar si existen diferencias entre el sistema bajo condiciones estáticas y al rotar las charolas.

En el presente trabajo, el secador antes mencionado se evaluó bajo condiciones estáticas y con la incorporación de rotación de charolas, utilizando para ello tomate saladette cultivado en invernadero. Se seleccionó tomate, debido a que la temperatura de secado en un secador de charolas no debe ser mayor a 60 °C. Se ha reportado que secados de tomate a temperaturas superiores a 60 °C afectan de manera significativa la calidad del producto final (Kerkhofs *et al.*, 2005).

En el estado de Oaxaca se producen 7,363.34 toneladas (SAGARPA, 2005) de tomate saladette con la finalidad de abastecer el consumo interno. Debido a las condiciones de clima y suelos del estado de Oaxaca, el tomate se produce en invernaderos. En la Tabla 1 se observan las principales regiones productoras de tomate (Agroproduce, 2005). La producción de tomate, cubre parte de la demanda; sin embargo el número de productores crece de manera importante con lo cual existe el riesgo de que el mercado se sature, surgiendo la necesidad de buscar otra forma de comercializar el tomate.



**Tabla 1.** Principales regiones productoras de tomate en el estado de Oaxaca.

<b>Región</b>	<b>Municipios</b>
Mixteca	Huajuapán de León
Istmo	Yautepec y Lagunas
Valles Centrales	Etla, Ocotlán, Ejutla, Tlacolula, Zimatlán, Ixtlahuaca
Cañada	Cuicatlán, los Cués, Tecmavaca, Teotitlán, Guelatao, Ixtlán
Costa	Pinotepa, Chila, Huatulco, Pochutla

## 1.1 Hipótesis

La incorporación de un sistema de rotación de charolas en un secador, permite obtener tomate deshidratado homogéneo y con menor degradación de licopeno, ácido ascórbico, fenoles totales; así como un mejor color y capacidad de rehidratación que en un sistema sin rotación de charolas.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Determinar el efecto de la rotación de charolas en el deshidratado de rebanadas de tomate saladette de 6 mm de grosor pretratadas con metabisulfito de sodio al 1 %, empleando un secador de charolas giratorias.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para el presente estudio se propusieron los objetivos siguientes:

- Deshidratar el tomate pretratado a diferentes condiciones de temperatura, velocidad de aire, con y sin rotación de charolas.
- Evaluar el contenido de licopeno, ácido ascórbico, fenoles totales y color por métodos espectrofotométricos, así como la capacidad de rehidratación en las rebanadas de tomate

deshidratadas.

- Modelar las curvas de secado experimentales empleando la ecuación de Lewis.
- Determinar la contribución de la rotación de charolas sobre el proceso de secado.
- Determinar si existe diferencia significativa, en el contenido de licopeno, ácido ascórbico, fenoles totales, color y capacidad de rehidratación entre las muestras de tomate deshidratado a las diferentes condiciones utilizadas.

## 1.2 Importancia del estudio

El deshidratado de tomate se ha realizado usando diferentes métodos de secado al sol, secado por aspersión y secado en túnel, entre otros.

Los métodos anteriormente mencionados proporcionan algunas desventajas. El secado al sol sólo es posible llevarlo a cabo en climas calurosos, además se requieren largos períodos de secado, lo cual provoca colores oscuros en el producto final (Andritsos, *et al.*, 2003). En el secado por aspersión se ha observado que el tomate es difícil de secar debido a la elevada cantidad de azúcares presentes en el fruto, además de que los rendimientos que se obtienen son muy bajos (Goula *et al.*, 2004). Para mejorar los rendimientos, se utilizan maltodextrinas como coadyuvantes; sin embargo el color del polvo rehidratado se ve afectado por la concentración de maltodextrinas (Candelas-Cadillo *et al.*, 2005). En el secado de tomate en un secador de túnel, no es posible tener deshidratados uniformes a lo largo del secador y los costos energéticos son elevados comparados con los precios de venta (Unadi *et al.*, 2002).

El secado en secador de charolas es el método más empleado. Además, las condiciones de operación a las que trabaja el secador de charolas giratorias son apropiadas para el deshidratado de tomate, así como para conservar su valor nutritivo. Asimismo, se ha observado que en el secado en charolas estáticas las charolas se tienen que rotar manualmente para obtener un producto homogéneo (Sinhg *et al.*, 1998, véase Pérez *et al.*, 2006).

### 1.3 Limitaciones del estudio

El contenido de licopeno, ácido ascórbico y fenoles totales en el tomate puede variar con el tipo de muestra, debido a que estos dependen de la variedad, estado de madurez, condiciones de cultivo entre otros. Por lo tanto, la selección del tomate se realizó empleando muestras provenientes del mismo invernadero, con la finalidad de tener un producto de la misma variedad y con las mismas condiciones de cultivo. Los tomates utilizados para el deshidratado se seleccionaron de acuerdo a una escala de color, establecida por la USDA (1997).

Durante el proceso de secado se consideraron factores como la temperatura del aire, velocidad del aire, el contenido de humedad en el tomate; sin embargo no se tuvo un control riguroso sobre la humedad relativa del aire debido a que las humedades relativas promedio de la región son bajas. Un estudio realizado por Krokida *et al.*, en el 2003 mostró que para el tomate deshidratado, la humedad relativa en un intervalo de 20 a 40% no afecta significativamente los tiempos de secado.

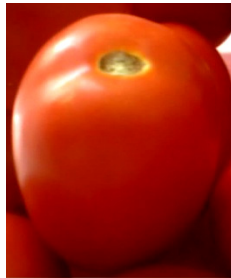
## 2. ANÁLISIS DE FUNDAMENTOS

---

En el siguiente capítulo se hablará de la importancia del tomate, los indicadores de calidad en el tomate deshidratado, los métodos que se han empleado para el deshidratado de tomate, así como las ventajas y desventajas que se presentan con cada uno de ellos. Así como de los factores que intervienen en el proceso de secado con aire.

### 2.1 Importancia del tomate

El tomate (Figura 1), es la hortaliza más importante en numerosos países, entre ellos México, y su popularidad aumenta constantemente.



**Figura 1.** Tomate (*Lycopersicon esculentum*).

Las características más apreciadas en el tomate para el consumo en fresco son su color y sabor. El color en los tomates, está dado principalmente por los carotenoides, siendo el licopeno el que se encuentra en mayor cantidad; mientras que el sabor es proporcionado por los azúcares y los compuestos volátiles.

La fracción de compuestos volátiles le confiere al tomate las propiedades sensoriales, sabor y aroma. Esta fracción está constituida por más de 400 sustancias, entre las cuales se encuentran hidrocarburos, éteres, fenoles, cetonas, aldehídos, ésteres y lactonas. De esos compuestos 30 juegan un papel importante; adicionalmente se ha observado que su

componente principal, el volátil (Z)-hex-3-enal, se encuentra en una concentración del 31% (Saltveit *et al.*, 1999; véase Gómez *et al.*, 2002). Por ello es importante que al llevar a cabo un tratamiento térmico en el tomate se tomen en cuenta las condiciones de operación, tales como las temperaturas, aditivos y exposición al aire. Esto último cuando el tomate se deshidrate en sistemas que operen con flujos de aire forzado.

En cuanto al sabor son importantes los azúcares, que constituyen aproximadamente el 60% de los sólidos solubles (predominan glucosa y fructosa), el contenido de azúcares experimenta un crecimiento brusco cuando el fruto alcanza un color amarillento y aumenta paulatinamente durante la maduración (Perry *et al.*, 1998; véase Gómez *et al.*, 2002). Al realizar un tratamiento térmico, la presencia de los azúcares favorece reacciones de Maillard. Estas reacciones inducen el pardeamiento del producto.

En los últimos años el interés por los productos derivados del tomate, ha cobrado importancia debido a su actividad antioxidante. El tomate no sólo contiene antioxidantes nutritivos como las vitaminas A, C y E; contiene también una gran cantidad de antioxidantes no nutritivos como betacarotenos, carotenoides (licopeno, principalmente), flavonoides, flavonas y ácidos fenólicos (Chang *et al.*, 2006). El licopeno constituye aproximadamente el 83% de todos los pigmentos presentes en el tomate, siendo el fruto que tiene los niveles más altos de dicho compuesto. Los tomates y sus productos son las principales fuentes de licopeno en la dieta de las personas. La degradación del licopeno no sólo afecta el color del producto final, sino también su valor nutritivo. Estudios han demostrado que el licopeno protege contra cáncer de próstata, de mama, arteriosclerosis, reduce la oxidación de proteínas de alta densidad y ayuda a disminuir los niveles de colesterol en la sangre (Xianquan *et al.*, 2005; Kerkhofs *et al.*, 2005).

Los tomates proporcionan potasio, hierro, fósforo, algunas vitaminas del complejo B y son una buena fuente de fibra. Contienen alrededor de un 90% de agua, lo que los hace altamente perecederos. La composición depende de la variedad, etapa de madurez, condiciones de cultivo: clima, luz, temperatura, tierra y fertilización, así como su manejo y almacenamiento (Yilmaz, 2001)

El color, licopeno, ácido ascórbico y fenoles totales están íntimamente relacionados con la calidad del tomate, y son considerados indicadores de calidad. Cuando se lleva a cabo el procesamiento térmico del tomate estos componentes se ven afectados, modificando

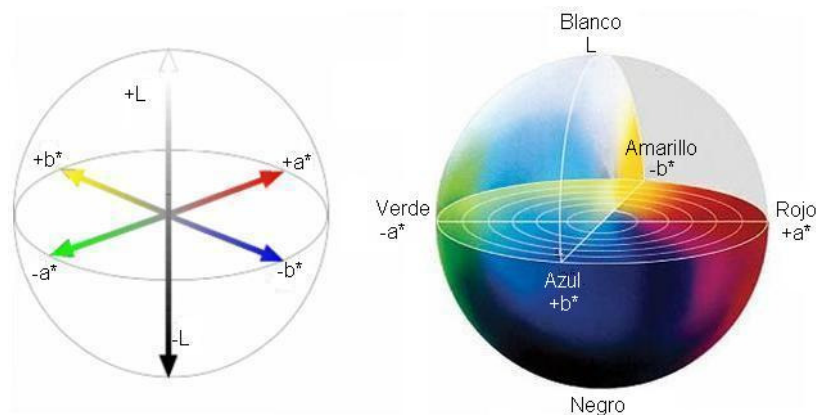
consecuentemente su calidad, valor nutritivo y comercial. Por lo tanto, se vuelve importante que al procesar este alimento, se tome en cuenta la conservación o disminución de las pérdidas de estos compuestos.

## 2.2 Indicadores de calidad en el tomate deshidratado

La calidad del tomate deshidratado depende de varios factores, se consideran como factores importantes el color (cromaticidad) y la uniformidad del contenido de humedad (kg/kg en base seca) (Unadi *et al.*, 2002). También, se considera importante el contenido de licopeno, ácido ascórbico y fenoles totales, los cuales le confieren su capacidad antioxidante y consecuentemente muchas de sus propiedades funcionales.

**2.2.1 Color.** El color es una sensación que es percibida por los órganos visuales; se produce por los rayos luminosos y depende de su longitud de onda (380 a 770 nm) y de las características del órgano receptor (Otha, 2005).

**2.2.1.1 Medición del color.** En 1976 la CIE (Comisión Internacional de Iluminación) creó el modelo de color  $L^*a^*b^*$ . Es el modelo de color actual más completo y se usa para describir todos los colores que el ojo humano puede ver. Este se fundamenta en el espacio de color CIE  $L^*a^*b^*$  que proporciona una representación tridimensional útil de los estímulos perceptibles del color, Figura 2.



**Figura 2.** Modelo de color CIE  $L^*a^*b^*$ .

Desde el punto de vista sensorial se pueden distinguir las siguientes características del color:

- Tono (h): determinado por el valor exacto de la longitud de onda de la luz reflejada (rojo, azul, amarillo), Ecuación 1.
- Luminosidad (L\*): depende de la cantidad de luz que es reflejada por el objeto.
- Saturación (C): depende de la concentración de los colorantes o pigmentos, Ecuación 2.

$$h = \tan^{-1} \left( \frac{b^*}{a^*} \right) \quad (1)$$

$$C = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2)$$

**2.2.1.2 El color en el tomate.** Es una característica de calidad extremadamente importante, ya que no sólo determina la madurez y vida *post* cosecha, también es un factor determinante para la aceptabilidad del consumidor. El color en los tomates se debe a la presencia de carotenoides, el licopeno es el principal carotenoide.

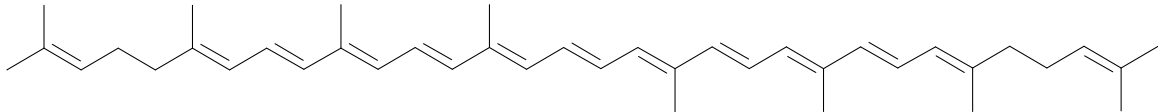
El deshidratado de tomate, ocasiona cambios de color en el producto final. Estos cambios de color son una combinación del oscurecimiento no enzimático, reacciones de Maillard, y de la degradación de licopeno (Kerkhofs *et al.*, 2005).

El oscurecimiento de los pigmentos como la reacción de Maillard, caramelización de azúcares, depende de la cantidad de azúcar y amino ácidos presentes, así como del pH, tiempo y temperatura del procesamiento (Hayes *et al.*, 1998).

En 1990 Olorunda *et al.*, reportaron que un incremento en el tiempo de secado y de la temperatura provoca un oscurecimiento en el tejido, mientras otros estudios muestran un incremento en la luminosidad (L\*) y una disminución en el color rojo (a\*/b\*) después del secado con aire.

Arias *et al.*, en el 2000 demostraron que el contenido de licopeno está correlacionado con el color del fruto. El incremento del valor de a\* está asociado directamente con el contenido de licopeno.

**2.2.2 Licopeno.** El licopeno es un carotenoide importante para el ser humano debido a que se deposita en el hígado, pulmón, próstata, colon y piel, su concentración en el cuerpo es más alta que la de cualquier otro carotenoide. Los dobles enlaces conjugados presentes en la estructura, Figura 3, de este compuesto facilitan la inactivación de radicales libres, favoreciendo su actividad anticancerígena y antiarteriosclerótica (Xianquan *et al.*, 2005).



**Figura 3.** Estructura del licopeno.

En variedades comunes de tomate, la concentración de licopeno es de 3 a 12.2 mg/100 g de fruta madura (Arias *et al.*, 2000; Martínez-Valverde *et al.*, 2002; Tonucci *et al.*, 1995; Khachik *et al.*, 1992; véase Candelas-Cadillo *et al.*, 2005).

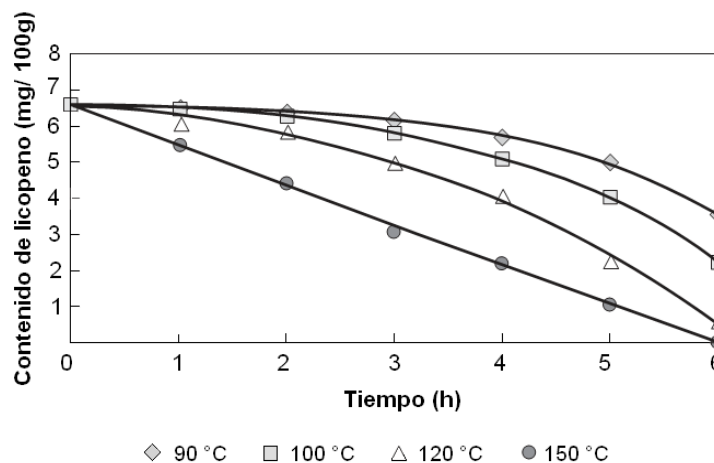
Los carotenoides presentes en tomates, están sujetos a degradación durante el procesamiento. Las principales causas de oxidación en el tomate dependen de (Hayes, 1998):

- Disponibilidad del oxígeno.
- La baja actividad de agua.
- Temperaturas altas.
- La desestabilización de iones metálicos presentes, como el cobre y el hierro.
- La estabilidad de antioxidantes y lípidos presentes.

El calor, la luz, el oxígeno, y diversas matrices del alimento son los factores que tienen un efecto significativo en la isomerización y auto oxidación del licopeno.

Shi *et al.*, en el 2000 sometieron el puré de tomate a un tratamiento térmico a 90, 110, 120 y 150 °C de una a seis horas. Los resultados muestran que la concentración de licopeno disminuye gradualmente con el tratamiento, a temperaturas más altas la degradación es más rápida, Figura 4.





**Figura 4.** Efecto del calentamiento sobre la degradación de licopeno (Shi *et al.*, 2000).

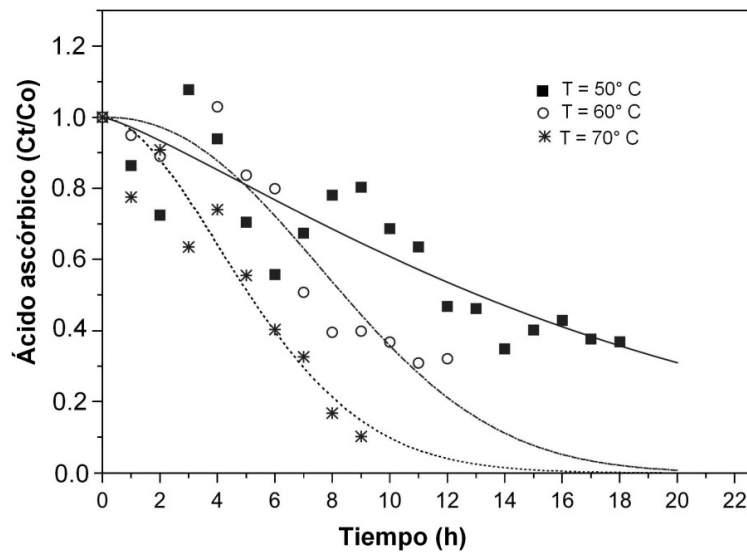
Otro estudio para observar la degradación de licopeno fue el realizado por Lee y Chen en el 2002, quienes estudiaron la estabilidad del compuesto y observaron que a una temperatura de 50 °C en las primeras 12 horas no había cambios en el contenido de licopeno; después de 12 horas se observaba una disminución del mismo. A 100 °C el contenido de licopeno disminuye en un 78% después de 120 minutos de calentamiento. Cuando el licopeno se calienta a 150 °C no se detecta después de 10 minutos. Temperaturas mayores a 100 °C y tiempos prolongados de calentamiento provocan una disminución en el contenido de licopeno.

**2.2.3 Ácido ascórbico.** La actividad antioxidante del licopeno resulta importante en el tomate, debido a sus beneficios a la salud. Pero se ha observado que si el ácido ascórbico se retiene durante el proceso, otros nutrientes también son retenidos en el producto (Marfil *et al.*, 2008). Consecuentemente el ácido ascórbico puede ser tomado como un indicador de la calidad de los nutrientes en alimentos.

El ácido ascórbico es una vitamina lábil que pierde su actividad por varios factores, como el pH, contenido de humedad, oxígeno, temperatura y catálisis de iones metálicos. En el proceso de secado, las pérdidas de ácido ascórbico se deben principalmente a las temperaturas altas (Zanoni *et al.*, 1999).

En el 2008 Marfil *et al.*, realizaron cinéticas de degradación de ácido ascórbico en mitades de

tomates sin semillas y sin parénquima, se deshidrataron a 50, 60 y 70 °C. Se observó una velocidad de degradación rápida en el contenido de ácido ascórbico dependiente de la temperatura, Figura 5. El tiempo es otro factor importante para la degradación del ácido ascórbico ya que en las primeras horas no se observa una disminución importante. El empleo de tiempos cortos y temperaturas bajas para el procesado de tomate pueden ayudar a retener está vitamina.

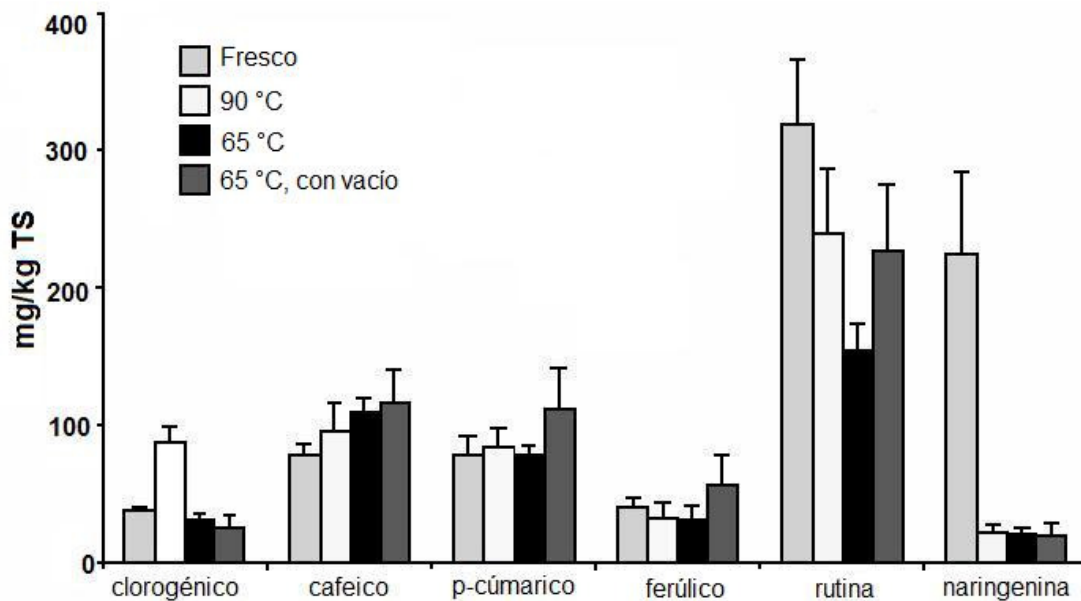


**Figura 5.** Curvas de degradación de ácido ascórbico en mitades de tomate (Marfil *et al.*, 2008).

**2.2.4 Fenoles totales.** Los compuestos fenólicos, como fenoles simples, flavonoides y ácidos fenólicos son un amplio grupo de metabolitos secundarios de las plantas y son importantes en la dieta humana. Estudios epidemiológicos han demostrado que los compuestos fenólicos poseen atributos benéficos a la salud como anticarcinogénicos, antioxidantes potenciales, antivirales, antimicrobianos y antimutagénicos (Lule *et al.*, 2005). El tomate posee una cantidad importante de compuestos fenólicos; sin embargo al someterse a un proceso térmico se han observado cambios en su concentración (Re *et al.*, 2002).

En el 2002 Re *et al.*, evaporaron jugo de tomate Sorrento a 90 y 65 °C sin vacío y 65 °C con vacío. Cuantificaron fenoles presentes en tomate y encontraron que la naringenina es el compuesto que se ve más afectado al someter el tomate a un tratamiento térmico, la cual disminuye alrededor del 90%. El ácido clorogénico incrementa su concentración cuando el

jugo de tomate se evapora a 90 °C, los autores sugieren que este incremento se debe a la disponibilidad de este compuesto al someterse a un tratamiento térmico, Figura 6.

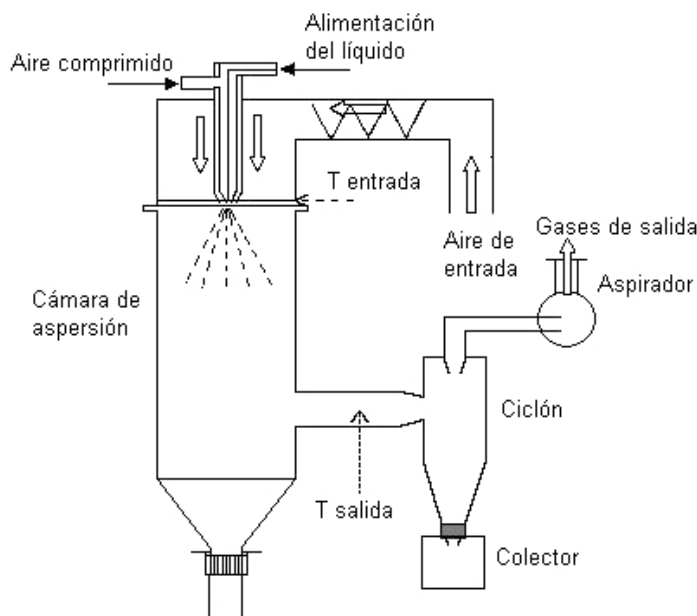


**Figura 6.** Concentración de algunos fenoles en tomate Sorrento (Re *et al.*, 2002).

## 2.3 Métodos de secado empleados para el deshidratado de tomate

Actualmente, existe una infinidad de métodos para el procesamiento de tomate. Entre ellos se pueden contar la extracción de jugos, obtención de pastas, tomate en polvo y el tomate deshidratado. Dentro de este último, hay diferentes métodos, entre los cuales se encuentran el secado al sol, por aspersion, osmótico, en túnel y en charolas. A continuación se llevará a cabo una breve descripción.

**2.3.1 Deshidratado por aspersion.** En el secado por aspersion, un líquido o suspensión se atomiza en una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se evapora de dichas gotas con rapidez, y se obtienen partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas, Figura 7. El flujo del líquido y del gas a la cámara de aspersion puede ser a contracorriente, en paralelo o una combinación de ambos.



**Figura 7.** Representación esquemática de un secador por aspersión (Goula *et al.*, 2005).

En la obtención de tomate en polvo se emplean temperaturas entre 120-220 °C (Candelas-Cadillo, 2005). El secado por aspersión es un proceso rápido, por lo que se generan productos amorfos, los sólidos amorfos son termoplásticos y muy higroscópicos. El tomate y sus derivados son productos ricos en azúcares, por lo cual al llevarse el proceso de secado por aspersión el producto se vuelve termoplástico e higroscópico, y esto favorece el pegado del producto en las paredes del secador, disminuyendo los rendimientos finales (Goula *et al.*, 2005).

La adherencia en las paredes de la cámara es un efecto conocido en el secado por aspersión en soluciones que tienen azúcares de peso molecular bajo y principalmente aquellos que tienen azúcares con una temperatura baja de transición vítrea ( $T_g$ ), (Goula *et al.*, 2004). Los azúcares encontrados en los productos del tomate son principalmente glucosa y fructosa con una  $T_g$  de 31 y 5 °C respectivamente (Bhandari *et al.*, 1997, véase Goula *et al.*, 2005)

En el 2003, Goula *et al.*, encontraron que aproximadamente del 12-17% el producto deshidratado se pierde en la salida de aire. La acumulación de los residuos fue significativa (60-71% de la masa sólida) debido a la tendencia del producto a pegarse a la superficie interna de la cámara de secado y el ciclón. Por tal motivo se recomienda el uso de maltodextrinas de 10 a 15 equivalentes de glucosa (Candelas-Cadillo *et al.*, 2005).

Este método de secado afecta el color y el contenido de licopeno del tomate. En el 2005,

Candelas-Cadillo *et al.*, observaron que el color del polvo rehidratado se modifica por efecto de la concentración de maltodextrinas. Los valores de los componentes de color (ángulo de matiz, cromaticidad y luminosidad) en el polvo rehidratado se alejaron de los valores encontrados en el jugo de tomate natural, Tabla 2.

También, se observó que existe una relación directa entre el color y la pérdida de licopeno. Particularmente, en el secado a 180 °C y con 80% de maltodextrinas se presentó una disminución del 74.9% de licopeno asociado al cambio más significativo de color, expresado como  $\Delta C = -11.5$ .

**Tabla 2.** Valores de ángulo de matiz (h), cromaticidad (C) y luminosidad (L\*) en polvo de tomate rehidratado (Candelas-Cadillo *et al.*, 2005).

Producto	Temperatura (°C)	Maltodextrina (%)	h (°)	C	L*
Polvo de tomate rehidratado	170	80	64.70	40.65	25.53
		100	64.54	40.85	22.21
	180	80	60.40	38.26	25.98
		100	63.84	40.18	26.60

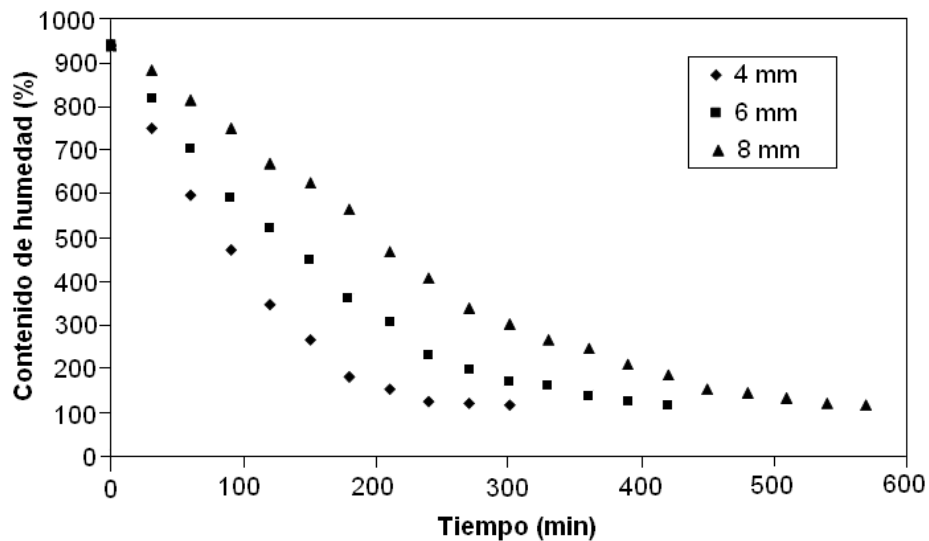
Los valores para el jugo natural son  $h = 41.06^\circ$ ,  $C = 33.75$ ,  $L^* = 55.55$

**2.3.2 Deshidratado al sol.** La energía solar se usa como la única fuente de energía o como una fuente complementaria. El aire puede ser generado de forma natural o por convección forzada. El proceso de calentamiento puede involucrar el paso de aire precalentado a través del producto, o por exposición directa a la radiación solar o la combinación de ambos.

En el secado por radiación directa, parte de la radiación solar penetra el material y se absorbe por el mismo producto, generándose calor en el interior y superficie de este (Basunia *et al.*, 2001, véase Rajkumar *et al.*, 2007a).

El secado al sol se limita a climas calurosos y humedades relativas bajas (40-60%) con vientos fuertes. El secado al sol tradicional tiene la ventaja de ser sencillo y de bajo costo, sin embargo

requiere de largos tiempos de secado, lo cual puede generar consecuencias adversas en la calidad del producto. El alimento se encuentra expuesto al polvo, viento, insectos, roedores y otros animales por lo que la calidad del alimento se ve degradada (Sacilik *et al.*, 2006). En el 2007a, Rajkumar *et al.*, empleando un secador solar de charolas, obtuvieron tiempos de secado de 5, 7 y 9.5 horas para rebanadas de tomate de 4, 6 y 8 mm de espesor respectivamente. El contenido final de humedad fue de  $11.5 \pm 0.5\%$ , Figura 8. En cuanto al color observaron que se obtenían productos ligeramente más oscuros con respecto al tomate fresco, el cambio más notable se observó en el valor de  $b^*$ , Tabla 3.

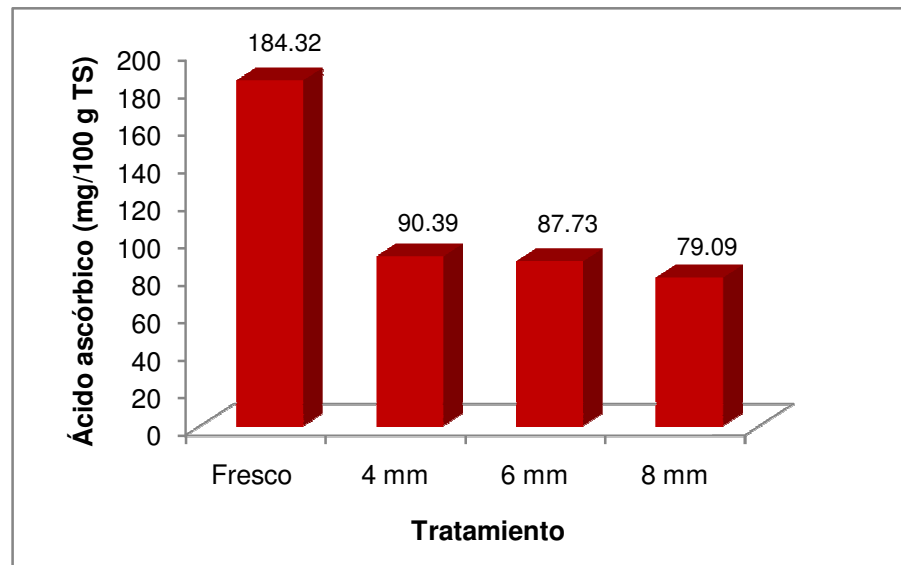


**Figura 8.** Deshidratado de tomate en un secador solar de charolas (Rajkumar *et al.*, 2007a).

**Tabla 3.** Valores de color en tomate deshidratado en un secador solar de charolas (Rajkumar *et al.*, 2007).

Tratamiento	L	a*	b*	h°	C
Fresco	48.84	12.64	12.06	43.65	17.47
4 mm	44.16	10.18	17.51	59.83	20.25
6 mm	43.03	10.03	17.22	59.78	19.93
8 mm	42.86	9.68	16.94	60.26	19.51

Rajkumar *et al.* (2007a), también determinaron que el contenido de ácido ascórbico en las rebanadas de tomate (de 4, 6 y 8 mm de espesor) disminuía hasta un 57.1%. Las rebanadas más gruesas exhibieron la mayor degradación, Figura 9. En cuanto a la capacidad de rehidratación encontraron valores de 3.25, 3.56 y 3.91 kg agua/kg de TS para rebanadas de tomate de 4, 6 y 8 mm de espesor respectivamente.

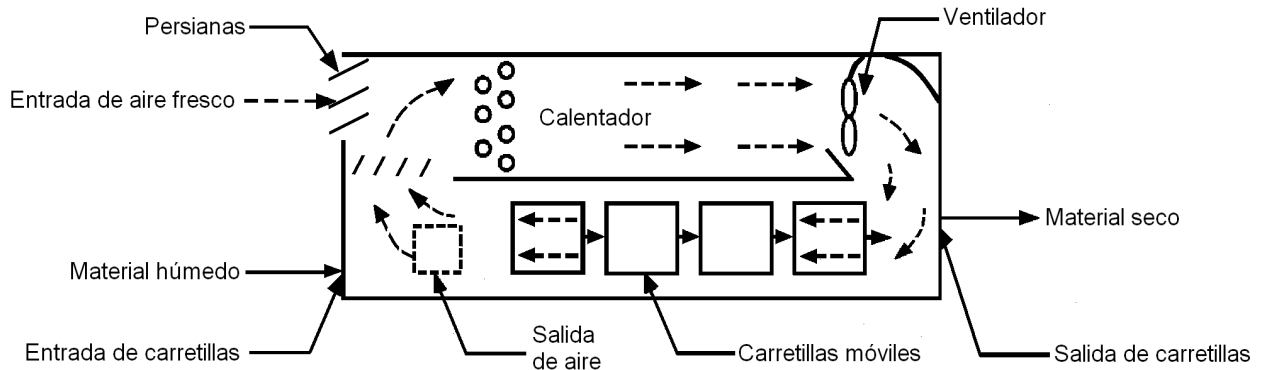


**Figura 9.** Contenido de ácido ascórbico en tomate deshidratado en un secador solar de charolas (Rajkumar *et al.*, 2007).

Los resultados anteriores, muestran que el secado al sol no afecta de manera importante los parámetros de color del tomate deshidratado, Tabla 3. Sin embargo, el contenido de ácido ascórbico disminuye drásticamente, Figura 9. Consecuentemente, se concluye que el deshidratado al sol produce tomate de apariencia aceptable pero con un nivel nutritivo bajo.

**2.3.3 Deshidratado en un secador de túnel.** Los secadores continuos de túnel suelen ser compartimentos de charolas o de carretillas que operan en serie. Los sólidos se colocan sobre charolas o en carretillas que se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada bandeja. El flujo de aire caliente puede ser a contracorriente, en paralelo, o una combinación de ambos, Figura 10. Muchos alimentos se secan por este procedimiento (Geankoplis, 1998).

El tiempo de residencia en el secador debe ser lo suficientemente grande como para reducir al valor deseado el contenido de humedad del sólido. Para operaciones a temperaturas relativamente bajas (50-80 °C), generalmente se calienta el gas mediante aire calentado con vapor. En el secado en túnel se puede lograr una calidad aceptable de frutas deshidratadas; sin embargo el costo de energía de un deshidratador de túnel puede ser alto comparado con los precios de venta de los productos (Unadi *et al.*, 2002).



**Figura 10.** Representación esquemática de un secador de túnel de flujo de aire a contracorriente.

En el 2002, Unadi *et al.*, propusieron una escala de calidad para el deshidratado de tomate basada en el parámetro de cromaticidad, Tabla 4. También, en ese trabajo se reporta el estudio del deshidratado de tomate en un secador de túnel comercial operado con gas para calentar el aire. El trabajo consistió en el uso de dos modos de operación, uno a contracorriente y el otro por lote en dos etapas, la primera etapa se llevó a cabo a 60 °C y la segunda a 55 °C. La cromaticidad en el tomate deshidratado en el modo de operación a contracorriente fue de 20.5, mientras que en el modo por lote fue de 19.6. De acuerdo a la clasificación de calidad, Tabla 4, los autores concluyeron que el mejor método de secado es usando el flujo a contracorriente.

El por ciento de humedad en los tomates deshidratados fue de aproximadamente un 15%. El tiempo requerido para obtener esta humedad, dependió del método utilizado. En el caso del deshidratado a contracorriente el tiempo fue de 29 h y para el método por lotes fue de 33.8 h. Generalmente, se puede apreciar que los tiempos de secado son largos. A partir de estos



resultados se puede concluir que el tiempo de secado afecta al color del producto deshidratado.

**Tabla 4.** Clasificación de tomate deshidratado basado en valores de cromaticidad (Unadi *et al.*, 2002).

Grado	Intervalo de cromaticidad	Color
1	> 20	Excelente
2	17-20	Muy bueno
3	14 - <17	Bueno
4	<14	Pobre

**2.3.4 Deshidratado en charolas estáticas.** En este secador, el material que puede ser un sólido en forma de terrones o una pasta, se esparce uniformemente sobre una charola de metal de 10 a 100 mm de profundidad. Estos secadores tienen charolas que se cargan y se descargan de un gabinete (Geankoplis, 1998), Figura 11.



**Figura 11.** Secador de charolas.

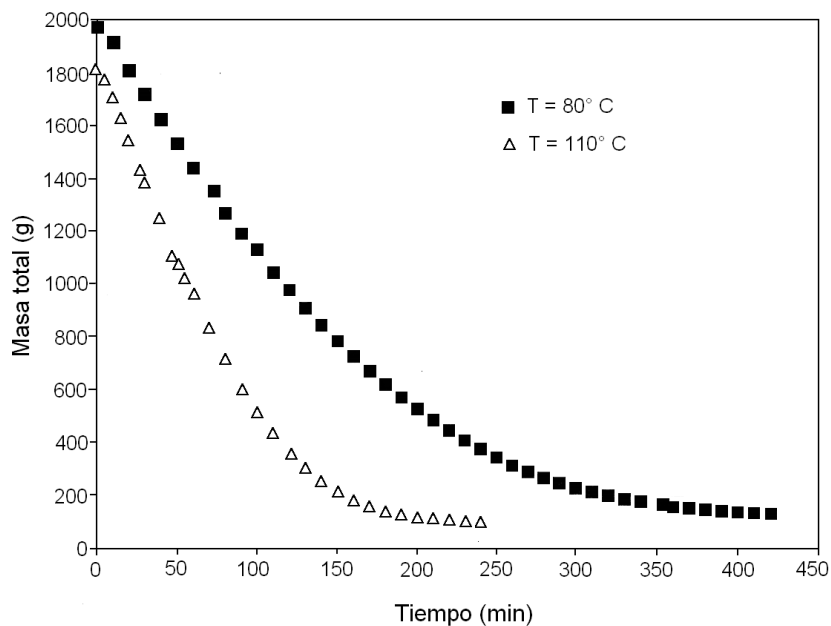
La transmisión de calor puede ser directa del gas a los sólidos, con circulación de aire caliente; o indirecta, utilizando repisas o bases calientes, serpentines de radiador o paredes refractarias al interior de la cubierta. En unidades de calor indirecto, exceptuando los equipos de repisas al vacío, casi siempre se necesita la circulación de aire para eliminar el vapor de humedad de la cámara de secado y evitar la saturación y condensación del aire.

Alrededor del 10 al 20% del aire que pasa sobre las charolas es nuevo, y el resto es aire recirculado (Geankoplis, 1998). El funcionamiento satisfactorio de los secadores de charolas depende de la conservación de una temperatura constante y una velocidad de aire uniforme sobre todo el material que se esté secando. Conviene tener una circulación de aire con velocidades de 1 a 10 m/s para mejorar el coeficiente de transferencia de calor en la superficie y con el propósito de eliminar bolsas de aire estancado. La corriente de aire no uniforme es uno de los problemas más graves que se presentan en el funcionamiento de los secadores de charolas.

Los secadores de charolas pueden ser del tipo de carretillas de charolas o de charolas estacionarias. En el primer caso, las charolas se cargan sobre carretillas que se empujan hasta el interior del secador y, en el segundo estas se cargan directamente en bastidores fijos dentro del secador.

Los secadores de charolas resultan convenientes cuando la capacidad de producción es pequeña. Prácticamente pueden secar cualquier producto, pero la mano de obra necesaria para la carga y descarga da lugar a costes de operación elevados (McCabe, 1998).

Son varios los estudios sobre el deshidratado de tomate empleando un secador de charolas. En el 2000, Zaroni *et al.* emplearon tomates de 6.5 cm de diámetro, lo cuales fueron cortados a la mitad, se les removieron las semillas y la parénquima. Se secaron en un secador de charolas, empleando temperaturas de 80 y 110 °C con un flujo de aire de 1.5 m/s. Bajo estas condiciones, obtuvieron tiempos de secado de siete y cuatro h, respectivamente, Figura 12. Cuando las mitades de tomate se deshidrataron a 80 °C, con una humedad final de 8.6% se observó una disminución del 92.4% en el contenido de ácido ascórbico, mientras que a 110 °C ya no se detectó la presencia de ácido ascórbico desde un contenido de humedad del 47.6%. El tomate deshidratado a 80 °C no produjo pérdidas significativas de licopeno; mientras que a 110 °C se presentó una pérdida del 12%.



**Figura 12.** Curva de secado de mitades de tomate deshidratado en un secador de charolas estáticas (Zanoni *et al.*, 2000).

Kerkhofs *et al.*, en el 2005 deshidrataron cuartos de tomate en un secador de charolas empleando una temperatura de  $42 \pm 0.3^\circ\text{C}$  y una velocidad del aire de 2 m/s. Los tomates provenían de tres cultivos de Nueva Zelanda (Aranka, Encore y Flavourine). En la Tabla 5 se muestran los cambios de color en los diferentes cultivos. El cultivo Encore muestra una mayor disminución del color rojo ( $a^*$ ) y luminosidad ( $L^*$ ). Mientras que en los otros cultivos no se observan cambios importantes de color.

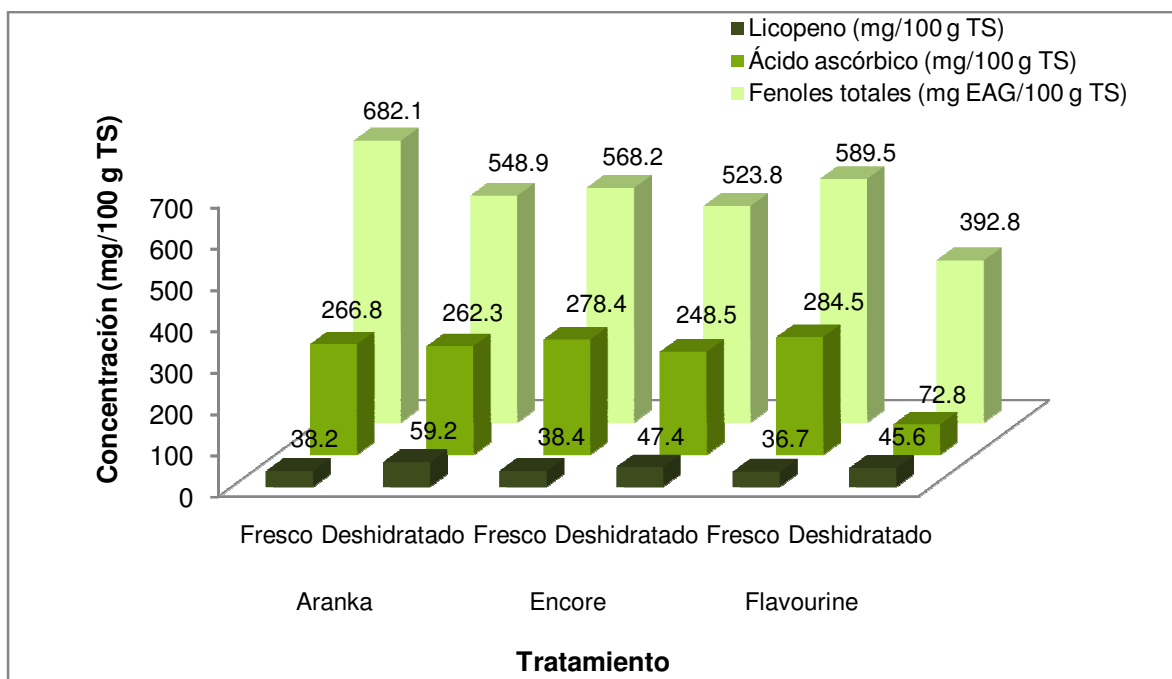
**Tabla 5.** Coordenadas cromáticas del sistema CIE  $L^*a^*b^*$  para tomate de tres cultivos de Nueva Zelanda, deshidratados en un secador de charolas (Kerkhofs *et al.*, 2005).

Tomate	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta C$	$h^\circ$
Aranka	32.8	19.8	20.3	28.36	45.71
Encore	34.6	21.5	22.8	31.3	46.68
Flavourine	33.9	16.1	18.4	24.44	48.81

Parámetros para tomate fresco: Aranka:  $L=30.2$ ,  $a^*=22.7$ ,  $b^*=18.7$ ,  $C=29.41$ ,  $h=39.5^\circ$ . Encore:  $L=47.2$ ,  $a^*=39.4$ ,  $b^*=28.7$ ,  $C=48.7$ ,  $h=36.1^\circ$ . Flavourine:  $L=32.2$ ,  $a^*=20.5$ ,  $b^*=17.9$ ,  $C=27.2$ ,  $h=41.1^\circ$ .

En el estudio anterior, también cuantificaron el contenido de ácido ascórbico, fenoles totales y

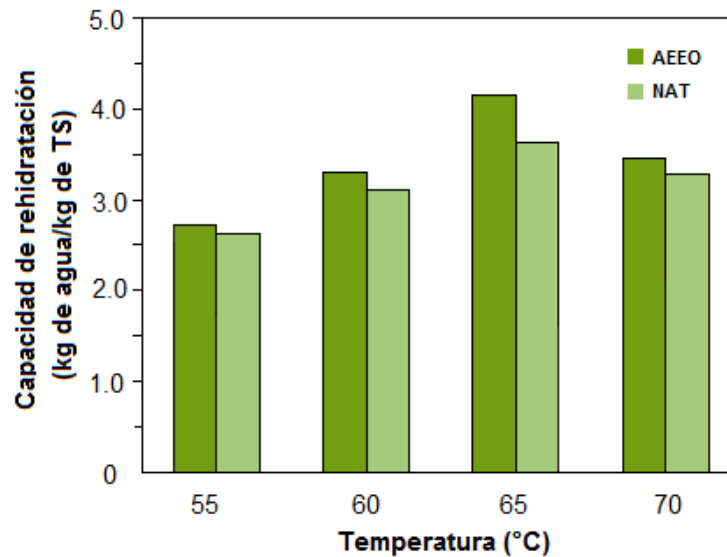
licopeno en tomate fresco y tomate deshidratado. Como resultado de esto, observaron que en las variedades Aranka y Encore no había una marcada disminución de esos constituyentes. Sin embargo, para el caso de Flavourine se observa una disminución tanto en el contenido de ácido ascórbico (74.4%), como de fenoles totales (33.4%). Respecto al contenido de licopeno, observaron un incremento hasta del 55.0%, Figura 13. Esto contrasta con otros estudios donde el contenido de licopeno disminuye cuando se deshidrata a temperaturas entre 55 y 110 °C. Los autores sugieren que el incremento en la concentración de licopeno se debe a la temperatura baja,  $42 \pm 0.3$  °C, que utilizaron para el deshidratado. Esta temperatura favoreció la liberación del licopeno enlazado al tejido celular del tomate.



**Figura 13.** Contenido de ácido ascórbico, fenoles totales y licopeno en tres cultivos de Nueva Zelanda (Kerkhofs *et al.*, 2005).

En otro estudio, Doymaz en el 2007 deshidrató mitades de tomate a 55, 60, 65 y 70°C en un secador de charolas, con una velocidad de aire de 1.5 m/s. Realizó pruebas de secado empleando muestras pretratadas con una solución de oleato de etilo alcalino (AEEO, por sus siglas en inglés) y muestras sin pretratamiento (NAT, naturales). Los tomates pretratados se secaron en 32.5, 25, 22.5 y 21 h mientras que los tomates sin pretratar en 35.5, 28, 26.5 y 24 h,

para el secado a 55, 60, 65 y 70 °C, respectivamente. En este estudio Doymaz encontró que el uso de un pretratamiento no sólo ayuda a disminuir los tiempos de secado, sino además ayuda a que la capacidad de rehidratación aumente, Figura 14.



**Figura 14.** Capacidad de rehidratación de tomate deshidratado sin pretratamiento (NAT) y pretratado con oleato de etilo alcalino (AEEO) (Doymaz, 2007).

## 2.4 Factores que intervienen en el proceso de secado

El secador de charolas es uno de los equipos que más se ha empleado para el deshidratado de frutas y hortalizas (Vega-Mercado *et al.*, 2001). Se han realizado varios estudios en el tomate para encontrar las condiciones de operación apropiadas que permitan obtener productos deshidratados. Así como, la conservación de los componentes que le dan al tomate su valor comercial. Por lo tanto, resulta importante describir los factores que intervienen en el proceso de deshidratado del tomate empleando este equipo.

Cuando un sólido es sometido a un proceso de secado utilizando aire se presentan dos subprocesos:

- Transferencia de materia. El movimiento de la humedad dentro del sólido es una función de la naturaleza física del sólido, su temperatura y su contenido de humedad.
- Transferencia de energía. Este segundo subproceso depende de las condiciones externas

de temperatura, humedad y flujo del aire, área de exposición y el tipo de secador empleado.

Las condiciones a las que se lleva a cabo el secado típico de tomate, inducen a pérdidas de algunas propiedades antioxidantes y cambios de color. Para ayudar a disminuir el daño oxidativo durante el secado de tomate con aire se ha sugerido (Kerkhofs *et al.*, 2005):

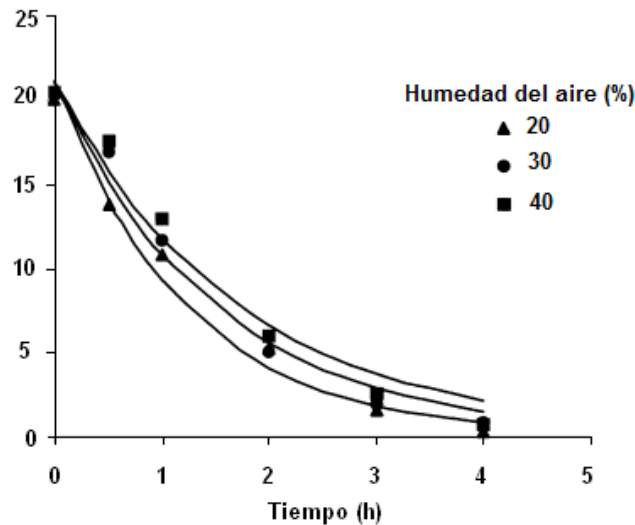
- a) Usar bajas temperaturas (45 – 55°C).
- b) Reducir el grosor del tomate usando cuartos de tomate o rebanadas de 2 a 8 mm de espesor.
- c) Realizar una remoción parcial del contenido de agua por deshidratación osmótica.

**2.4.1 Temperatura del aire.** La temperatura desempeña un papel importante en los procesos de secado. Conforme se incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posibles. La elección de la temperatura se lleva a cabo tomando en consideración la especie que se vaya a someter al proceso. Andritsos *et al.*, (2003) afirman que las temperaturas de secado de tomate ideales están entre 45 y 55 °C. Esto permite al producto retener sus nutrientes, incluyendo vitaminas y licopeno. Krokida *et al.*, en el 2003 encontraron que la temperatura es la variable más importante en el secado de tomate.

**2.4.2 Humedad relativa del aire.** La humedad relativa del aire se define como la razón de la presión de vapor de agua presente en ese momento, con respecto a la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura. Generalmente, este valor se expresa como porcentaje (%). A medida que aumenta la temperatura del aire, también aumenta su capacidad de absorción de humedad; cuando la temperatura disminuye sucede lo contrario.

La temperatura de secado está estrechamente relacionada con la humedad relativa del aire, ya que influye en la calidad organoléptica del producto final. Cuando la temperatura del aire de secado es alta y su humedad relativa es baja, existe el riesgo de que la humedad de la superficie del alimento se elimine más rápido de lo que el agua puede difundirse del interior húmedo a la superficie del alimento. Al evitar esto, se inhibe la formación de costras (Andritsos *et al.*, 2003). Por ello es importante, tener muy en cuenta las velocidades de flujo de aire.

A nivel industrial se emplean humedades relativas del 20 al 40%. En el 2003 Krokida *et al.*, observaron que la humedad relativa del aire no influía de manera importante en los tiempos de secado de tomate, Figura 15. En casi todos los estudios de secado de tomate no se considera esta variable debido a que generalmente se usa aire atmosférico.



**Figura 15.** Cinética de secado de tomate con diferentes porcentajes de humedad relativa (Krokida *et al.*, 2003).

**2.4.3 Velocidad del aire.** La velocidad del aire dentro del secador tiene como funciones principales, en primer lugar, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el alimento facilitando su evaporación. En segundo lugar, ayuda a transportar la humedad saliente del material.

La velocidad de secado aumenta a medida que incrementa la velocidad de aire que fluye sobre el alimento (Foust, 1990). A mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado.

La capa límite que existe entre el material a secar y el aire juega un papel importante en el secado. Cuanto menor sea el espesor de la capa límite, más rápida será la remoción de humedad. Por otra parte, el flujo de aire es importante, uno turbulento es mucho más eficaz que uno laminar.

El deshidratado a nivel industrial se lleva a cabo empleando velocidades de aire entre 1.5 y 2.5 m/s. El deshidratado de tomate se ha realizado con velocidades de aire de 1.5 y 2.0 m/s (Lewicki y Michaluk, 2004; Kerkhofs *et al.*, 2005; Doymaz, 2007).

**2.4.4 El agua en los alimentos.** La cantidad de agua en un alimento define sus propiedades reológicas, sensoriales y susceptibilidad a las alteraciones por reacciones.

El contenido de humedad en un alimento se refiere a toda el agua que este tiene. Un alimento puede expresarse en base húmeda o base seca. La humedad de un alimento es retenida en dos formas, como agua libre o agua “ligada”. El agua ligada ejerce una presión de vapor de equilibrio menor que la del agua libre a la misma temperatura. La humedad en forma de agua libre podría ser retenida por los capilares finos, o adsorbida dentro de una célula o paredes fibrosas o por combinación física/química con el sólido. El agua libre ejerce una presión de vapor de equilibrio igual a la del agua pura a la misma temperatura. La humedad en forma de agua libre está retenida en los espacios vacíos de los alimentos sólidos (Sharma, 2003).

Algunos autores han reportado valores del contenido de agua de alrededor del 94% en diversas variedades de tomate (Doymaz, 2005; Giovanelli *et al.*, 2002; Zanoni *et al.*, 1999; Rajkumar *et al.*, 2007).

**2.4.5 Pretratamientos.** En el secado de tomate los tiempos prolongados y las temperaturas altas ocasionan cambios adversos en la calidad final del producto, como son el oscurecimiento, pérdida de licopeno y ácido ascórbico, entre otros constituyentes. Para reducir estos efectos, se utilizan pretratamientos que consisten en soluciones de  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$  y  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ , (Lewicki *et al.*, 2001). En la industria del secado de tomate al sol, se emplea sulfito de sodio como aditivo debido a sus múltiples funciones (Latapi *et al.*, 2006):

1. Inhibir el oscurecimiento enzimático y no enzimático
2. Prevenir el deterioro oxidativo
3. Inhibir algunas enzimas como las proteasas, oxidasas y peroxidasas
4. Inhibir el oscurecimiento de bacterias y hongos.

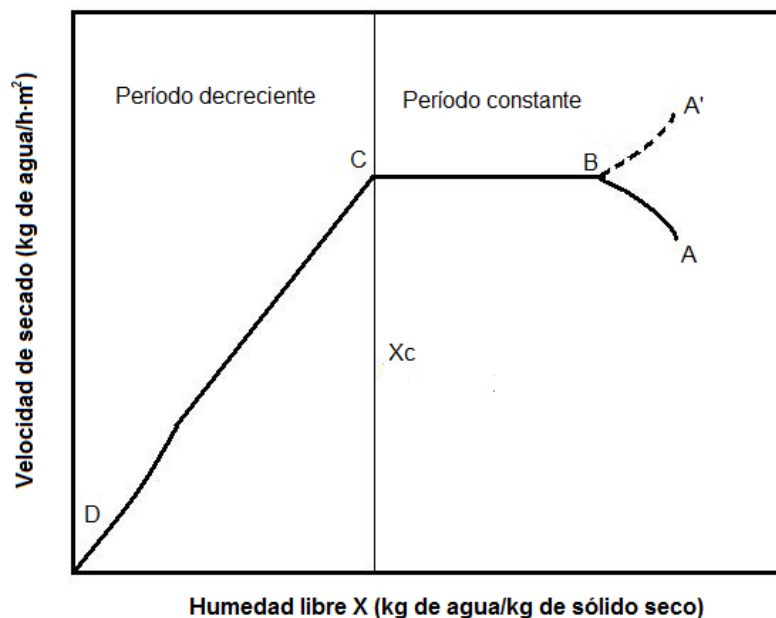


El metabisulfito de sodio tiene propiedades análogas al sulfito de sodio, mientras que el NaCl y el CaCl<sub>2</sub> solo ayudan a disminuir el oscurecimiento de las rebanadas de tomate deshidratado (Lewicki *et al.*, 2006)

## 2.5 Curvas de secado

La velocidad de secado de un material depende de sus propiedades y densidad global; así como de su contenido de humedad inicial y en equilibrio.

La velocidad de secado no es la misma durante todo el proceso. La representación gráfica de la velocidad de secado frente a la humedad del producto o frente al tiempo se denomina “curva de secado”, y será diferente según sea el tipo de producto a deshidratar. Generalmente la forma de las curvas de secado es complicada y deben obtenerse experimentalmente.



**Figura 16.** Curva de velocidad de secado.

En la Figura 16 se representa una curva de secado. El producto se encuentra inicialmente en el punto A. En la etapa inicial del secado (AB) el agua se calienta lentamente. En el punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Cuando el sólido está a una temperatura por arriba de la temperatura de operación, la velocidad de secado empieza en el punto A'. Posteriormente, inicia una pérdida de agua a velocidad constante (BC). El período de

velocidad de secado constante se caracteriza por la evaporación de la humedad a partir de una superficie saturada. El secado de velocidad constante equivale fundamentalmente a evaporación a partir de un cuerpo de agua grande y es independiente del tipo de sólido (Sharma, 2003). Esta etapa finaliza cuando se alcanza la llamada humedad crítica  $X_c$ , fácilmente identificable en las curvas de secado por el cambio brusco de velocidad. En esta etapa no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La velocidad empieza a decrecer (CD), pudiendo existir uno o varios periodos de velocidad decreciente. El período de velocidad decreciente es por lo general el período más largo de una operación de secado y depende de la temperatura del aire, velocidad del aire y del espesor del alimento. Es posible que la cantidad de humedad que se elimina durante el periodo de velocidad decreciente sea pequeña; sin embargo los tiempos de secado pueden ser prolongados.

## 2.6 Modelos matemáticos

La disminución del contenido de humedad en el proceso de secado de tomate, es controlado casi exclusivamente por los mecanismos de difusión de líquidos descritos en la segunda ley de Fick. La ecuación propuesta por Lewis empleada para describir el comportamiento del secado es análoga a la ley del enfriamiento de Newton, Ecuación 3. Esta ecuación se utiliza de manera rutinaria para representar el deshidratado de rebanadas de tomate, cuando se relaciona directamente el contenido de agua con el tomate seco (kg de agua/kg de sólido seco). Existen otros modelos que permiten asociar la actividad acuosa con el tiempo, entre ellos están el modelo de Oswin, de Guggenheim Anderson de Boer (GAB) y el de BET, (Aranbi *et al*, 2006)

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (3)$$

Asumiendo que la cantidad de masa (M) depende del tiempo de secado (t), la integración de la Ecuación 3, genera una mejor solución, Ecuación 4.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = e^{-kt} \quad (4)$$

Donde:

MR = Razón de humedad

$M$  = Contenido de humedad al tiempo  $t$  (kg de agua)

$M_e$  = Contenido de humedad en equilibrio (kg de agua/kg de materia seca)

$M_0$  = Contenido de humedad inicial (kg de agua/kg de materia seca)

El modelo descrito anteriormente sirve sólo para predecir comportamientos simples, por lo que se han desarrollado nuevos modelos para obtener datos más precisos de tiempos de secado, Tabla 6.

**Tabla 6.** Modelos matemáticos para predecir curvas de secado.

Nombre del modelo	Modelo
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Henderson & Pabis	$MR = A \cdot \exp(-kt)$
Wang & Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Midilli	$MR = A \cdot \exp(-kt^n)$

a, b, k y n son constantes

Se ha observado que las ecuaciones que se adaptan mejor para predecir el contenido de humedad durante el secado de tomate son las ecuaciones propuestas por Henderson & Pabis y el modelo de Page (Sacilik *et al.*, 2006). En el 2006, Kaur *et al.*, emplearon el modelo de Page para describir el comportamiento del deshidratado de tomate a 50, 60 y 70°C en un secador de charolas. Obtuvieron valores de  $R^2$  de 0.999, 0.997 y 0.999, para cada una de las temperaturas empleadas. Los valores que se obtuvieron al usar el modelo de Page, son muy parecidos a los experimentales.

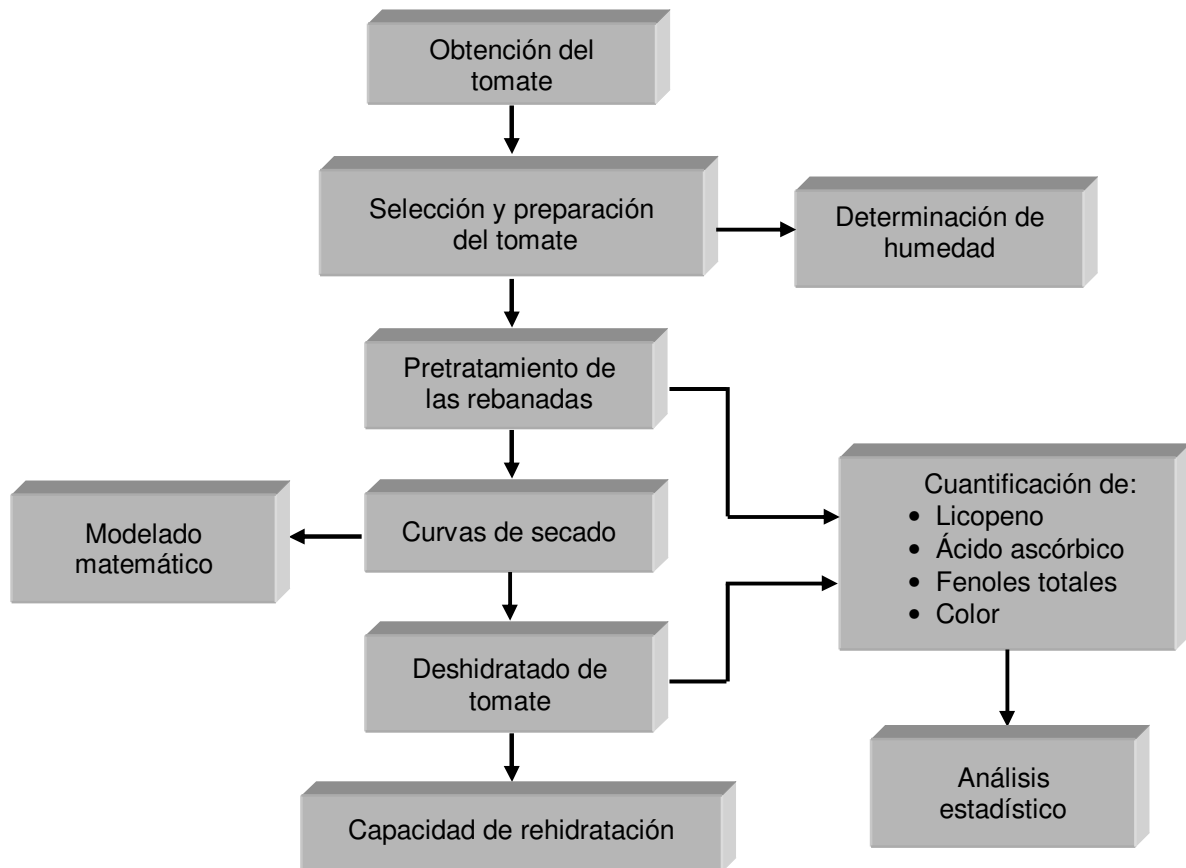
En el 2007b, Rajkumar *et al.*, también usaron el modelo de Page, en rebanadas de tomate deshidratadas en un secador solar asistido con vacío. Obtuvieron valores para  $R^2$  de 0.997, 0.993 y 0.997 en rebanadas de 4, 6 y 8 mm de espesor, respectivamente.

## 3. METODOLOGÍA

---

### 3.1 Procedimiento general

El trabajo de investigación se realizó empleando los pasos que se muestran en la Figura 17. Se utilizó tomate saladette proveniente de la región Mixteca, el cultivo es de crecimiento indeterminado y se cultiva en el suelo. Cabe señalar que el cultivo de crecimiento indeterminado consiste en obtener varias cosechas de una misma planta.



**Figura 17.** Diagrama general de trabajo.

### 3.2 Descripción del secador de charolas giratorias

El secador de charolas giratorias fue diseñado y construido en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, Figura 18. Las principales características de este equipo son las siguientes:

- Temperatura de operación entre 20 y 60 °C.
- Velocidad del aire entre 0 y 1.2 m/s.
- Rotación de charolas con una velocidad angular única de 20 rpm



**Figura 18.** Secador de charolas giratorias.

El horno es una estructura mecánica que está construida principalmente de lámina de acero inoxidable en la parte interna, lamina de aluminio en la parte externa y placas de poliestireno expandido para minimizar la transferencia de calor a través de las paredes de la cámara. El horno cuenta con dos sensores de tipo semiconductor, colocados en la parte inferior y en la parte superior de la cámara de secado. Tiene cuatro charolas de acero inoxidable, con dimensiones de 0.36 x 0.10 m. Las charolas cuentan con perforaciones de 0.2 cm de diámetro.

Los actuadores son los dispositivos encargados de efectuar las acciones físicas del horno, son controlados por el módulo de procesamiento. Los actuadores presentes en el horno de secado son tres: resistencias calefactoras, el ventilador y el motor, Figura 19. Las resistencias se encargan de calentar el aire de la cámara del horno, el equipo utilizó una resistencia de 850 W. El

ventilador inyecta aire y provoca que el aire caliente circule a través de la cámara de secado. El motor hace girar las charolas a una velocidad angular de 20 rpm.



**Figura 19.** Actuadores presentes en el horno (resistencias, ventilador y motor)

### 3.3 Materiales, equipos y reactivos

Tubos de ensaye con tapón de rosca de 15 x 10

Micropipetas de 200, 1000 y 5000  $\mu\text{L}$

Frascos color ámbar

Rebanador manual casero

Cuchillo, mortero, tubos de 50 mL, matraces aforados de 25, 50 y 100 mL

Parrilla de calentamiento y agitación (Barnstead Thermolyne CIMAREC)

Termobalanza (Sartorius MA45)

Vortex (Barnstead International Type 16700 Mixer)

Balanza Analítica (Sartorius BL210S)

Congelador (GE modelo FUM 17DRBRWIT)

Espectrofotómetro de UV/vis (Perkin-Elmer Lambda 35)

Espectrofotómetro (Hunter Lab UltraScanVis)

Lector de microplacas (Biotec LX-808)

Secador de charolas giratorias (diseñado y construido en la Universidad Tecnológica de la Mixteca).

Sonicador (BRANSON 8510)

Acetona, pureza 99.5 % (JT Baker)

2,6-Diterbutil-4-metilfenol (BHT), pureza 99 % (Sigma Aldrich)

2,6-Dicloroindofenol (DCPI), grado analítico recomendado por el fabricante para la determinación de ácido ascórbico, pureza no especificada (Sigma Aldrich)

Ácido metafosfórico, pureza 96% (Sigma Aldrich)  
Reactivo de Folin – Ciocalteu, pureza 99% (Fluka)  
Metabisulfito de sodio, pureza 99 % (Química Meyer)  
Ácido ascórbico, grado USP, pureza especificada (Reasol)  
Hexano, pureza 98.5 % (EMD)  
Etanol, pureza 99.5 % (Omnichem)  
Metanol, pureza 99.9 % (Química Meyer)  
Acetato de sodio trihidratado, pureza 97.7 % (J.T. Baker)  
Ácido acético, pureza 99.8 % (J.T. Baker)

### 3.4 Obtención del tomate

El tomate saladette (*Lycopersicon esculentum*) empleado para el deshidratado se obtuvo del invernadero localizado en la comunidad de La Luz Nagore Huajolotitlán, Oaxaca; propiedad del Técnico Agropecuario Manuel de Jesús Martínez Ramírez.

### 3.5 Selección y preparación del tomate

A partir de un lote de 2 kg de tomate, se seleccionó 1 kg en base a su color y tamaño. Los frutos elegidos fueron aquellos con una superficie roja en al menos un 90%, se utilizó una escala de colores de la USDA, 1997 (Anexo A). Para la selección, también se consideraron tomates sin magulladuras, y de masas similares (180-210 g). Los tomates se lavaron, se cortaron en rebanadas de 6 mm de espesor con ayuda de un rebanador manual casero (Apéndice A) y las semillas se eliminaron manualmente. Esto se hizo debido a que las semillas generalmente influyen sobre la variabilidad de la medición de masa del tomate deshidratado. Algunas semillas se adhieren a la superficie de la charola.

### 3.6 Determinación de humedad

La determinación de humedad se realizó en una termobalanza a 100 °C, utilizando rebanadas de tomate con un peso aproximado de  $5 \pm 0.1$  g, a las cuales se les eliminaron previamente las

semillas.

### 3.7 Pretratamiento de las rebanadas de tomate

Las rebanadas de tomate, libres de semillas, se sumergieron en una solución acuosa de metabisulfito de sodio al 1% durante 10 min a temperatura ambiente y posteriormente la solución se drenó por 2 min.

### 3.8 Curvas de secado

Se realizaron curvas de secado para cada una de las temperaturas (45, 50 y 60 °C), velocidades de aire (0.6 y 1.2 m/s) y rotación de charolas (0 y 20 rpm), Tabla 7. Para determinar la pérdida de humedad las rebanadas de tomate pretratadas se pesaron en una balanza analítica durante intervalos de 15 min, hasta llegar a un contenido final de humedad del  $10 \pm 1$  %. El tomate deshidratado con humedades por debajo del 15% se puede conservar hasta por varios meses. Las curvas de secado, se realizaron por triplicado.

**Tabla 7.** Condiciones de temperatura, velocidad de aire y rotación de charolas para el deshidratado de tomate.

Temperatura (°C)	Velocidad de aire (m/s)	Rotación de charolas (rpm)
45	0.6	0
		20
	1.2	0
		20
50	0.6	0
		20
	1.2	0
		20
60	0.6	0
		20
	1.2	0
		20



Las curvas de velocidad de secado se realizaron usando el procedimiento siguiente. Primero se calculó el valor de la humedad al tiempo t con la ecuación 5.

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \quad (5)$$

Donde:

$X_t$  = Humedad al tiempo t (kg de agua/ kg de sólido seco)

W = Peso del sólido húmedo (kg totales de agua)

$W_s$  = Peso del sólido seco (kg de sólido seco)

Después de haber establecido las condiciones de secado constante y el contenido de humedad en equilibrio, se procedió a calcular el contenido de humedad libre X, para cada valor de  $X_t$ , Ecuación 6.

$$X = X_t - X^* \quad (6)$$

Donde:

X = Humedad libre (kg de agua libre/ kg de sólido seco)

$X^*$  = Humedad en equilibrio (kg de sólido seco)

Se realizó una gráfica de la humedad libre X (kg de agua libre/kg de sólido seco) vs tiempo t (h) con los valores obtenidos en la Ecuación 6. La velocidad de secado se determinó a partir de la gráfica, midiendo las pendientes de las tangentes a la curva, con lo cual se obtuvieron valores de  $dX/dt$  para los valores de t. Con la Ecuación 7, se calculó la velocidad R para cada punto.

$$R = - \frac{L_s dx}{A \cdot dt} \quad (7)$$

Donde:

R = Velocidad de secado (kg de agua/ h·m<sup>2</sup>)

$L_s$  = Peso del sólido seco usado

A = Área superficial expuesta al secado (m<sup>2</sup>)

### 3.9 Deshidratado de tomate

El deshidratado se realizó por triplicado a 1 kg de tomate a las condiciones de temperatura, velocidad de aire y rotación de charolas descritas en la Tabla 7. El deshidratado se detuvo cuando las rebanadas de tomate contenían  $10 \pm 1\%$  de humedad en peso. Las rebanadas se almacenaron a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y protegidas de la luz, para realizar posteriormente la cuantificación de licopeno, ácido ascórbico, fenoles totales, color y razón de rehidratación.

### 3.10 Cuantificación de licopeno

Se usó el protocolo de extracción de licopeno establecido por Fish *et al.* (2002), véase Henríquez *et al.*, 2005.  $0.5 \pm 0.01$  g de tomate seco se molieron en un mortero, posteriormente se pasaron a tubos de 50 mL protegidos de la luz, se empleó 1 mL de agua destilada con la finalidad de hacer más fácil la molienda. Se adicionaron 5 mL de una solución al 0.05% de hidroxitolueno butilado (BHT) en acetona. Posteriormente, se agregaron 5 mL de etanol acuoso al 95 % y 10 mL de hexano. Para extraer el licopeno se agitó en vortex durante 10 min. Se tomó el sobrenadante con ayuda de una pipeta Pasteur y se midió la absorbancia a 503 nm en un espectrofotómetro de UV/Vis. Para determinar la cantidad de licopeno presente en el tomate se empleó la Ecuación 7.

$$\text{Licopeno} = (\mu\text{g de tejido}) = (A_{503})(31.2 \text{ g de tejido})$$

(7)

### 3.11 Cuantificación de ácido ascórbico

El ácido ascórbico se cuantificó utilizando el método de reducción de DCPI (Hernández *et al.*, 2006).

Se empleó una solución acuosa de ácido metafosfórico al 1%, una solución buffer de acetato de sodio (49.75 g de acetato de sodio tri hidratado + 116 mL de ácido acético glacial + 165 mL de agua desionizada), una solución acuosa de 12 ppm de DCPI y estándares de ácido ascórbico de

10, 20, 30 y 40 ppm en ácido metafosfórico al 1%.

0.5 ± 0.01 g de tomate se molieron en un mortero con 25 mL de ácido metafosfórico al 1%, el ácido ascórbico se extrajo durante 2 h en una parrilla de agitación en frascos de color ámbar.

El espectrofotómetro se ajustó a cero utilizando agua desionizada. La absorbancia de una mezcla de 1 mL de ácido metafosfórico al 1%, 1 mL de buffer de acetato y 8 mL de una solución de 12 ppm de DCPI se leyó a 520 nm, este valor se le denominó L1.

Para realizar la curva de calibración se empleó como blanco la mezcla de 1 mL de una solución estándar de ácido ascórbico de 10 ppm, 1 mL de la solución de buffer de acetato y 8 mL de agua desionizada. Se leyó la absorbancia de una mezcla de 1 mL de una solución estándar de ácido ascórbico de 10 ppm, 1 mL de la solución de buffer de acetato y 8 mL de la solución de DCPI para obtener el valor de L2. Se obtuvieron de manera similar valores de L2 para los estándares de 20, 30, 40 y 50 ppm, Apéndice B. El valor de L1 representa el valor de la absorbancia de todo el DCPI y L2 es el DCPI que queda después de reaccionar con el ácido ascórbico. La gráfica se construyó empleando los valores de absorbancia de L1-L2 contra la concentración en ppm de los estándares de ácido ascórbico.

Para medir la absorbancia de las muestras, el espectrofotómetro se ajustó a cero usando 1 mL de la muestra de tomate, 1 mL de buffer de acetato y 8 mL de agua desionizada. Los valores de L2 para las muestra se obtuvieron leyendo la absorbancia de 1 mL de la muestra de tomate, 1 mL de buffer de acetato y 8 mL de una solución de DCPI. Se calculó el valor de L1-L2 y se sustituyó en la ecuación obtenida de la recta de calibración para obtener la concentración de ácido ascórbico en la muestra de tomate. Los estándares, las muestras y el DCPI se cubrieron de la luz. Todas las lecturas se realizaron a una longitud de onda de 520 nm.

### **3.12 Cuantificación de fenoles totales**

Los fenoles totales se analizaron usando el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu (Chang *et al.*, 2006).

El metanol y el agua desionizada se degasificaron, empleando un sonicador para evitar que el oxígeno presente en los disolventes afectara la medición.

Una muestra de  $0.05 \pm 0.002$  g de tomate deshidratado se extrajo con 1 mL de metanol, la mezcla se agitó vigorosamente durante media hora en vortex. Pasado este tiempo el extracto se filtró a través de un algodón. Después se preparó el complejo colorido con 60  $\mu$ L del extracto + 720  $\mu$ L de agua desionizada + 60  $\mu$ L del reactivo de Folin-Ciocalteu. Esta mezcla se agitó durante 6 min en vortex a velocidad media; posteriormente se adicionaron 600  $\mu$ L de una solución acuosa de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 7%, para desplazar el oxígeno presente se inyectó nitrógeno y se agitó durante 5 min en vortex a velocidad media. 120  $\mu$ L de la mezcla se colocaron en una microplaca y esta se llevó a un lector de microplacas, donde se incubaron durante 30 min a 40 °C, al finalizar este tiempo se realizó la lectura con un filtro de 630 nm.

Para la cuantificación se realizó una curva estándar de ácido gálico con concentraciones de 100, 200, 300, 400, 500 y 600 ppm, Apéndice C.

### 3.13 Determinación de color

El color de las muestras de tomate se determinó con un espectrofotómetro HunterLab. Se empleó el iluminante D65, con un ángulo de observación de 10° y con un diámetro de observación de 0.9525 cm. Para cada determinación se utilizaron 3 rebanadas de tomate y a cada una de las rebanadas se le midieron los valores de L,  $a^*$  y  $b^*$  en 10 puntos distintos para obtener un promedio.

### 3.14 Razón de rehidratación

Para determinar la capacidad de rehidratación las rebanadas de tomate deshidratado se sumergieron durante 50 min en agua destilada a temperatura ambiente. Las muestras se pesaron inicialmente ( $p_0$ ) y por cada g de tomate deshidratado se agregaron 100 mL de agua, al finalizar el tiempo se drenaron por 2 min y se pesaron nuevamente ( $p_1$ ), (Lewicki *et al.*, 2004).

La razón de rehidratación se obtuvo dividiendo el peso de la muestra rehidratada ( $p_1$ ) entre el peso de la muestra inicial ( $p_0$ ).

### 3.15 Análisis estadístico

Para determinar si las variables independientes (temperatura, velocidad de aire y rotación de charolas) presentaban diferencia significativa con un nivel de significancia del 0.05%, se realizó un análisis de varianza mixto. Además, se evaluó la contribución de cada las variables independientes sobre las variables de respuesta (tiempo, velocidad en el período constante, difusividad efectiva, energía de activación, constante de velocidad de los modelos matemáticos, color, licopeno, ácido ascórbico, fenoles totales y capacidad de rehidratación), para lo cual se utilizó el programa Design Expert<sup>1</sup>.

Para evaluar el efecto de la rotación de charolas y velocidad del aire a temperatura constante sobre las variables de respuesta (color, ácido ascórbico, fenoles totales, capacidad de rehidratación), se realizó un análisis comparativo de medias, utilizando el método de Duncan,. El análisis se hizo a un nivel de significancia de 0.05% con el programa Design Expert<sup>1</sup>.

Las variables de respuesta se clasificaron en físicas, químicas y termodinámicas, Tabla 8. Las cuales se correlacionaron mediante un análisis multivariable por mínimos cuadrados parciales (PLS). Se usó el programa R Development Core Team<sup>2</sup>.

**Tabla 8.** Clasificación de las variables de respuesta

<b>Termodinámicas</b>	<b>Físicas</b>	<b>Químicas</b>
Tiempo	Color	Licopeno
Difusividad efectiva	Capacidad de rehidratación	Ácido ascórbico
Constante de velocidad (k)		Fenoles totales

<sup>1</sup> Stat-Ease Inc., Design Expert 6.0,10, 2003. [www.statease.com](http://www.statease.com)

<sup>2</sup> R Development Core Team, 2007.[www.R-project.org](http://www.R-project.org)

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

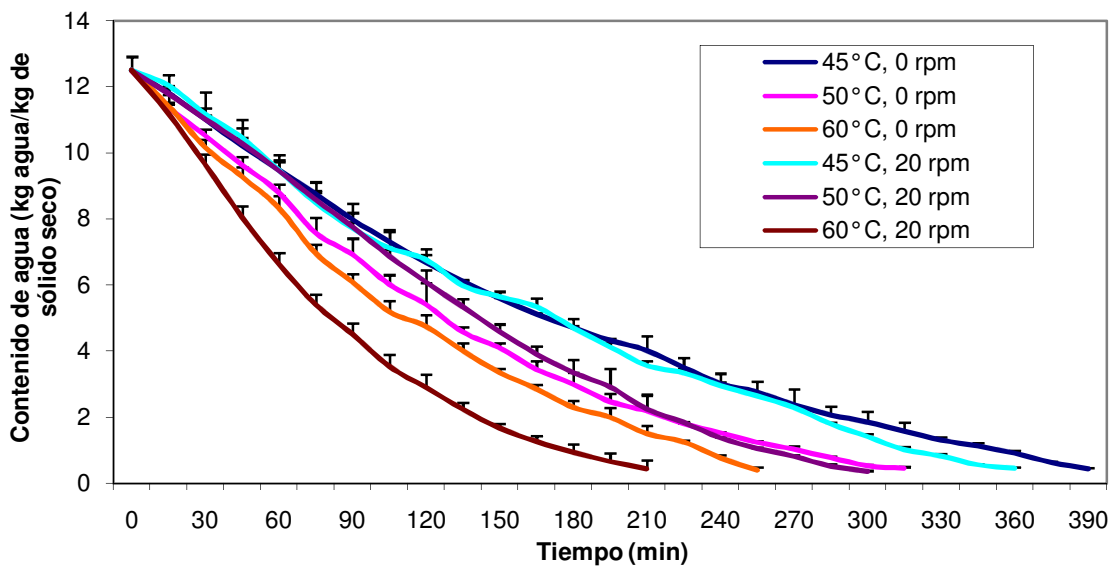
### 4.1 Características del secado

El contenido de humedad inicial de las rebanadas de tomate fue de  $92.6 \pm 0.4\%$ .

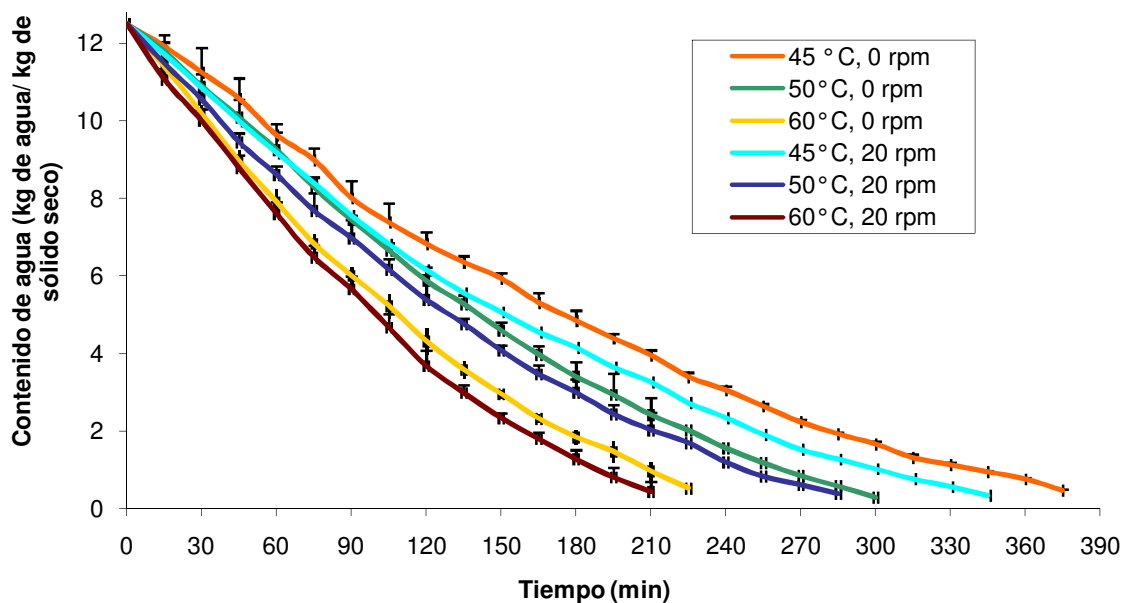
Las rebanadas deshidratadas a  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  requirieron tiempos de secado de 345 a 390 min para llegar a un contenido de humedad final de  $10 \pm 1\%$ . A una temperatura de  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , los tiempos de secado fueron de 285 a 315 min y cuando se empleó una temperatura de  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  se obtuvieron tiempos de secado de 210 a 255 min.

Los tiempos de secado disminuyeron con el aumento de la velocidad del aire de 0.6 a 1.2 m/s. Esto se debe a que cuando se tiene una velocidad de aire mayor, la velocidad de evaporación del agua desde el alimento aumenta y por lo tanto el tiempo de secado disminuye (Foust, 1990). En la Figura 20, se observa el comportamiento del secado de tomate a las diferentes temperaturas ( $45$ ,  $50$  y  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), rotación de charolas (0 y 20 rpm), velocidad de aire de 0.6 m/s (a) y con una velocidad de aire de 1.2 m/s (b). Para realizar un análisis cuantitativo del efecto de las variables de operación del secado, se hizo un análisis de varianza mixto. Los resultados mostraron, que todos los factores presentan diferencia significativa a un nivel del 0.05%, Tabla 9.

La rotación de charolas mostró una contribución del 6.4%, mayor a la contribución de la velocidad del aire, 4.6%. En el deshidratado de tomate se monitoreó la pérdida de humedad en rebanadas de tomate colocadas en la parte inferior y superior de la cámara de secado. Como resultado de esto, cuando no se utilizó la rotación de charolas se observó una clara diferencia en el contenido de humedad en las rebanadas de tomate. El efecto de la rotación de charolas fue más evidente cuando el secado se llevó a cabo a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  y 0.6 m/s, se requirieron 30 min adicionales para que las rebanadas alcanzaran el mismo contenido de humedad. Esto se debió a que dentro de la cámara de secado, a las condiciones antes mencionadas, existen gradientes de temperatura de  $\pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El tener un sistema de rotación de charolas ayuda a que el secado sea homogéneo y que los gradientes de temperatura sean menores ( $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), Figura 21.



(a)

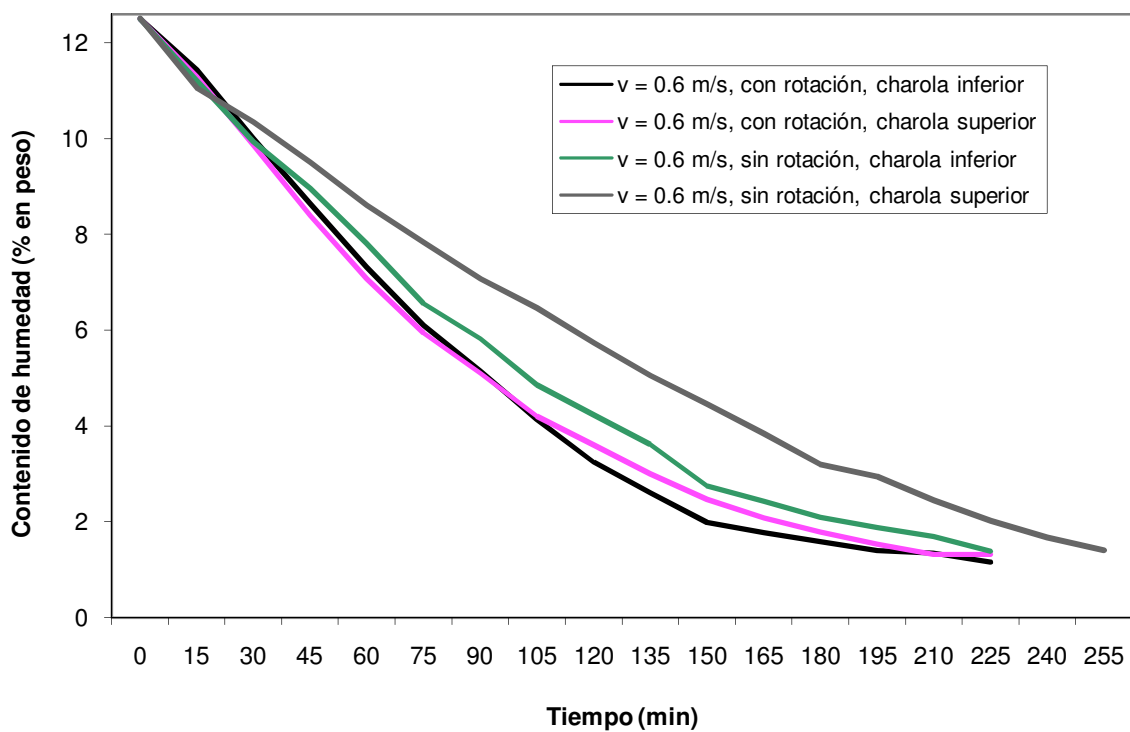


(b)

**Figura 20.** Curva de secado de tomate saladette a) Curvas de secado a uma velocidade de ar de 0.6 m/s y b) Curvas de secado a uma velocidade de ar de 1.2 m/s.

**Tabla 9.** Análisis de varianza de los tiempos de secado a las diferentes condiciones.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F <sub>0</sub>	F $\alpha = 0.05$	% de contribución
Modelo	125750	11	11431.82	1829.09		
A. Temperatura	117650	2	58825	9412	3.4	88.4
B. Velocidad de aire	3025	1	3025	484	4.3	4.6
C. Rotación	4225	1	4225	676	4.3	6.4
AB	200	2	100	16	3.4	0.2
AC	350	2	175	28	3.4	0.3
BC	100	1	100	16	4.3	0.2
ABC	200	2	100	16	3.4	0.2
Error	150	24	6.25			

**Figura 21.** Efecto de la posición de las charolas en la cámara de secado sobre el contenido de agua en tomate saladette deshidratado.



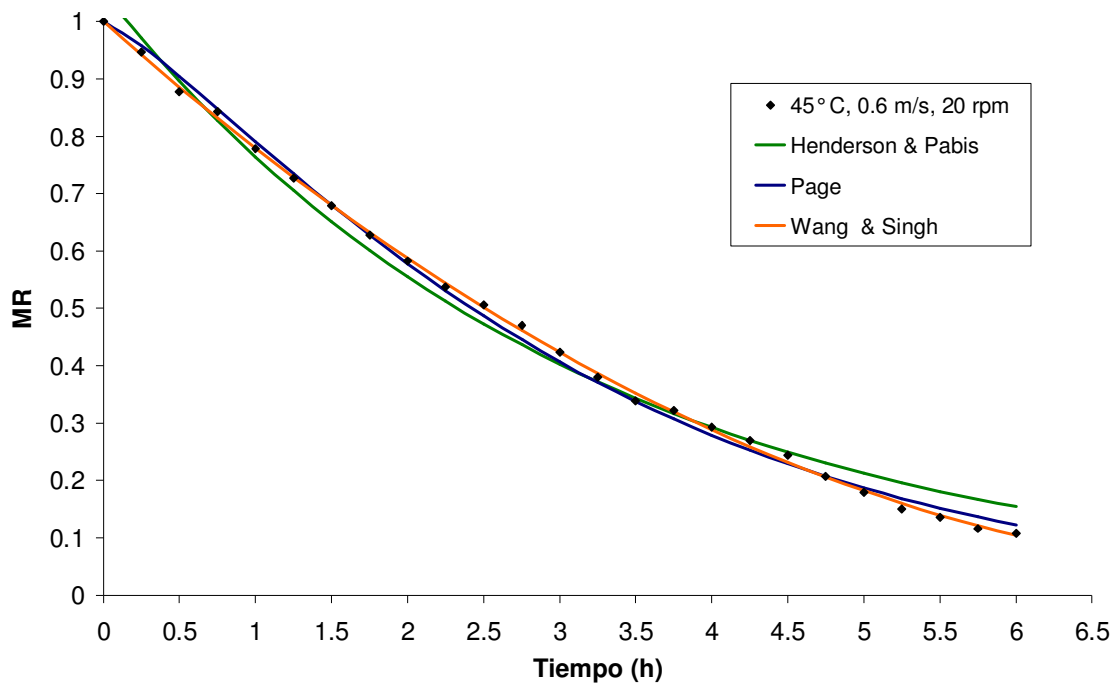
## 4.2 Modelos matemáticos

Para describir el comportamiento del secado de tomate se utilizaron tres modelos matemáticos: Henderson & Pabis, Page y Wang & Singh (Sacilik *et al.*, 2006), usados para resolver la Ecuación 4. Figura 22.

Henderson & Pabis:  $MR = A \cdot \exp(-kt)$

Page:  $MR = \exp(-kt^n)$

Wang & Singh:  $MR = 1 + at + bt^2$



**Figura 22.** Relación de MR vs tiempo de datos experimentales y obtenidos de los modelos de Henderson & Pabis, Page y Wang & Singh en rebanadas de tomate deshidratado.

El valor de MR se usó como  $M/M_0$ , esta simplificación se usa cuando el valor de  $M_e$  es muy pequeño comparado con  $M$  y  $M_0$  (Sacilik *et al.*, 2006). Para encontrar los valores de las constantes

se utilizó el paquete computacional InterReg<sup>3</sup>. El programa calculó los valores de las constantes empleando el método de regresión de Levenberg-Marquardt, Tabla 10. Este método de aproximación es una modificación del método de Newton y se emplea para regresiones no lineales, Anexo B.

Adicionalmente se calcularon los valores de  $R^2$  y  $\chi^2$ , para comparar el nivel de correlación entre los valores experimentales y los datos calculados. Los valores de  $R^2$  para el modelo de Henderson & Pabis fueron de 0.9814 a 0.9962, los valores de Page se encontraron entre 0.9952 y 0.9998 y para el modelo de Wang & Singh, entre 0.9963 y 0.9996. Los valores de  $\chi^2$  para el modelo de Henderson & Pabis fueron de  $2.04 \times 10^{-3}$  a  $1.66 \times 10^{-3}$ , para el modelo de Page se encontraron entre  $8.59 \times 10^{-5}$  y  $1.04 \times 10^{-4}$ , para el modelo de Wang & Singh estuvieron entre  $9.33 \times 10^{-5}$  y  $1.32 \times 10^{-4}$ , Tabla 10. Los modelos empleados tuvieron una buena correlación con los datos experimentales, siendo los modelos de Page y de Wang & Singh los que presentaron los valores más altos de  $R^2$  y los valores más pequeños de  $\chi^2$ . Por lo tanto son los modelos que tuvieron la mejor representación de todas las curvas de secado experimentales obtenidas en el presente trabajo.

---

<sup>3</sup> Kroll-Software. InterReg versión 2.0.5, 2007. [www.kroll-software.ch](http://www.kroll-software.ch)

**Tabla 10.** Parámetros de los modelos matemáticos empleados para el deshidratado de tomate saladette.

T (°C)	Vel. (m/s)	Rotación (rpm)	Henderson & Pabis				Page				Wang & Singh			
			a	k	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	k	n	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>
45	0.6	0	1.04	0.31	0.9966	2.62x10 <sup>-4</sup>	0.25	1.13	0.9992	6.02x10 <sup>-5</sup>	-0.24	0.016	0.9988	9.33x10 <sup>-5</sup>
	0.6	20	1.05	0.32	0.9889	8.99x10 <sup>-4</sup>	0.24	1.22	0.9975	2.04x10 <sup>-4</sup>	-0.24	0.014	0.9994	4.77x10 <sup>-5</sup>
	1.2	0	1.05	0.31	0.9927	5.75x10 <sup>-4</sup>	0.24	1.19	0.9986	1.08x10 <sup>-4</sup>	-0.24	0.015	0.9995	4.01x10 <sup>-5</sup>
	1.2	20	1.05	0.36	0.9938	5.16x10 <sup>-4</sup>	0.27	1.18	0.9990	8.59x10 <sup>-5</sup>	-0.27	0.019	0.9992	6.92x10 <sup>-5</sup>
50	0.6	0	1.04	0.41	0.9953	3.96x10 <sup>-4</sup>	0.34	1.15	0.9992	6.61x10 <sup>-5</sup>	-0.32	0.029	0.9991	7.43x10 <sup>-5</sup>
	0.6	20	1.06	0.38	0.9814	1.60x10 <sup>-3</sup>	0.27	1.29	0.9952	4.14x10 <sup>-4</sup>	-0.27	0.017	0.9985	1.32x10 <sup>-4</sup>
	1.2	0	1.06	0.41	0.9862	1.16x10 <sup>-2</sup>	0.29	1.27	0.9981	1.64x10 <sup>-3</sup>	-0.30	0.023	0.9984	1.33x10 <sup>-3</sup>
	1.2	20	1.04	0.41	0.9907	7.71x10 <sup>-4</sup>	0.34	1.18	0.9974	2.14x10 <sup>-4</sup>	-0.31	0.026	0.9992	6.59x10 <sup>-5</sup>
60	0.6	0	1.04	0.49	0.9928	6.03x10 <sup>-4</sup>	0.38	1.17	0.9984	1.33x10 <sup>-4</sup>	-0.35	0.033	0.9995	3.82x10 <sup>-5</sup>
	0.6	20	1.06	0.55	0.9904	9.23x10 <sup>-4</sup>	0.48	1.23	0.9986	1.35x10 <sup>-4</sup>	-0.44	0.054	0.9976	2.27x10 <sup>-4</sup>
	1.2	0	1.01	0.56	0.9959	2.04x10 <sup>-4</sup>	0.53	1.07	0.9998	1.04x10 <sup>-4</sup>	-0.45	0.059	0.9996	2.08x10 <sup>-4</sup>
	1.2	20	1.06	0.55	0.9880	1.02x10 <sup>-3</sup>	0.43	1.26	0.9987	1.15x10 <sup>-4</sup>	-0.41	0.045	0.9963	3.18x10 <sup>-4</sup>

Henderson & Pabis:  $MR=A \cdot \exp(-kt)$ ; Page:  $MR=\exp(-kt^n)$ ; Wang & Singh:  $MR=1+at+bt^2$

Para identificar la contribución de las variables (temperatura, velocidad del aire y rotación de charolas) a la constante de velocidad ( $k$ ), para las curvas obtenidas de los modelos de Henderson & Pabis y Page, se realizó un análisis de varianza mixto. Con este análisis se pudo observar que los valores de la constante  $k$  están estrechamente relacionados con la temperatura, ya que es el factor que tiene una mayor contribución.

La rotación de charolas no presentó una contribución importante; sin embargo el análisis estadístico mostró que la combinación de la temperatura, la velocidad de aire y la rotación de charolas influyen significativamente en el valor de la constante  $k$ . En el modelo de Henderson & Pabis la contribución de la combinación de las variables fue del 2 % (Apéndice E); mientras que para el modelo de Page del 12.8 %, Tabla 11.

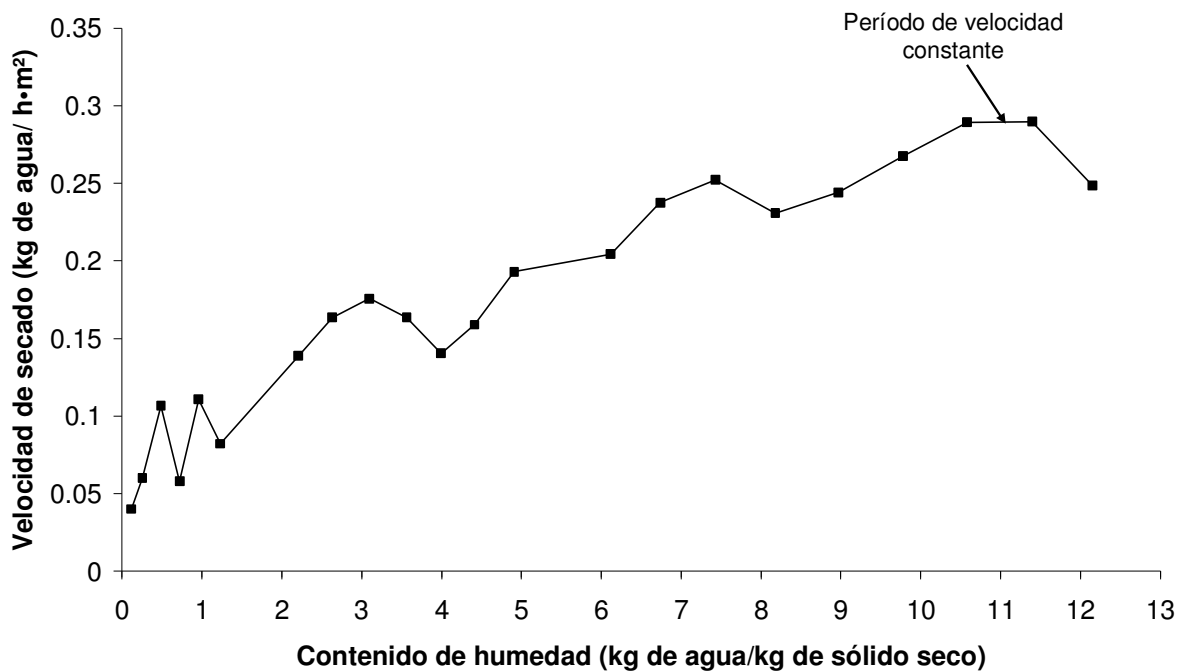
El modelo de Henderson & Pabis tuvo el menor ajuste con los datos experimentales, lo cual puede atribuirse a que el modelo no es sensible a la rotación de charolas. Los resultados anteriores coinciden con las afirmaciones de Khattab *et al.*, (1997) quienes encontraron que la constante  $k$  además de estar en función de la temperatura, humedad específica y velocidad del aire, también está en función de las coordenadas en el espacio, es decir de la posición de las charolas con respecto al tiempo. En el modelo de Wang & Singh se encontró que las constantes  $a$  y  $b$  no dependen directamente de la rotación de charolas. Sin embargo, la combinación de las variables de operación (temperatura, velocidad de aire y rotación de charolas) tuvieron una contribución mayor en el valor de  $b$  (13.8 %) que en el valor de  $a$  (1.7 %).

**Tabla 11.** Análisis de varianza de la constante de velocidad ( $k$ ) del modelo de Page.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	F	% de contribución
Modelo	0.3	11	0.03	638.8	
A. Temperatura	0.2	2	0.1	2965.2	83.2
B. Velocidad del aire	$4.1 \times 10^{-3}$	1	$4.1 \times 10^{-3}$	92.7	2.6
C. Rotación	$2.4 \times 10^{-3}$	1	$2.4 \times 10^{-6}$	0.05	$1.5 \times 10^{-3}$
AB	$3.4 \times 10^{-3}$	2	$1.7 \times 10^{-3}$	37.7	1.1
AC	$6.4 \times 10^{-4}$	2	$3.2 \times 10^{-4}$	7.2	0.2
BC	$5.2 \times 10^{-6}$	1	$5.2 \times 10^{-6}$	0.1	$3.4 \times 10^{-3}$
ABC	$4.1 \times 10^{-2}$	2	$2.0 \times 10^{-2}$	456.9	12.8
Error	$1.1 \times 10^{-3}$	24	$4.5 \times 10^{-5}$		

### 4.3 Velocidad de secado

**4.3.1 Evaluación del período de velocidad constante.** A partir del análisis de las curvas de secado se encontró un período corto de velocidad constante entre los 15 y 30 min, Figura 23. En estudios reportados por otros autores (Sacilik *et al.*, 2006; Rajkumar *et al.*, 2007) no observaron este período. Lo cual se debe principalmente a que las lecturas de pérdida de peso se realizaron cada 30 min. Mientras que en el presente trabajo estas lecturas se realizaron en intervalos de 15 min. Por otra parte en el 2004 Lewicki *et al.*, al deshidratar tomate pretratado con  $\text{CaCl}_2$  a  $60\text{ }^\circ\text{C}$  en un secador de charolas, al igual que en el presente trabajo, observaron que existe un período de velocidad constante corto.



Los puntos representan el contenido de humedad cada 15 min. y el desarrollo del secado procede de derecha a izquierda.

**Figura 23.** Curva de velocidad de secado a  $45\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0.6\text{ m/s}$  y rotación de charolas.

El valor de  $R_c$  se calculó a partir de la Ecuación 8 y los valores de  $X_c$  y  $t_c$  de las curvas de velocidad de secado. A partir de esos valores se obtuvieron isotermas, utilizadas para determinar el

comportamiento del secado durante este período, Figura 24.

$$R_c = W_s \frac{(X_c - X)}{A \cdot t_c} \quad (8)$$

Donde:

$R_c$  = Velocidad de secado en el período constante (kg agua/h·m<sup>2</sup>)

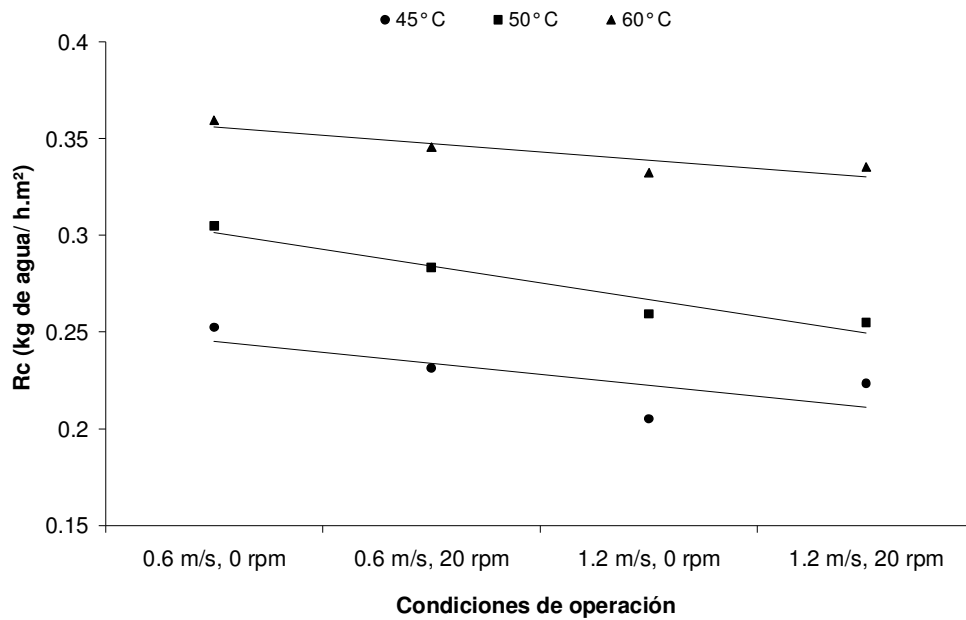
$W_s$  = Peso del sólido seco (kg de sólido seco)

$A$  = Área superficial expuesta (m<sup>2</sup>)

$X_c$  = Contenido de humedad en el período de velocidad constante (kg de agua/kg de sólido seco)

$X$  = Humedad libre (kg de agua/kg de sólido seco)

$t_c$  = Tiempo en el período de velocidad constante



**Figura 24.** Isotermas de secado en el período de velocidad constante.

A 60 °C se observa que la velocidad de secado  $R_c$  es mayor que a 45 y 50°C, tal como se esperaba. La rotación de charolas no tuvo un efecto significativo sobre el valor de la constante de secado  $R_c$  a un nivel de significancia del 0.05%, Tabla 12.

**Tabla 12.** Análisis de varianza de las velocidades en el período constante ( $R_c$ ).

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor de F	% de contribución
Modelo	$9.0 \times 10^{-2}$	11	$8.2 \times 10^{-3}$	68.7	
A.Temperatura	$8.0 \times 10^{-2}$	2	$4.0 \times 10^{-2}$	337.7	81.5
B. Velocidad de aire	$6.9 \times 10^{-3}$	1	$6.9 \times 10^{-3}$	57.9	14.0
C. Rotación	$4.0 \times 10^{-4}$	1	$4.0 \times 10^{-4}$	3.3	0.8
AB	$5.0 \times 10^{-4}$	2	$2.4 \times 10^{-4}$	2.1	0.5
AC	$2.0 \times 10^{-4}$	2	$1.0 \times 10^{-4}$	0.9	0.2
BC	$1.3 \times 10^{-3}$	1	$1.3 \times 10^{-3}$	11.2	2.7
ABC	$3.0 \times 10^{-4}$	2	$1.3 \times 10^{-4}$	1.1	0.3
Error	$2.9 \times 10^{-3}$	24	$1.2 \times 10^{-4}$		

**4.3.2. Evaluación del período de velocidad decreciente.** El análisis en el período de velocidad decreciente es muy importante, ya que es el que predomina en las curvas de secado de tomate. Las difusividades efectivas ( $D_{eff}$ ) se calcularon para cada una de las condiciones de secado establecidas en la Tabla 7. Los mecanismos de difusión en estado estacionario se pueden resolver a partir de la segunda ley de Fick. Para el caso de difusión en estado no estacionario Crank describió la Ecuación 9, la cual puede aplicarse para la transferencia de masa en el período de velocidad decreciente. La  $D_{eff}$  se determinó con la pendiente de la curva de  $\ln(MR)$  vs tiempo, Figura 25, se obtuvo la pendiente de la recta la cual es análoga a la ecuación 10, por lo que a partir de ella despejó el valor de la  $D_{eff}$ .

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad (9)$$

$$\text{pendiente} = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (10)$$

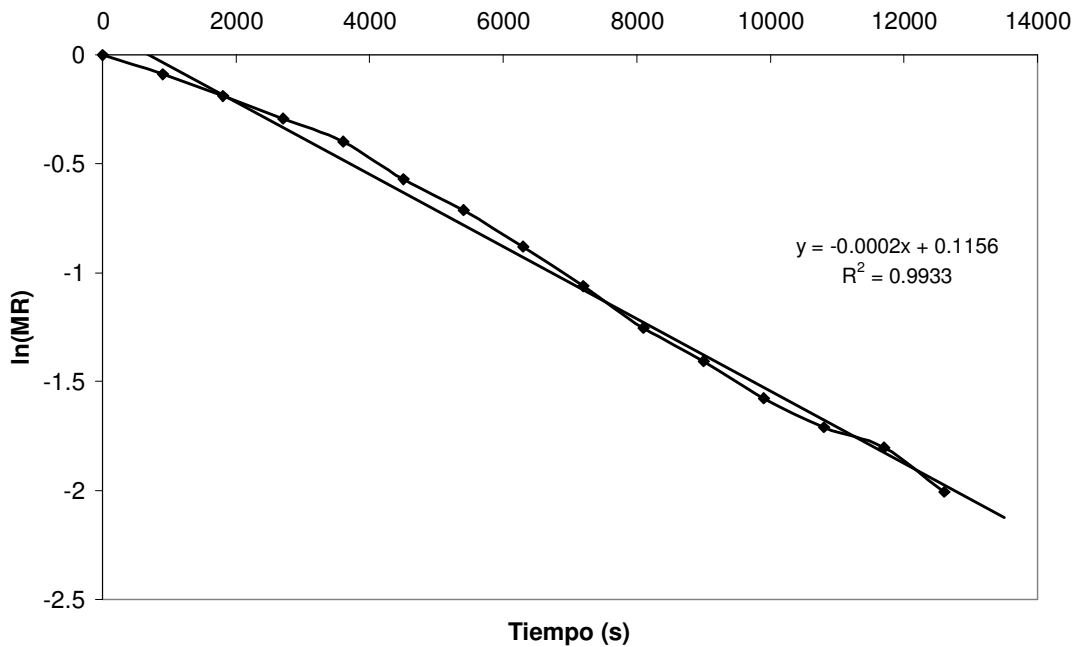
Donde:

$D_{eff}$  = Difusividad efectiva ( $m^2/s$ )

L = Grosor de la rebanada (m)

En el 2008, Khazaei *et al.* encontraron valores de  $D_{eff}$  de  $5.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  para rebanadas de tomate de 7 mm deshidratadas a una temperatura de  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . En el 2006, Sacilik *et al.*, al deshidratar mitades de tomate obtuvieron  $D_{eff}$  de  $1.31 \times 10^{-9}$  a  $1.07 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , valores muy cercanos a los obtenidos en el presente trabajo de  $1.35 \times 10^{-9}$  a  $2.42 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , Tabla 13. Las similitudes entre los valores de las  $D_{eff}$  obtenidas y los reportados por Sacilik *et al.* (2006) se debe al uso del pretratamiento con sales, lo cual se ha reportado que contribuye al incremento de la  $D_{eff}$ , favorecido por el aumento del efecto osmótico.

Los resultados de  $D_{eff}$  obtenidas en el presente trabajo muestran que existe una dependencia de la temperatura, seguida del efecto de la rotación de charolas, mientras que la velocidad del aire tiene la menor contribución. A una temperatura de  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $0.6 \text{ m/s}$  la rotación tuvo el efecto más importante, hay un incremento del 19.3 % en el valor de la  $D_{eff}$  atribuido al uso de la rotación de charolas.



**Figura 25.** Gráfica de  $\ln(MR)$  en función del tiempo de secado a  $60^\circ\text{C}$ ,  $1.2 \text{ m/s}$  y  $20 \text{ rpm}$ .



**Tabla 13.** Valores de  $D_{\text{eff}}$  para el tomate deshidratado.

Temperatura (°C)	Velocidad (m/s)	Rotación (rpm)	$D_{\text{eff}} \times 10^{-9}$ (m <sup>2</sup> /s)
45	0.6	0	1.36
		20	1.50
	1.2	0	1.41
		20	1.61
50	0.6	0	1.79
		20	1.84
	1.2	0	1.91
		20	1.91
60	0.6	0	2.10
		20	2.57
	1.2	0	2.38
		20	2.42

El efecto de la temperatura sobre la difusividad del agua se obtuvo usando la expresión de Arrhenius, Ecuación 11. En la Figura 26, se observa la dependencia de la  $D_{\text{eff}}$  con respecto a la temperatura a cada una de las condiciones establecidas en el trabajo. A partir de la gráfica se obtuvieron las pendientes y se calculó el valor de  $E_a$  con la Ecuación 12. Los valores de  $E_a$  fueron de 24.72 a 31.30 kJ/mol, Tabla 14. Estas  $E_a$  fueron similares a las encontradas por Khazaei *et al.*, (2008), quienes reportaron  $E_a$  de 21.3 a 23.4 kJ/mol, y Doymaz (2007) describió  $E_a$  de 17.40 a 32.94 kJ/mol.

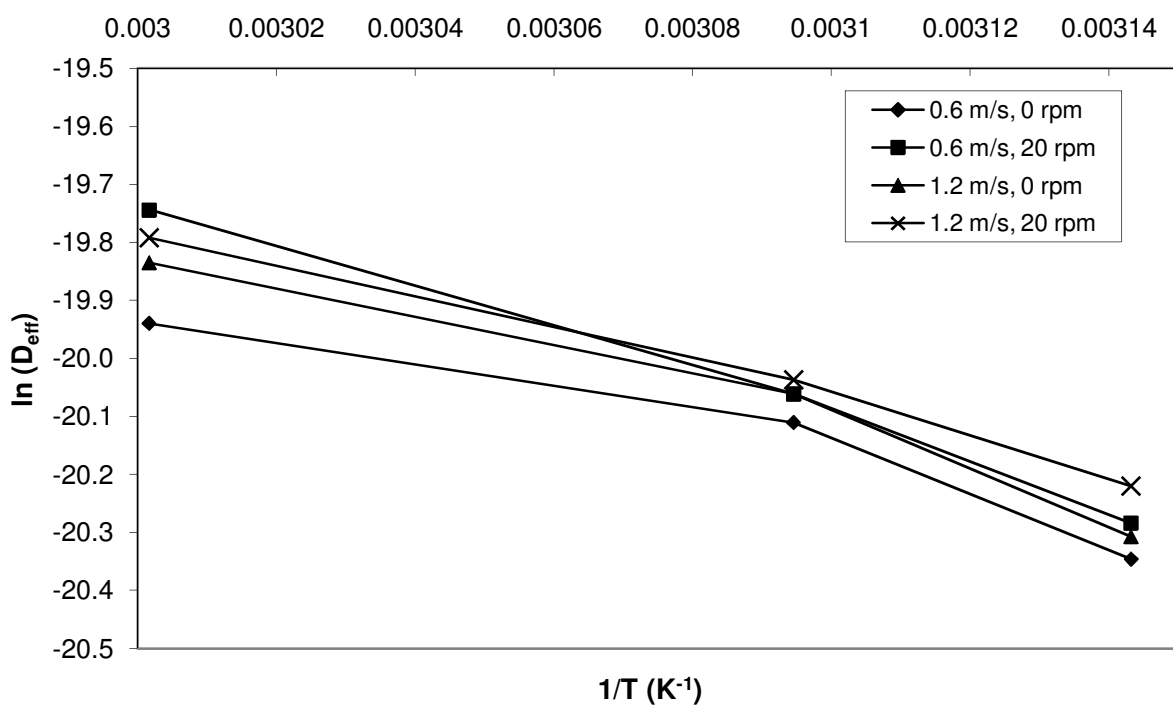
$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (11)$$

$$\ln(D_{\text{eff}}) = \frac{E_a}{R} \times \frac{1}{T_{\text{abs}}} \quad (12)$$

Los resultados de la  $E_a$ , son muy dependientes de la temperatura y no presentaron correlación con la rotación de charolas.

**Tabla 14.** Valores de  $E_a$  para el tomate saladette deshidratado.

Velocidad de aire (m/s)	Rotación de charolas (rpm)	$E_a$ (kJ/mol)	$R^2$
0.6	0	24.97	0.9286
	20	31.30	0.9938
1.2	0	28.66	0.9592
	20	24.73	0.9907

**Figura 26.** Relación de Arrhenius entre la difusividad efectiva y el recíproco de la temperatura absoluta.

## 4.4 Color

El color del tomate es uno de los parámetros de calidad más apreciados, por lo cual resultó importante determinar las variaciones en el color de las rebanadas de tomate al someterlas a un proceso de deshidratado. En la Tabla 15, se muestran los parámetros de color para las rebanadas de tomate deshidratadas a las diferentes condiciones de secado.

Shi *et al.* (1999) observaron que existe oscurecimiento durante el proceso de secado a temperaturas altas (90°C). Los valores obtenidos en este trabajo muestran que no existió un oscurecimiento importante de las rebanadas de tomate. El oscurecimiento máximo detectado fue del 9.7 % a 50°C, 1.2 m/s y sin rotación de charolas. Por otra parte Kherkofs *et al.* (2005) encontraron un oscurecimiento del 26.7% a 42°C y 1.5 m/s.

**Tabla 15.** Valores de color para rebanadas de tomate deshidratado.

Tratamiento			L*	a*	b*	C	h°
T (°C)	Vel. (m/s)	Rot. (rpm)					
45	0.6	0	34.01 ± 0.60 <sup>a</sup>	19.68 ± 0.36 <sup>a</sup>	28.04 ± 1.12 <sup>a</sup>	34.25 ± 0.67 <sup>a</sup>	54.93 <sup>a</sup>
		20	35.59 ± 1.12 <sup>ab</sup>	19.41 ± 0.87 <sup>a</sup>	27.93 ± 1.32 <sup>a</sup>	34.01 ± 1.05 <sup>a</sup>	55.20 <sup>a</sup>
	1.2	0	37.15 ± 0.38 <sup>b</sup>	21.09 ± 0.85 <sup>a</sup>	27.94 ± 1.15 <sup>a</sup>	35.00 ± 1.00 <sup>b</sup>	52.95 <sup>b</sup>
		20	35.56 ± 0.46 <sup>ab</sup>	21.85 ± 1.00 <sup>b</sup>	28.08 ± 0.43 <sup>a</sup>	35.58 ± 0.72 <sup>b</sup>	52.11 <sup>b</sup>
50	0.6	0	34.31 ± 1.21 <sup>a</sup>	18.70 ± 0.78 <sup>a</sup>	27.57 ± 0.99 <sup>a</sup>	33.31 ± 0.95 <sup>a</sup>	55.85 <sup>a</sup>
		20	33.89 ± 1.05 <sup>a</sup>	20.77 ± 0.56 <sup>a</sup>	27.12 ± 0.45 <sup>b</sup>	34.16 ± 0.89 <sup>b</sup>	52.55 <sup>b</sup>
	1.2	0	33.77 ± 1.08 <sup>a</sup>	17.59 ± 0.35 <sup>a</sup>	27.87 ± 0.37 <sup>a</sup>	32.96 ± 0.34 <sup>a</sup>	57.74 <sup>c</sup>
		20	34.04 ± 1.20 <sup>a</sup>	18.78 ± 0.81 <sup>a</sup>	27.78 ± 0.89 <sup>c</sup>	35.53 ± 0.81 <sup>a</sup>	55.94 <sup>a</sup>
60	0.6	0	36.31 ± 0.73 <sup>a</sup>	20.62 ± 0.94 <sup>a</sup>	29.90 ± 0.78 <sup>a</sup>	36.32 ± 0.79 <sup>a</sup>	55.41 <sup>a</sup>
		20	34.84 ± 1.21 <sup>ab</sup>	20.67 ± 0.40 <sup>a</sup>	29.53 ± 0.53 <sup>a</sup>	36.05 ± 0.51 <sup>a</sup>	55.00 <sup>a</sup>
	1.2	0	34.12 ± 0.90 <sup>ab</sup>	20.49 ± 0.61 <sup>a</sup>	29.05 ± 0.20 <sup>a</sup>	35.55 ± 0.42 <sup>a</sup>	54.80 <sup>a</sup>
		20	34.85 ± 1.28 <sup>b</sup>	20.56 ± 0.31 <sup>a</sup>	29.63 ± 0.86 <sup>a</sup>	36.06 ± 0.53 <sup>a</sup>	55.24 <sup>a</sup>

Valores del tomate fresco: L\* = 37.52, a\* = 18.18 y b\* = 15.37. Los valores con letras diferentes presentan diferencia significativa a un nivel de significancia de 0.05%, para rebanadas deshidratadas a la misma temperatura.

Respecto a los cambios en el color rojo, no existieron variaciones importantes con respecto al color del tomate fresco expresado como a\*. Sin embargo el valor de b\* presenta una diferencia sustancial, lo cual nos indica que el color de las rebanadas de tomate tiende hacia el color naranja,

después del deshidratado. En la Figura 27, se observan rebanadas de tomate deshidratadas a 60°C, 0.6 m/s y 20 rpm.

Se realizó un análisis de varianza para evaluar el efecto de las variables de operación sobre los valores de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . El análisis estadístico mostró que la rotación no tuvo influencia sobre los parámetros de color  $L^*$  y  $b^*$  (Apéndice F); mientras que la rotación de charolas presentó una contribución del 7.0% sobre el valor de  $a^*$ , Tabla 16. El análisis también arrojó que la combinación de la rotación de charolas y velocidad de aire contribuyeron en 12.7 % al valor de  $a^*$ .



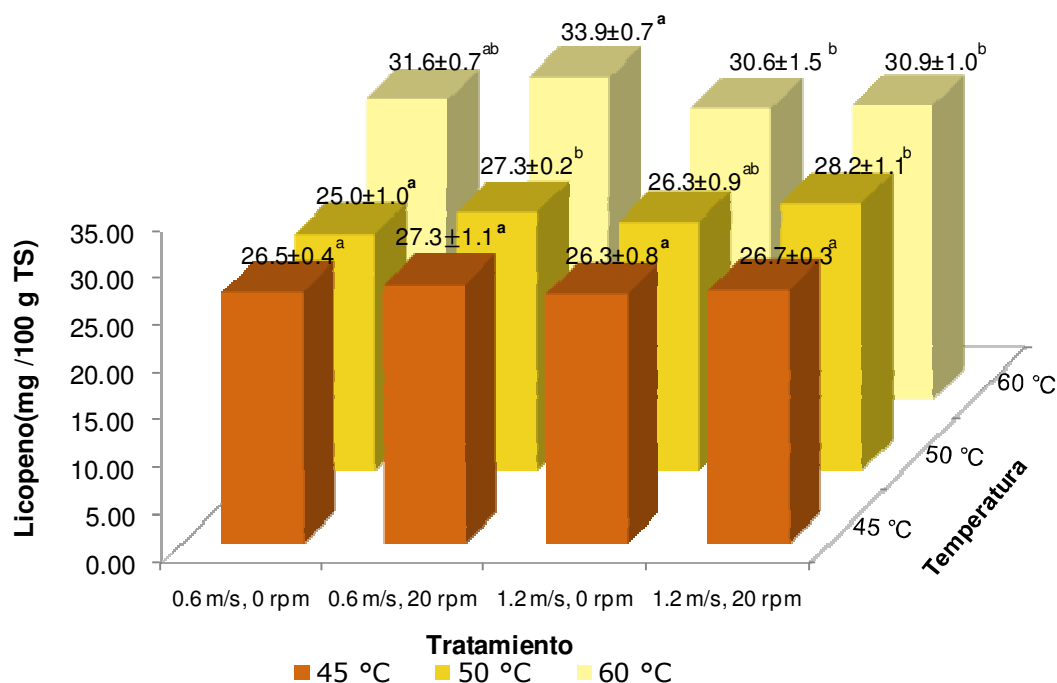
**Figura 27.** Rebanadas de tomate saladette deshidratado a 60°C, 0.6 m/s y 20 rpm.

**Tabla 16.** Análisis de varianza del valor de  $a^*$ .

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	% de contribución
Modelo	61.6	11	5.6	10.5	
A. Temperatura	38.6	2	19.3	36.3	54.0
B. Velocidad	3.1	1	3.1	5.8	8.7
C. Rotación	2.5	1	2.5	4.7	7.0
AB	6.9	2	3.5	6.5	9.71
AC	3.3	2	1.6	3.1	4.6
BC	4.5	1	4.5	8.5	12.7
ABC	2.7	2	1.4	2.6	3.81
Error	12.8	24	0.5		

## 4.5 Licopeno

El contenido de licopeno se midió en las rebanadas de tomate fresco y de tomate deshidratado. Los valores encontrados en el tomate fresco fueron de  $34.9 \pm 0.15$  mg/100 g TS, mientras que en el tomate deshidratado de  $25.0 \pm 1.0$  a  $33.9 \pm 0.7$  mg/100 g TS. En las rebanadas de tomate deshidratadas a  $50^\circ\text{C}$ ,  $0.6$  m/s y sin rotación de charolas se encontraron pérdidas de licopeno del 28.3%, Figura 28.



Los valores con letras diferentes presentan diferencia significativa a un nivel de 0.05 %, para rebanadas de tomate deshidratadas a la misma temperatura.

**Figura 28.** Concentración de licopeno en rebanadas de tomate saladette deshidratado.

Zanoni *et al.* (1999) reportaron pérdidas de licopeno pequeñas del 12% al deshidratar tomate a  $110^\circ\text{C}$ . Por otro lado Kerkhofs *et al.* (2005) afirman que a bajas temperaturas ( $42 \pm 0.3^\circ\text{C}$ ) había un aumento en la concentración de licopeno, lo cual atribuyeron a que a esas condiciones se promovía una mejor liberación del licopeno.

El análisis estadístico mostró que la temperatura es el factor de mayor contribución en la

variación del contenido de licopeno (62.2%). La rotación también afectó de manera importante (23.1%), Tabla 17. Esto se debe a que en ausencia de rotación, las rebanadas colocadas en la parte inferior de la cámara de secado se exponen a un mayor calentamiento que en un sistema rotatorio y esto provoca la degradación del licopeno.

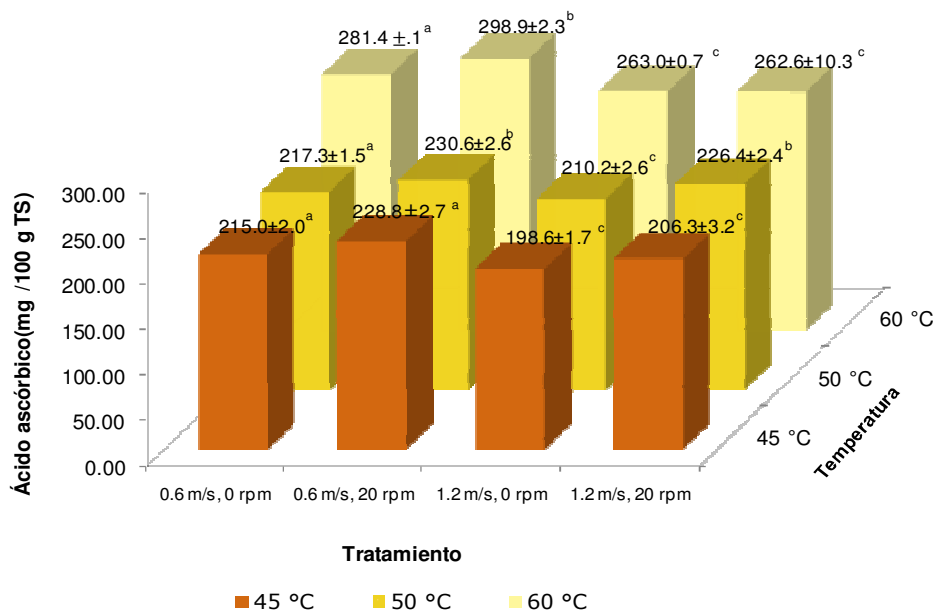
Para evaluar diferencias significativas en el contenido de licopeno atribuidas a variaciones en la velocidad del aire y rotación de charolas, se realizó una prueba de intervalos múltiple de Duncan en las rebandas de tomate deshidratadas a una temperatura constante. El análisis reveló que a 45 °C no existe diferencia significativa en el contenido de licopeno. Cuando el secado se llevó a cabo a 50 °C, las concentraciones más altas se encontraron cuando se empleó la rotación de charolas, por lo que a esta temperatura la rotación de charolas fue determinante. Las concentraciones de licopeno más altas se encontraron a 60 °C y a esta temperatura la rotación de charolas no contribuyó significativamente.

**Tabla 17.** Análisis de varianza del contenido de licopeno en rebanadas de tomate deshidratado.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	% de contribución
Model	181.18	11	16.47	6.73	
A. Temperatura	141.49	2	70.75	28.90	62.2
B. Velocidad del aire	0.09	1	0.09	0.04	0.1
C. Rotación	26.27	1	26.27	10.73	23.1
AB	4.86	2	2.43	0.99	2.1
AC	6.19	2	3.09	1.26	2.7
BC	6.63	1	6.63	2.71	5.8
ABC	8.98	2	4.49	1.83	4.0
Error	58.75	24	2.45		

## 4.6 Ácido ascórbico

El ácido ascórbico se determinó en las rebanadas de tomate fresco y de tomate deshidratado a las diferentes condiciones de secado. El contenido de este compuesto en el tomate fresco fue de  $360.7 \pm 1.1$  mg/100 g TS, mientras que en el tomate deshidratado fue de  $217.3 \pm 1.5$  a  $298.9 \pm 2.3$  mg/100 g TS, Figura 29.



Los valores con letras diferentes presentan diferencia significativa a un nivel de 0.05 %, para rebanadas de tomate deshidratadas a la misma temperatura.

**Figura 29.** Concentración de ácido ascórbico en rebanadas de tomate saladette deshidratado.

En las muestras deshidratadas a 45 °C, 1.2 m/s y con rotación de charolas se detectó una pérdida máxima de 45.2% de ácido ascórbico. En el 2005 Kherkofs *et al.*, encontraron una disminución de hasta el 75% en una de las variedades (Flavourine) empleadas para el deshidratado a 42 °C. Zanoni *et al.*, (2000) determinaron que a una temperatura de 110 °C y después de 160 min ya no se detectaba el ácido ascórbico. Giovanelli *et al.*, (2002) reportaron que el deshidratado de mitades de tomate a 60 °C y 1.5 m/s genera una degradación del 87.9% del ácido ascórbico. La temperatura es el factor que más afecta el contenido de ácido ascórbico; no obstante los tiempos de secado prolongados del tomate también promueven la disminución de la concentración de este constituyente. Aún a temperaturas relativamente bajas, tal como sucedió en el presente trabajo.

Para evaluar la contribución del tiempo sobre al contenido de ácido ascórbico se realizó una correlación de Pearson y se encontró que existe una correlación de -0.82. Esto indica que a mayor tiempo de secado hay una mayor disminución en el contenido de ácido ascórbico.

La temperatura fue el factor con la mayor contribución (72.0%) sobre el contenido de ácido ascórbico, seguida de la velocidad del aire (21.1%) y la rotación de charolas (2.5%). Todas las variables presentaron diferencia significativa a un nivel de 0.05%, Tabla 18.

**Tabla 18.** Análisis de varianza del contenido de ácido ascórbico en rebanadas de tomate deshidratado.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	% de contribución
Modelo	32299.41	11	2936.31	85.56	
A. Temperatura	26519.05	2	13259.53	386.37	72.0
B. Velocidad del aire	3890.30	1	3890.30	113.36	21.1
C. Rotación	463.96	1	463.96	13.52	2.5
AB	1049.79	2	524.89	15.29	2.9
AC	289.29	2	144.64	4.21	0.8
BC	3.74	1	3.74	0.11	0.02
ABC	279.39	2	139.69	4.07	0.8
Error	823.63	24	34.32		

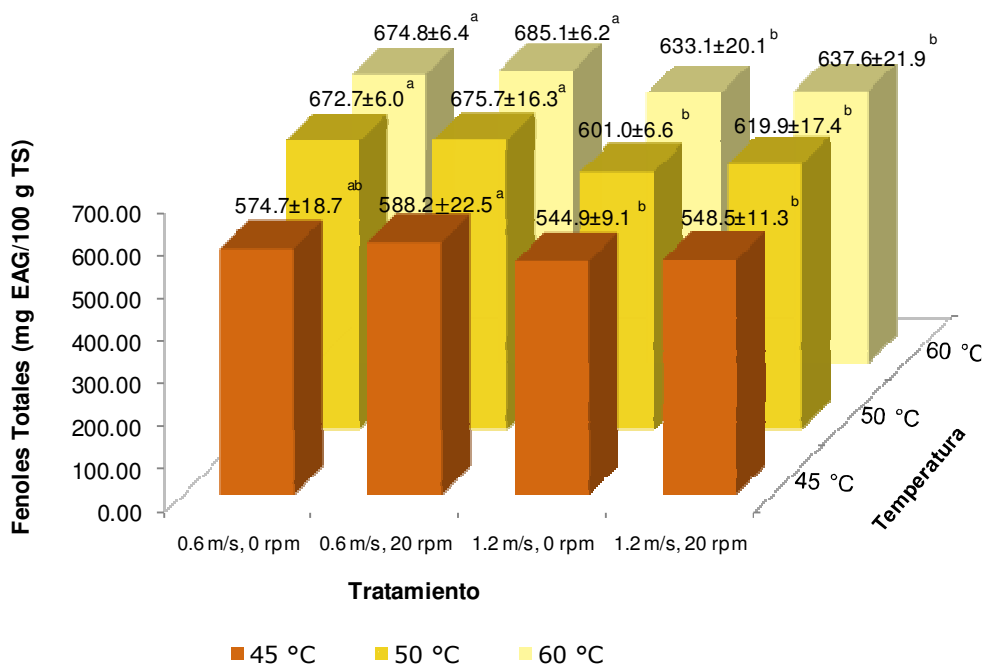
La prueba de Duncan mostró que a 45 °C, la rotación de charolas no influyó en el contenido de ácido ascórbico. En el caso de las rebanadas deshidratadas a 50 °C, se observó que la rotación de charolas si fue importante ya que se redujo la degradación del ácido ascórbico con el uso de la rotación de charolas. A 60°C la rotación de charolas sólo fue importante cuando el secado se realizó con flujos de aire de 0.6 m/s, Figura 26.

## 4.7 Fenoles totales

Los fenoles totales encontrados en el tomate fresco fueron de  $699.81 \pm 14.91$  mg EAG/ 100 g TS. Las concentraciones de fenoles totales en tomate fresco son altas y parecidas a las reportadas por Kerkhofs *et al.*, en el 2005, quienes obtuvieron  $682.1 \pm 9.3$  y  $568.2 \pm 21.7$  mg EAG/ 100 g TS en tres variedades de tomate de Nueva Zelanda. Las concentraciones en el tomate deshidratado fueron de  $548.52 \pm 11.32$  a  $685.10 \pm 6.17$  mg EAG/ 100 g TS, Figura 30. La disminución del contenido de fenoles totales fue de 21.6%, cuando el secado se llevó a cabo a 45 °C, 1.2 m/s y sin rotación de charolas. Mientras que a 60 °C, 1.2 m/s y sin rotación de charolas la pérdida máxima fue de 9.5% y cuando se empleó rotación de charolas y un flujo de aire de 0.6 m/s se encontró



que la pérdida fue apenas del 2.1%.



Los valores con letras diferentes presentan diferencia significativa a un nivel de 0.05%, para rebanadas de tomate deshidratadas a la misma temperatura

**Figura 27.** Concentración de fenoles totales en rebanadas de tomate saladette deshidratado.

Kerkhofs *et al* (2005) reportaron una pérdida de fenoles totales del 33.4% en la variedad Flavourine. Otros autores reportan que no existe pérdida en el contenido de fenoles totales (Dewanto *et al*, 2002; Chang *et al*, 2006). Re *et al*. (2002) explicaron este comportamiento al identificar y cuantificar fenoles presentes en una variedad de tomate del Mediterraneo. Ellos observaron que al someter el tomate a un proceso térmico la concentración de algunos fenoles como el ácido clorogénico, ácido cafeíco y el ácido *p*-cumárico aumentan, mientras que la rutina, el ácido ferúlico y la narangenina disminuyen con el proceso de calentamiento. Lo anterior explica porque no se observa una disminución en el contenido total de fenoles ya que algunos disminuyeron su concentración mientras que otros la aumentaron.

El análisis de varianza mixto mostró que la temperatura y la velocidad del aire son los factores con diferencia significativa a un nivel de 0.05% y por lo tanto obtuvieron una contribución

importante sobre los fenoles totales, Tabla 19.

La prueba de Duncan arrojó que para todas las temperaturas (45, 50 y 60 °C) la rotación de charolas no presenta diferencia significativa a un nivel del 0.05%, sobre la concentración de fenoles totales.

**Tabla 19.** Análisis de varianza del contenido de fenoles totales en rebanadas de tomate deshidratado.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	% de contribución
Modelo	83275.80	11	7570.53	22.53	
A. Temperatura	60466.32	2	30233.16	89.96	50.6
B. Velocidad del aire	20476.72	1	20476.72	60.93	34.2
C. Rotación	722.39	1	722.39	2.15	1.2
AB	1303.33	2	651.66	1.94	1.1
AC	19.11	2	9.55	0.03	0.02
BC	0.02	1	0.02	0.00	4x10 <sup>-5</sup>
ABC	287.91	2	143.96	0.43	0.2
Error	8065.81	24	336.08		

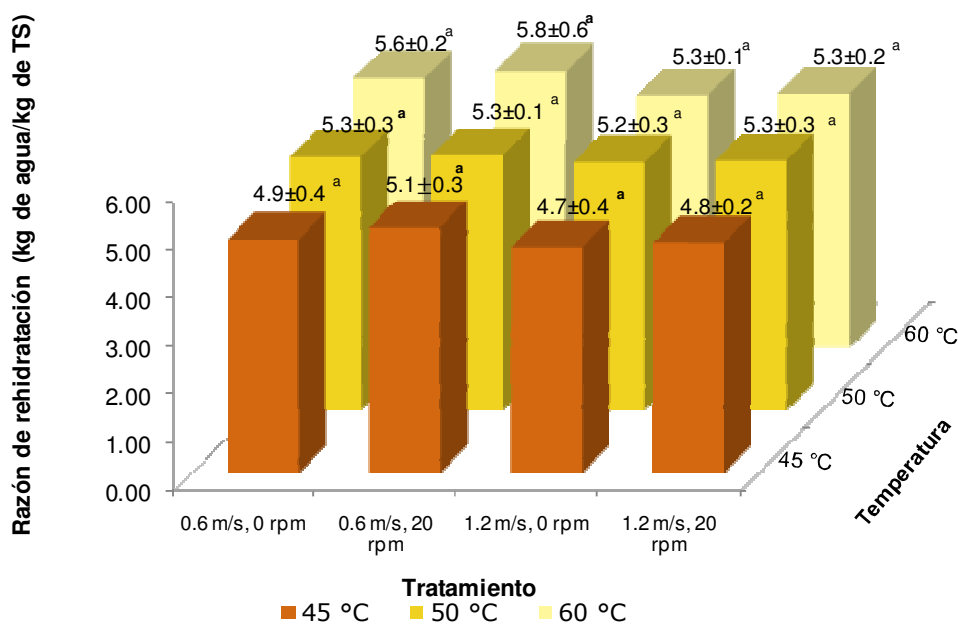
#### 4.8 Razón de rehidratación

La razón de rehidratación para el secado a 60 °C fue más alta que a 45 °C con valores entre 5.77 a 5.33 kg de agua/kg de TS y de 5.1 a 4.7 kg de agua/kg de TS, respectivamente, Figura 31 . La rehidratación de las rebanadas de tomate se evaluó a diferentes tiempos (20, 30, 40, 50, 60 y 1440 min) encontrándose que a 50 min se alcanzaban la máxima rehidratación. Los valores hallados fueron más altos que los reportados por Doymaz en el 2007, quien describe valores menores a 4.5 kg de agua/kg de TS. En otro estudio realizado por Rajkumar *et al.*, (2007a), reportaron valores entre 3.24 y 2.95 kg de agua/kg de TS cuando se realizó el secado al sol. Estos autores atribuyen la baja capacidad de rehidratación a los tiempos prolongados de secado. Lo anterior concuerda con los datos obtenidos en este trabajo ya que a tiempos prolongados de secado el valor de la rehidratación disminuye, se halló una correlación de Pearson de -0.81 entre la razón de rehidratación vs tiempo.

Al igual que en los fenoles totales, en la razón de rehidratación las variables con mayor contribución fueron la temperatura y la velocidad del aire. La rotación de charolas es la variable

con menor influencia sobre este valor y no presenta diferencia significativa a un nivel de 0.05%, Tabla 20.

El análisis de Duncan reveló que a un nivel de significancia de 0.05 % la razón de rehidratación no presenta diferencia significativa entre los diferentes tratamientos a temperatura constante.



Los valores con letras diferentes presentan diferencia significativa a un nivel de 0.05 %

**Figura 31.** Razón de rehidratación en rebanadas de tomate saladette deshidratado.

**Tabla 20.** Análisis de varianza de la razón de rehidratación en rebanadas de tomate deshidratado.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F <sub>0</sub>	% de contribución
Modelo	3.47	11	0.32	2.30	
A. Temperatura	2.51	2	1.25	9.13	59.0
B. Velocidad del aire	0.65	1	0.65	4.77	30.8
C. Rotación	0.11	1	0.11	0.79	5.1
AB	0.15	2	0.07	0.53	3.4
AC	0.04	2	0.02	0.14	0.9
BC	0.01	1	0.01	0.09	0.6
ABC	0.01	2	0.00	0.02	0.1
Error	3.29	24	0.14		

## 4.9 Análisis de PLS para las correlaciones lineales entre variables físicas, químicas y termodinámicas

El análisis de mínimos cuadrados parciales (PLS) es un método muy usado cuando se requiere correlacionar múltiples variables.

El análisis de PLS, para correlacionar las variables químicas vs físicas, muestra que el contenido de licopeno y de ácido ascórbico tienen una buena correlación con el valor de  $a^*$ , Tabla 21. Esto indica que el valor de  $a^*$  está directamente relacionado con la concentración de licopeno, pero además se evidenció una dependencia del licopeno de la concentración de ácido ascórbico. Consecuentemente el color rojo ( $a^*$ ) depende tanto del licopeno, como del ácido ascórbico.

**Tabla 21.** Análisis de PLS de las variables químicas vs físicas.

Variables químicas	Variables físicas		
	Razón de rehidratación	$L^*$	$a^*$
Fenoles totales	0.79	-0.04	0.66
Licopeno	0.68	0.09	0.90
Ácido ascórbico	0.82	0	0.91

El análisis de las correlaciones entre las propiedades termodinámicas vs físicas mostró que el valor de  $a^*$  y la razón de rehidratación tienen una correlación considerable (0.8 y 0.65) con el tiempo, la  $D_{\text{eff}}$  y constante  $k$  de Page. El valor de  $L^*$  no presentó buena correlación con ninguna de las variables termodinámicas, Tabla 22.

**Tabla 22.** Análisis de PLS de las variables termodinámicas vs físicas.

Variables físicas	Variables termodinámicas			
	$t$	$k$ (Page)	$D_{\text{eff}}$	$E_a$
Razón de rehidratación	-0.76	0.65	0.77	0.14
$L$	0.24	-0.22	-0.23	-0.01
$a^*$	-0.72	0.8	0.75	-0.14

En cuanto a la correlación de las variables termodinámicas con las químicas se observa que todas las variables termodinámicas, excepto la  $E_a$ , tienen una buena correlación con las variables químicas, Tabla 23.

**Tabla 23.** Análisis de PLS de las variables termodinámicas vs químicas.

Variables químicas	Variables termodinámicas			
	t	k (Page)	$D_{eff}$	$E_a$
Fenoles totales	-0.81	0.73	0.82	0.09
Licopeno	-0.8	0.79	0.83	0.16
Ácido ascórbico	-0.82	0.82	0.85	0.16

El análisis de PLS permitió observar que el tiempo tuvo una correlación negativa muy fuerte con la constante k de Page (-0.90) y la  $D_{eff}$  (-0.98), mientras que la  $E_a$  y  $L^*$  no tienen correlación. El resto de las variables estudiadas tuvieron una correlación negativa considerable con el tiempo, Tabla 24.

**Tabla 24.** Análisis de PLS de las variables estudiadas vs tiempo.

Variables	Tiempo
Fenoles totales	-0.81
Licopeno	-0.80
Ácido ascórbico	-0.82
Razón de rehidratación	-0.76
$L^*$	0.24
$a^*$	-0.72
k (Page)	-0.9
$D_{eff}$	-0.98
$E_a$	-0.02

## 5. CONCLUSIONES

---

La rotación de charolas tuvo una contribución importante sobre  $a^*$  (7%), licopeno (23.1%) y ácido ascórbico (2.5%), a un nivel de significancia del 5%.

Las concentraciones de ácido ascórbico se conservan mejor cuando se emplea la rotación de charolas y usando temperaturas de 45 y 50 °C.

Los fenoles totales se afectaron por la velocidad del aire, mientras que la capacidad de rehidratación no dependió de las condiciones de operación utilizadas en el presente trabajo.

La incorporación de la rotación de charolas permitió disminuir la variación de temperatura dentro de la cámara de secado desde 2 °C hasta 0.2 °C.

Los tiempos de secado de tomate fueron afectados por las variables de operación de la siguiente manera: temperatura > rotación de charolas > velocidad del aire.

Los tres modelos matemáticos utilizados para representar al secado de tomate tuvieron buena correlación; sin embargo el modelo de Page arrojó la mejor representación de la rotación de charolas a través de la constante de velocidad de secado (k).

El contenido de licopeno (0.90) y de ácido ascórbico (0.91) tienen una correlación muy fuerte con el color rojo ( $a^*$ ). Por lo tanto se pueden utilizar indistintamente para medir la calidad del tomate deshidratado.

## 6. PERSPECTIVAS

---

Identificar y cuantificar los compuestos fenólicos que están presentes en el tomate fresco y deshidratado para determinar los cambios en los niveles de concentración debido al proceso de secado.

Evaluar los costos totales de energía y materia prima para determinar si el proceso es rentable para su posterior aplicación a nivel comercial.

Utilizar el secador para evaluar diversos productos (frutas y hortalizas) de interés comercial para la región.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

---

- Agroproduce. Sistema producto jitomate. *Fundación produce Oaxaca, A.C.*, 3, 1-30, **2005**.
- Andritsos, N., P. Damalapakis, Kolios N. Use of geothermal energy for tomato drying. *GHC Bulletin*, 9-13, **2003**.
- Arias, R., Lee, T-C., Logendra, L., Janes, H. Correlation of lycopene measured by HPLC with the L\*, a\*, b\* color readings of a hydroponic tomato and relationship of maturity with color and lycopene content. *J. Agric. Food Chem.* 48, 1697-1702, **2000**.
- Candelas-Cadillo, M.G., Alanís-Guzmán, M.G.J., Bautista-Justo, M., Del Río-Olague, F., García-Díaz C. Contenido de licopeno en jugo de tomate secado por aspersión. *Rev. Mex. Ing. Quím.*, 4, 299-307, **2005**.
- Chang, C.H., Lin, H.Y., Chang, C.Y., Liu, Y.C. Comparison on the antioxidant properties of fresh, freeze-dried and hot-air-dried tomatoes. *J. Food Eng.*, 77, 478-485, **2006**.
- Dewanto, V., Wu, X., Adom, K., Liu, H.R. Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *J. Agric. Food Chem.*, 50, 3010-3014, **2002**.
- Doymaz, I. Air-drying characteristics of tomatoes. *J. Food Eng.*, 78, 1291-1297, **2007**.
- Foust, A. *Principios de operaciones unitarias*. Editorial CECSA, **1997**.
- Geankopolis, G. C. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Editorial CECSA, México, **1998**.
- Giovanelli, G., Zaroni, B., Lavelli, V., Nani, R. Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products. *J. Food Eng.*, 52, 135-141, **2002**.
- Gómez, P.A., Camelo, A.F.L. Calidad postcosecha de tomates almacenados en



- atmósferas controladas. *Hort. Brasileira*, 20, 38-43, **2002**.
- Goula, A., Adamopoulos, K.G. Spray drying performance of a laboratory. Spray dryer for tomato powder preparation. *Drying Tech.*, 21, 1273-1289, **2003**.
- Goula, A., Adamopoulos, K.G. Spray drying of tomato pulp: effect of feed concentration. *Drying Tech.*, 22, 2309-2330, **2004**.
- Goula, A., Adamopoulos K.G. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: I. The effect on product recovery. *J. Food Eng.*, 66, 2-34, **2005**.
- Hayes, W.A., Smith, P.G., Morris A.E. The production and quality of tomato concentrates. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 7, 537-564, **1998**.
- Henríquez, C., González, R, Krarup, C. Tratamiento térmicos y progresión del daño por enfriamiento y la pigmentación de tomates poscosecha. *Cien. Inv. Agr.* 32, 113-123, **2005**.
- Hernández, Y., Lobo, G.M., González, M. Determination of vitamin C in tropical fruits: a comparative evaluation of methods. *Food Chem.* 96, 654-664, **2006**.
- Kaur, D., Wani, A.A., Sogi, D.S., Shivhare, U.S. Sorption isotherms and drying characteristics of tomato peel isolated from tomato pomace. *Drying Tech.*, 24, 1515-1520, **2006**.
- Khattab, N.M. Novel design of an agricultural dryer. *Energy Sources.* 19, 417-426, **1997**.
- Khazaei, J., Chegini, G-R., Bakhshshiani, M. A novel alternative method for modeling the effects of air temperature and slice thickness on quality and air drying kinetics of tomato slices: superposition technique. *Drying Tech.* 26, 759-775, **2008**.
- Kerkhofs, N.S., Lister, C.E., Savage, G.P. Change in colour and antioxidant content of tomato cultivars following forced-air drying. *Plant Foods Human Nutr.*, 60, 117-121, **2005**.
- Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D. Drying kinetics of some vegetables. *J. Food Eng.*, 59, 391-403, **2003**.
- Latapi, G., Barrett D. Influence of pre-drying treatments on quality and safety of sun-dried tomatoes. Part I: Use of steam blanching, boiling brine blanching, and dips in salt or sodium metabisulfite. *J. Food Sci.* 71, 24-31, **2006**.
- Lee, M.T., Chen, B.H. Stability of lycopene during heating and illumination in model system. *Food Chem.*, 78, 425-432, **2002**.
- Lewicki, P.P., Michaluk, E. Drying of tomato pretreated with calcium. *Drying Tech.*, 22, 1813-

- 1827, **2004**.
- Lule, S.U., Xia, W. Food phenolics, pros and cons: a review. *Food Reviews Int.*, 21, 367-388, **2005**.
- Marfil, P.H.M., Santos, E.M., Telis, V.R.N. Ascorbic acid degradation kinetics in tomatoes at different drying conditions. *Food Sci. Tech.*, 41, 1642-1647, **2008**.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriot, P. Operaciones unitarias en ingeniería química. McGraw-Hill, **1998**.
- Olorunda, A.O., Aworh, O.C., Onuoha, C.N. Upgrading quality of dried tomato. Effects of drying methods, conditions and pre-drying treatments. *J. Sci. Food Agric.* 52, 447-454, **1990**.
- Otha, N., Roberts, A. R. Colorimetry: Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons, LTD, **2005**.
- Pérez, A. Construcción de un secador de charolas giratorio y su valoración con ajo (*Allium sativum*, L.). Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica de la Mixteca, **2006**.
- Rajkumar, P. Comparative performance of solar cabinet, vacuum assisted solar and open sun drying methods. Tesis de Maestría, McGill University, Montreal Canada, **2007a**.
- Rajkumar, P., Kulanthaisami, S., Raghavan, G.S.V., Gariép, Y., Orsay, V. Drying kinetics of tomato slices in vacuum assisted solar and open sun drying methods. *Drying Tech.*, 25, 1349-1357, **2007b**.
- Re, R., Bramley, P.M., Rice, Evans C. Effects of food processing of flavonoids and lycopene status in Mediterranean tomato variety. *Free Radical Res.*, 36, 803-810, **2002**.
- Sacilik, K., Keskin, E.A., Konuralp, R. Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *J. Food Eng.*, 73, 231-238, **2006**.
- SAGARPA. Anuario estadístico de la producción Agrícola. INEGI, México D.F., 2005.
- Sharma, S., Mulvaney, S., Rivzi, S. Ingeniería en Alimentos. Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio. Limusa Wiley, **2003**.
- Shi, J. Maguer M.L. Lycopene in tomatoes: Chemical and physical properties affected by food procesing. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 40, 1-42, **2000**.
- Unadi, A., Fuller, R.J., Macmillan, R.H. Strategies for drying tomatoes in a tunnel dehydrator. *Drying Tech.*, 7, 1407-1425, **2002**.

- United States Department of Agriculture, United States Standards for grades of fresh tomatoes, 1-14, **1997**.
- Vega-Mercado, H., Góngora-Nieto, M.M., Barbosa-Cánovas, G.V. Advances in dehydration of foods. *J. Food Eng.*, *49*, 271-289, **2001**.
- Xianquan, S., Shi, J., Kakuda, Yueming J. Stability of lycopene during food processing and Storage. *J. Med. Food*, *4*, 413-422, **2005**.
- Yilmaz, E. The Chemistry of fresh tomato flavor. *Turk. J. Agric. For.*, *25*, 149-155, **2001**.
- Zanoni, A., Peri, C., Nani, R., Lavelli, V. Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying. *Food Res. Int.*, *31*, 395-401, **1999**.
- Zanoni, B., Pagliarini, E., Foschino R. Study of dried tomato halves during shelf-life to minimize oxidative damage. *J. Sci. Food Agric.* *80*, 2203-2208, 2000.

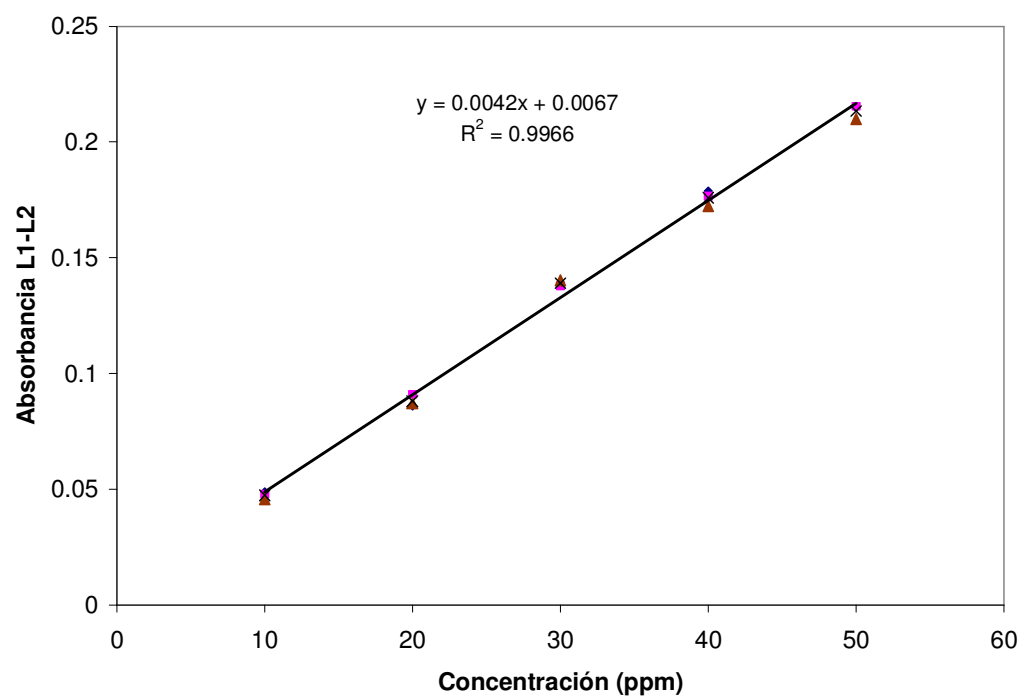
## 8. APÉNDICES

---

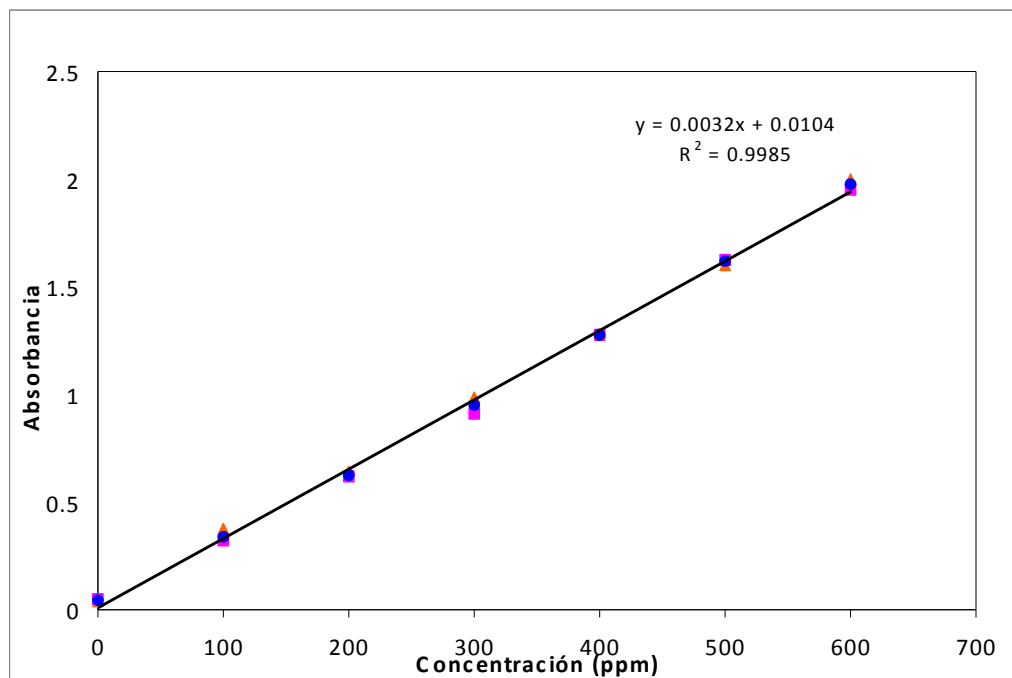
### **Apéndice A. Rebanador manual casero**



## Apéndice B. Curva de calibración de ácido ascórbico



## Apéndice C. Curva de calibración de ácido gálico



## Apéndice E. Análisis de varianza de la constante k del modelo de Henderson & Pabis.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor de F	% de contribución
Modelo	0.2902	11	0.02639	252.66	
A.Temperatura	0.2750	2	0.13749	1316.48	92.74
B. Velocidad de aire	0.0042	1	0.00422	40.39	2.85
C. Rotación	0.0020	1	0.00201	19.23	1.35
AB	0.0003	2	0.00013	1.22	0.09
AC	0.0028	2	0.00141	13.49	0.95
BC	0.0000	1	0.00004	0.36	0.03
ABC	0.0059	2	0.00297	28.42	2.00
Error	0.0025	24	0.00010		

**Apéndice F. Análisis de varianza del valor de L\* y b\*,  
respectivamente.**

<b>Fuente</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor de F</b>	<b>% de contribución</b>
Modelo	34.4491	11	3.13174	3.00	
A. Temperatura	19.6443	2	9.82217	9.41	55.35
B. Velocidad de aire	0.1529	1	0.15288	0.15	0.86
C. Rotación	0.8028	1	0.80282	0.77	4.52
AB	6.5721	2	3.28603	3.15	18.52
AC	0.5631	2	0.28155	0.27	1.59
BC	0.0890	1	0.08900	0.09	0.50
ABC	6.6249	2	3.31245	3.17	18.66
Error	25.0472	24	1.04363		




<b>Fuente</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor de F</b>	<b>% de contribución</b>
Modelo	48.4014	11	4.40012	3.83	
A. Temperatura	20.4735	2	10.23677	8.91	38.69
B. Velocidad de aire	0.3916	1	0.39157	0.34	1.48
C. Rotación	4.1030	1	4.10298	3.57	15.51
AB	19.1157	2	9.55787	8.32	36.13
AC	3.5473	2	1.77367	1.54	6.70
BC	0.0162	1	0.01624	0.01	0.06
ABC	0.7540	2	0.37698	0.33	1.42
Error	27.5874	24	1.14947		



## 9. ANEXOS

---

### Anexo A. Carta de color de la USDA

	<b>VERDE</b> Significa que la superficie del tomate es completamente verde en color. El tono verde puede variar de claro a oscuro.
	<b>ROMPIENTE</b> Significa que hay un cambio de color del verde a amarillo tenue, rosa o rojo, en no más del 10% de superficie.
	<b>CAMBIANTE</b> Significa que más del 10% pero no más del 30% de la superficie total, muestra un cambio definitivo en color de verde a Amarillo tenue, rosa o rojo o una combinación de estos.
	<b>ROSA</b> Significa que más del 30%, pero no más del 60% del total de la superficie, muestra un color rosa o rojo.
	<b>ROJO CLARO (Naranja)</b> Significa que más del 60%, pero menos del 90% de la superficie del tomate, muestra un color rosa o rojo.
	<b>ROJO</b> Significa que el tomate es rojo en más del 90% del total de su superficie.

## Anexo B. Algoritmo de Levenberg-Mardquardt

El algoritmo de Levenberg-Mardquardt (LM) es un algoritmo de optimización para mínimos cuadrados no lineales. Este algoritmo es un método híbrido entre el método de máximo descenso y el método de Newton.

Las ecuaciones normales  $N\Delta = J^T J \Delta J^T \varepsilon$  ( $J$  representa el jacobiano de la función,  $\Delta$  los incrementos de los parámetros y  $\varepsilon$  el vector de errores residuales del ajuste), son remplazadas por las ecuaciones normales aumentadas  $N'\Delta = J^T \varepsilon$ , donde  $N' = (1 + \lambda_j)$ .

A  $\lambda$  se le asigna un valor, generalmente es  $\lambda = 10^{-3}$ . Si el valor de  $\Delta$  obtenido resolviendo las ecuaciones aumentadas conduce a una reducción de error, entonces el incremento es aceptado y  $\lambda$  es dividido por 10. Por otro lado si el valor conduce a un aumento del error, entonces  $\lambda$  es multiplicado por 10 y se resuelven las ecuaciones normales aumentadas, este proceso continúa hasta que el valor de  $\Delta$  encontrado da lugar a un decremento del error.