



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERIA ENSENADA
MAESTRIA Y DOCTORADO EN
CIENCIAS E INGENIERIA



OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DEL
HIGO (*Ficus Carica L.*) VARIEDAD KADOTA, UTILIZANDO
LA METODOLOGÍA TAGUCHI.

TESIS

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA

ERICA ESTHER LUGO IBARRA

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO. AGOSTO 2008.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD ENSENADA

"OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DEL
HIGO (*Ficus Carica L.*) VARIEDAD KADOTA, UTILIZANDO
LA METODOLOGÍA TAGUCHI".

TESIS

Que para obtener el grado de maestría en ingeniería presenta:

ERICA ESTHER LUGO IBARRA

Aprobada por:



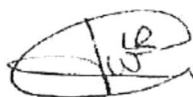
M.C. Claudia Camargo Wilson
Director de Tesis



M.C. Luz del Carmen Montoya Ballesteros
Co-Director de Tesis



M.C. Jesús Everardo Olguín Tiznado
Miembro del Comité



M.C. Jorge Limón Romero
Miembro del Comité



M.C. Luis Enrique Robles Ozuna
Miembro del Comité

DECLARACION DEL AUTOR

Se permiten citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial del autor, siempre y cuando se de el crédito correspondiente. Para citas y consultas más amplias o para la reproducción integra de este documento con fines académicos, se podrá solicitar permiso al Director de la Coordinación de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería Ensenada, de la Universidad Autónoma de Baja California, México; y al Director del Departamento de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal, del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Hermosillo Sonora, México. Bajo cualquier otra circunstancia, se deberá solicitar permiso del autor.

RESUMEN

México ocupa el tercer lugar de importancia en la producción de higo en América, con más de 6000 toneladas (*t*) anuales. La industria nacional se basa en dos variedades: Misión y Kadota. La Región de Caborca, en Sonora, es el mayor productor de la variedad kadota; sin embargo, más del 80% de la producción total se convierte en pérdida debido al carácter perecedero del fruto. Estudios realizados en Turquía, Grecia, Estados Unidos y otros países, en materia de deshidratación de higo con aire caliente, demuestran buenos resultados en términos de tiempo de procesamiento, humedad, color y estabilidad del producto en vida de anaquel. Sin embargo, pocas investigaciones han trabajado en la optimización de los parámetros de secado mediante el diseño de experimentos. La Metodología Taguchi (MT), es una variante especial del Diseño de Experimentos cuyo enfoque principal es la optimización de procesos, se caracteriza por utilizar el análisis Señal-Ruido para estudiar la interacción y el efecto entre los factores de control y los factores de ruido sobre el desarrollo del proceso; con el propósito de minimizar la variabilidad de la características de calidad establecidas. Además la MT utiliza arreglos ortogonales lo cual significativamente el número de experimentos. Este estudio presenta la aplicación de MT en la optimización del proceso de deshidratación del higo kadota, con el propósito de minimizar el cambio total de color (CTC) y el contenido final de humedad. Un arreglo ortogonal modificado L_{16} , fue utilizado para el estudio de seis factores con dos niveles de operación y un factor con ocho niveles de operación. La deshidratación se realizó utilizando un secador de gabinete. Los resultados muestran que el tipo de aditivo utilizado influye significativamente ($\alpha = 0.05$) sobre el CTC. El contenido final de humedad fue de $5.22 \pm 0.4\%$ en un tiempo de procesamiento de 24 h / 55°C . El CTC fue de 33.47 ± 1.2 . El contenido nutricional de los higos secos fue (porción de 100 g): 9.93% de fibra dietética (6.57% de tipo insoluble y 3.36% de tipo soluble), el 45.2% de calcio y potasio 11.2%. Después de 4 meses en almacén ($22 \pm 2^{\circ}\text{C}$), no se presentaron cambios significativo en las características de calidad ($p=0.01$).

ABSTRACT

Mexico is the third main producer of figs in America, with more than 6,000 tonnes (*tn*) per year. The national fig industry is largely based on two cultivars: Mission and Kadota; the Caborca Region in Sonora, is the major producer of kadota variety; nevertheless more than 80% of total production becomes loss due to the perishable nature of fruits and the poor quality of sun-dried figs. Recent studies about dried figs shows good results with hot air dehydration in terms of processing time, moisture, color and stability of microorganisms. However, few studies have worked on the optimization of the parameters of drying using design of experiments. The Taguchi Metodology (TM), it is a special variant of Desing of Experiments that uses a design of orthogonal array to study the entire parameter space with only a minimum number of experiments; besides use the analisis of signal-to-noise ratio to study the interaction and efect of control factors and uncontrol factors in the final response. This study presents the aplication of TM in optimization the drying parameters of kadota Figs in a cabinet dryer, in order to obtain the minimum Total Change of Color(ΔE) and Final Moisture Content. A standard L16 orthogonal array was used to study seven factors: additive solution (sodium bisulphite and ascorbic acid), time of blanching, temperature of blanching, immersion , size of particle, time of drying; and temperature of drying. The optimum operating condition for the drying parameters were obtained at 0.45% sodium bisuphite, 5min/80°C of blanching, immersion 15rpm; size of particle $0.83 \pm .21$ inches and 24h/55°C drying. The final moisture content was $5.22 \pm 0.4\%$ w.b., and the ΔE between fresh figs and dried figs was 33.47 ± 1.2 . whereas in the sun-drying process was 62.58 ± 0.92 . The nutrimental contents of dried figs was (amount per 100 g serving): 9.93% dietary fiber (6.57% of insoluble type and 3.36% of soluble type), 45.2% calcium and 11.2% potassium. After 4 months of shelf life($22 \pm 2^\circ\text{C}$), no significant change on quality characteristics of fruits were revealed ($p=0.05$).The results showed that drying of kadota figs using hot air method has potentially good industrial application.

Dedicatoria

A Dios, por sus bendiciones, infinito amor y compañía.

A mis grandes amores mis padres Norma Alicia e Ildefonso Armando, para ustedes este pequeño tributo de mi eterna gratitud, respeto y admiración. Gracias por su ejemplo de perseverancia, por su infinito e irremplazable amor y por apoyarme incondicionalmente en el camino que he elegido.

A mis Hermanas Karina del Carmen, Olivia Magdalena y María Guadalupe. con amor para ustedes quienes a pesar de la distancia me han brindado el amor, apoyo, consejo, paciencia y esperanza suficientes para no desistir en el logro de esta meta.

A mis abuelitos Ana Alicia, Agustín Antonio, María Luisa e Ildefonso †, como muestra de mi amor y respeto y, en agradecimiento a sus constantes oraciones.

A Daniel Everardo, por su constante e incondicional apoyo.

A Clariza B. Contreras López, como un pequeño agradecimiento por su amor, oraciones, amistad, consejo, apoyo, por ser nuestro ángel guardián y formar parte de nuestras vidas.

A Jesús Rafael, María, Juanito y Héctor Rafael, como muestra de mi cariño, por su apoyo y presencia en mi vida.

A Dora Alicia Barrón Aguirre, con gratitud y cariño por tu amistad incondicional, consejos, compañía, aliento en tiempos difíciles, por estar a mi lado siempre.

A Luisa Dolores Yanez Contreras por motivarme a emprender este proyecto, por apoyarme, pero sobre todo por tu amistad incondicional a pesar del tiempo y la distancia.

A la Familia Torres Lugo, como muestra del gran cariño hacia ustedes.

Con especial cariño a mis tías Ana Luisa y María Eugenia.

Agradecimientos

A CONACYT por financiar mis estudios de maestría en ingeniería en la Facultad de Ingeniería de la UABC, unidad Ensenada.

Al Dr. Oscar Roberto López Bonilla, al Dr. Juan Iván Nieto Hipólito y M.C. Everardo Inzunza, por apoyar comprometidamente el desarrollo de este proyecto, proporcionando los medios y recursos necesarios.

A la M.C. Claudia Camargo Wilson, directora de esta tesis, por confiarme el desarrollo de este proyecto, por compartir sus conocimientos y experiencias, por sus críticas y comentarios acertados, por su paciencia, por su apoyo y consejo incondicional, y sobre todo por su amistad.

A los M.C. Jesús Everardo Olguín Tiznado y M.C. Jorge Limón Romero sinodales de esta tesis, por apoyar y fortalecer el desarrollo de este proyecto con sus críticas, por compartir sus conocimientos del área de calidad e investigación aplicado al diseño experimental y enriquecer con ello la perspectiva del proyecto.

A Maria Luisa Reyes Torres, Ana Rosa Rivera Gonzáles, Sarita López Sánchez y Eliud Gil Mares, por su disponibilidad, amabilidad, calidad de servicio y por todas las atenciones brindadas.

A los Maestros M.C. Rosa Martha López Gutiérrez, M.C. Humberto Cervantes de Ávila, Dr. Horacio Luís Martínez Reyes, por compartir sus conocimientos, experiencias y motivar con ello el desarrollo de este proyecto.

Con especial estima al Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas, gracias por sus comentarios y consejos atinados, por compartir sus conocimientos y experiencias, por ser ejemplo de perseverancia, congruencia y compromiso, pero sobre todo gracias por su amistad.

A mis compañeros de Maestría, Yolanda Báez, Francisco Ocampo Chavira, Daniel Ortiz Barredo, Diego Tlapa, Mónica Villalpando, y Héctor, por su valioso apoyo e invaluable amistad.

A Rolando J. Gautrín Contreras, por la disponibilidad para ayudar, por todas las atenciones, por tu invaluable amistad.

Con especial cariño a Blanquita y Miguelito, por su apoyo, su cariño y amistad incondicional hacia mi persona y familia.

A Rodrigo Villalpando y Luís González, por sus atenciones y por su amistad.

Agradecimiento Especial



Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., por promover el desarrollo de proyectos conjuntos de investigación, por aceptar mi participación en el proyecto de desarrollo de tecnologías para la industrialización del higo kadota, y hacer con ello posible este trabajo de investigación.

Al M.C. Luz del Carmen Montoya Ballesteros., por confiar en mi y darme la oportunidad de formar parte de este proyecto, por compartir sus conocimientos y experiencias, pero sobre todo gracias por su amistad y por permitirme alcanzar esta meta.

Al M.C. Luis Enrique Robles Ozuna, por sus invaluable consejos, por sus críticas las cuales fortalecieron el análisis del trabajo, por el tiempo invertido en la formación y mejoramiento de las técnicas desarrolladas, por compartir sus conocimientos y experiencias, gracias especialmente por su amistad.

Al todo el personal de la Dirección de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal, por las facilidades proporcionadas en el desarrollo de esta investigación.

Al personal del laboratorio de Alimentos de Origen Vegetal, especialmente a la Biol. Jessica Martínez, Biol. Paloma Astrid Alvarado F., Biol. Heidy Ayala, Griselda por la capacitación y adiestramiento en el uso del equipo y material del laboratorio y desarrollo de métodos experimentales, por su paciencia, por su ayuda constante, pero sobre todo gracias por su invaluable amistad.

Agradezco especialmente a la M.C. Deisi Daiana Díaz Sánchez y al Ing. Alim. Daniel Amaya Flores, por compartir sus conocimientos, por la información proporcionada, la capacitación, la ayuda constante, por su paciencia y tiempo, gracias por brindarme su amistad.

ÍNDICE GENERAL

RELACIÓN DE CUADROS	viii
RELACIÓN DE FIGURAS Y GRÁFICAS	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	4
1.2 Hipótesis	6
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.2 Objetivos específicos	6
1.3.3 Delimitaciones en el desarrollo de la investigación	7
II. MARCO TEÓRICO	8
2.1 Metodología Taguchi	8
2.1.2 Conceptos básicos de la Metodología Taguchi	9
2.1.3 Principios de la Metodología Taguchi	11
1) Transformación de la Energía y uso de la Señal a Ruido	11
2) Beneficio de la Interacción entre los Factores de Control y los Factores de Ruido	12
3) Utilización de Arreglos Ortogonales	12
4) Función de Pérdida	12
2.1.4 Optimización del Sistema	14
2.1.4.1 Diseño Paramétrico	15
a) Etapas del diseño paramétrico	16
2.1.4.2 Interacciones y Matrices Ortogonales	19
2.1.4.3 Análisis y clasificación de la Razón Señal a Ruido	24
a) Menor es lo Mejor	25
b) Mayor es lo Mejor	26
c) Nominal es lo Mejor	27
2.1.5 Ventajas de la aplicación de la Metodología Taguchi respecto al Diseño Clásico Experimental	29
2.1.6 Aplicación de la Metodología Taguchi en la optimización de procesamiento de alimentos	33
2.1.7 Análisis Pareto-ANOVA	36
2.2 El Higo	37
2.2.1 Características de la higuera	38
2.2.2 Composición Nutricional	44
2.2.3 Propiedades Funcionales y beneficios a la salud	46
2.2.4 Procesamiento e Industrialización	47
2.2.5 Producción Mundial de higo	49
2.2.6 Producción Nacional	50
2.2.7 Producción en Sonora	52
2.3 Deshidratación de Frutas	52
2.3.1 Factores que influyen en el proceso de deshidratación	54
2.3.1.1 Condiciones del proceso	54
2.3.1.2 Naturaleza de la fruta	57
2.3.1.3 Equipo	57

2.3.2 Métodos de deshidratación	59
2.3.2.1 Deshidratación del higo con Aire Caliente	61
2.3.2.2 Ventajas del deshidratado con Aire Caliente respecto a otros métodos de deshidratación	64
2.4 Calidad de las frutas deshidratadas	65
2.4.1 Color	66
2.4.2 Sabor y Olor	71
2.4.3 Textura	72
2.4.4 Valor Nutricional	72
2.4.5 Rehidratación	73
III. MATERIALES Y MÉTODOS	75
3.1 Etapa I: Estudio preliminar para la Deshidratación del higo	76
3.1.1 Diseño del Modelo Experimental	76
3.1.2 Materia Prima	89
3.1.3 Proceso de Deshidratación del higo	89
3.2 Etapa II: Experimental Final para la deshidratación del higo	102
3.2.1 Diseño del Modelo Experimental	102
3.2.2 Materia Prima	105
3.2.3 Proceso de Deshidratación	105
3.3 Etapa III: Optimización del proceso	109
3.4 Etapa IV: Estudio del modelo de predicción	109
3.4.1 Diseño Experimental	109
3.4.2 Proceso de Deshidratación	110
3.5 Etapa V: Determinación de la vida en anaquel del higo deshidratado	111
3.6 Estudio preliminar para analizar la factibilidad de la elaboración de una botana con el higo deshidratado	111
3.6.1 Materia Prima	111
IV RESULTADOS Y DISCUSIONES	112
4.1 Etapa I: Estudio preliminar para la deshidratación del higo	112
1) Materia Prima	112
a) Color	112
b) Sólidos Solubles Totales	116
c) pH y Acidez Títulable	117
d) Contenido de humedad y fibra dietaria	117
2) Proceso	118
a) Escaldado	118
b) Reducción del tamaño de partícula	120
c) Deshidratación con aire caliente	122
3) Análisis de Datos	127
a) Gráficas de Efectos Principales	129
b) Análisis Pareto-ANOVA	129
c) Análisis de Varianza	131
4) Modelo de Predicción	134
4.2 Etapa II: Experimental final para la deshidratación del higo	135
1) Materia Prima	135
a) Color	135

b) pH, Acidez Títulable y Sólidos Solubles Totales	135
c) Contenido de humedad y fibra dietaria	138
2) Proceso	138
a) Escaldado	138
b) Reducción del tamaño de partícula	140
c) Deshidratación con aire caliente	140
3) Análisis de Datos	148
Color	
a) Gráficas de Efectos Principales	151
b) Análisis Pareto-ANOVA	151
c) Análisis de Varianza	151
Humedad	
a) Gráficas de Efectos Principales	155
b) Análisis Pareto-ANOVA	155
c) Análisis de Varianza	155
4.3 Etapa III: Optimización del proceso	160
a) Modelo de predicción	161
4.4 Etapa IV: Estudio de Comprobación	162
a) Caracterización del higo deshidratado en el estudio final	163
4.5 Etapa V: Estudio de Vida de anaquel	166
5. Estudio preliminar para la elaboración de una botana	166
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	169
Conclusiones	169
Recomendaciones	170
REFERENCIAS	171

RELACIÓN DE CUADROS

Cuadro 1.	Comparación de la Función de Pérdida entre las características de calidad	30
Cuadro 2.	Composición Nutricional de higos frescos	45
Cuadro 3.	Composición Nutricional de higos secos	48
Cuadro 4.	Comparación Nutricional del higo con otras frutas comunes	48
Cuadro 5.	Producción Nacional de Higo ciclo 2006, Modalidad Riego+Temporal	51
Cuadro 6.	Características de algunos tipos de Secadores Comerciales	58
Cuadro 7.	Factores de control del proceso de deshidratación del higo kadota y sus respectivos niveles: Experimental preliminar	83
Cuadro 8.	Arreglo Ortogonal $L_{16}(8^{**}1 \ 2^{**}6)$ para el proceso de deshidratación del higo kadota, utilizando MINITAB 14	85
Cuadro 9.	Modelo Experimental con los factores y niveles correspondientes: Experimental Preliminar	87
Cuadro 10.	Modelo Experimental con los factores y niveles correspondientes: Experimental Preliminar.	99
Cuadro 11.	Modelo Experimental con los factores y niveles correspondientes: Experimental Final.	104
Cuadro 12.	Tratamientos desarrollados en el estudio de comprobación	110
Cuadro 13.	Resultados de la Caracterización de la Materia Prima: propiedades Fisicoquímicas(Media $\pm$ Desviación Estándar)	113
Cuadro 14.	Resultados del AO L_{16} del efecto de los factores controlables en los parámetros de color L^* , a^* , b^* , c^* , $^{\circ}h$ y el Cambio Total de Color (CTC) del higo deshidratado (Media $\pm$ Desviación Estándar).	123
Cuadro 15.	Evolución del color en los parámetros L^* , a^* , b^* , c^* , $^{\circ}h$ y el Cambio Total de Color (CTC) en la piel del higo durante el proceso de deshidratación.	125

Cuadro 16.	Resultados del efecto de los factores controlables en el contenido final de humedad de los tratamientos 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16 (Media±Desviación Estándar)	128
Cuadro 17.	Resultados del AOL ₁₆ (8x1 2X6) del efecto sobre el CTC en el higo deshidratado y la SN _S generada.	128
Cuadro 18.	Análisis Pareto-ANOVA para el Cambio Total de Color del Higo deshidratado.	132
Cuadro 19.	Resultados del ANOVA para el Cambio Total de Color ($\alpha = 0.05$).	133
Cuadro 20.	Resultados de la caracterización de la Materia Prima: propiedades fisicoquímicas (media±desviación estándar)	136
Cuadro 21.	Resultados del AO L ₁₆ del efecto de los factores controlables en los parámetros de color L^* , a^* , b^* , c^* , $^{\circ}h$ y el Cambio Total de Color (CTC) del higo deshidratado (Media±Desviación Estándar).	141
Cuadro 22.	Evolución del cambio total de color en los parámetros L^* , a^* , b^* , c^* , $^{\circ}h$ y el Cambio Total de Color (CTC) en la piel del higo durante el proceso de deshidratación (Media±Desviación Estándar).	144
Cuadro 23.	Resultado del AO L ₁₆ del efecto de los factores controlables sobre el contenido final de humedad del higo deshidratado (Media±Desviación Estándar).	146
Cuadro 24.	Resultado del AOL ₁₆ del efecto de los factores controlables sobre el pH, la concentración de SST y Acidez Títulable en el higo deshidratado (Media±Desviación Estándar).	149
Cuadro 25.	Resultados del AOL ₁₆ (8x1 2x6) del efecto sobre el CTC en el higo deshidratado y la SN _S generada.	150
Cuadro 26.	Análisis Pareto-ANOVA para el Cambio Total de Color del higo deshidratado.	153
Cuadro 27.	Resultados del ANOVA para el Cambio Total de Color ($\alpha = 0.05$).	154

Cuadro 28.	Resultados del AO $L_{16}(8 \times 1 \times 2 \times 6)$ del efecto de los factores sobre el Contenido Final de Humedad del higo deshidratado y la SN_N generada.	156
Cuadro 29.	Análisis Pareto-ANOVA para el Contenido Final de Humedad en el higo deshidratado.	158
Cuadro 30.	Resultado del ANOVA para el Contenido final de humedad ($\alpha = 0.05$).	159
Cuadro 31.	Efecto del escaldado con bisulfito de sodio (0.45%) en el CTC y el contenido final de humedad del higo deshidratado.	160
Cuadro 32.	Resultados del estudio de comprobación para el CTC y el Contenido Final de Humedad del higo deshidratado (Media $\pm$ Desviación Estándar).	164
Cuadro 33.	Influencia del proceso de deshidratación sobre las características fisicoquímicas y de color del higo deshidratado (Media $\pm$ Desviación Estándar).	164
Cuadro 34.	Comparación Nutricional del higo deshidratado con otras frutas comerciales.	165

RELACIÓN DE FIGURAS Y GRÁFICAS

Figura 1.	Sistema/Proceso en el Diseño Paramétrico.	17
Figura 2.	Diagrama de las Etapas del Diseño Paramétrico (modificado de Phadke (1989), Wille (1990) y Wu y Wu (1991).	18
Figura 3.	Esquema de una Matriz Ortogonal.	20
Figura 4.	Ejemplo de Arreglos Ortogonales.	22
Figura 5.	Etapas de crecimiento del higo (<i>Ficus carica</i> L.).	37
Figura 6.	Tipo de deshidratación de frutas según el tamaño de partícula.	58
Figura 7.	Representación gráfica de coordenadas del Sistema CIELAB de color.	67
Figura 8.	Higo kadota, cultivado en "Estación Enchiladas", Caborca, Sonora.	89
Figura 9.	Diagrama de las Etapas para el proceso de deshidratación del higo kadota.	91
Figura 10.	Clasificación del higo según su Estado de Madurez del 1) verde hasta el 5) sobremaduro.	93
Figura 11.	Medición de los parámetros de color L^* , a^* , b^* y h en el higo kadota.	95
Figura 12.	Reducción del tamaño de partícula de la materia prima utilizando un molino.	98
Figura 13.	Reducción del tamaño de partícula de la materia prima: Experimental Final.	98
Figura 14.	Distribución del higo en las charolas de secado de riel: A) utilizando un tamaño de partícula $0.457 \pm 0.2 \text{ cm}$ y $1.320 \pm 0.2 \text{ cm}$ y, B) $1.347 \pm 0.2 \text{ cm}$ y $2.108 \pm 0.2 \text{ cm}$	101
Figura 15.	Higo kadota, cultivado en "Estación Enchilayas", Caborca, Sonora: Experimental Final.	105
Figura 16.	Representación de L^* , a^* , b^* , C y h en la esfera del color de los cinco EM (1=EM ₁ ; 2=EM ₂ ; 3=EM ₃ ; 4=EM ₄ 5=EM ₅) y, del higo inmaduro (I) y maduro (M) reportado por Solomon <i>et al.</i> (2006).	115

Figura 17.	Efecto del bisulfito de sodio (A) y del ácido ascórbico (B) en el higo escaldado.	119
Figura 18.	Higo Deshidratado utilizando un tamaño de partícula de: A) $.457 \pm 0.2 \text{ cm}$ y $1.320 \pm 0.2 \text{ cm}$ y B) $1.347 \pm 0.2 \text{ cm}$ y $2.108 \pm 0.2 \text{ cm}$.	121
Figura 19.	Representación gráfica del color de los parámetros L^* , a^* , b^* , C^* y h de la materia prima utilizada en el experimental final (EM ₁), la utilizada en el experimental preliminar (EM _{1P}) y el higo inmaduro (I) clasificado por Solomon <i>et al.</i> (2006).	137
Figura 20.	Efecto del Ácido Ascórbico (A) y el Bisulfito de Sodio (B) en el higo escaldado: estudio Final	139
Figura 21.	Distribución del higo en las charolas de secado.	139
Figura 22.	Rodajas y polvo de higo deshidratado: Experimental final	143
Figura 23.	A) Rodajas de higo deshidratado y B) Rodajas de higo rehidratado.	168
Figura 24.	Botana elaborada con el higo deshidratado	168
Gráfica 1.	Efectos principales de la SN _S ("Lo Menor es lo Mejor") en cada uno de los factores del proceso de deshidratación.	130
Gráfica 2.	Efectos principales de cada factor sobre el CTC del higo deshidratado (medias).	130
Gráfica 3.	Curva de la pérdida del contenido de humedad (%) en el higo durante el proceso de deshidratación.	146
Gráfica 4.	Efectos principales de la SN _S ("Lo Menor es lo Mejor") en cada uno de los factores del proceso de deshidratación del higo.	152
Gráfica 5.	Efectos principales de cada uno de los factores sobre el CTC del higo deshidratado.	152
Gráfica 6.	Efectos principales de la SN _N ("Lo Nominal es lo Mejor") en cada uno de los factores del proceso de deshidratación del higo: Contenido Final de Humedad	157

Gráfica 7.	Efectos principales de la SN_N ("Lo Nominal es lo Mejor") en cada uno de los factores del proceso de deshidratación del higo: Contenido Final de Humedad.	157
Gráfica 8.	Efectos sobre los parámetros de <i>color</i> L^* , a^* , b^* , C^* y $^{\circ}h$, en el higo deshidratado después de cuatro meses en anaquel.	167
Gráfica 9.	Efectos sobre el contenido de humedad, pH y SST en el higo deshidratado después de cuatro meses en anaquel.	167

I. INTRODUCCION

En la actualidad, el cultivo del higo tiene gran importancia comercial en el consumo mundial de frutas. Anualmente, se produce poco más de un millón de toneladas de higo en el mundo, de las cuales 70, 237,000 toneladas(*t*) son destinadas al mercado de frutas deshidratadas, con un valor promedio de \$130'655,000 millones de dólares (FAO, 2006).

México es uno de los tres principales productores de higo en América Latina, con un promedio de 6,340*t* anuales (SIAP, 2006). Los estados con mayor producción son Morelos, Hidalgo, Baja California Sur, Distrito Federal y Sonora. El Distrito Rural de Caborca en Sonora, es el mayor productor nacional de higo kadota, con una producción anual de 38 a 40*t*, lo que representa un valor de la producción superior al medio millón de pesos (SIAP, 2006). La principal alternativa de comercialización de los productores de Caborca, al igual que en el resto del país, es el mercado de frutas frescas. Sin embargo, la naturaleza perecedera del higo (Desai y Kotecha, 1991; Bolin y King 1980; Salunke *et al.* 1995), ocasiona un rápido deterioro de las principales características de calidad de la fruta, ésto se refleja en el cambio de color, sabor y pérdida de firmeza, redundando en una corta vida de anaquel lo que origina pérdidas hasta del 80% de la materia prima a los productores locales, debido a la falta de recursos suficientes para solventar los altos costos que representa prolongar la vida de anaquel del higo fresco en condiciones controladas. Esta situación limita la venta del producto al mercado local sin oportunidades de ingresar al mercado nacional e internacional.

Debido a lo anterior, los productores han optado por el secado al sol como alternativa de conservación y comercialización, con ello han logrado prolongar la vida en anaquel del fruto e introducir su producto a un nuevo segmento de mercado. No obstante, la falta de condiciones controladas durante el proceso como son tiempos y temperaturas de secado, genera productos con poca o nula

calidad, principalmente en términos de color y humedad, además de largos periodos de procesamiento.

Por otra parte, el deshidratado con aire caliente suple las deficiencias del secado solar, estableciendo condiciones controladas de tiempo de secado, temperatura de secado y duración total de proceso en la extracción de la humedad contenida en las frutas por evaporación, extendiendo su vida útil y disminuyendo la pérdida de nutrientes (Sun, 2006). La deshidratación con aire caliente, al igual que otras técnicas de deshidratación, han permitido conservar la calidad nutritiva de los alimentos, incrementar la calidad sensorial, facilitar el consumo, elaborar nuevos productos y diversificar el mercado de consumo de las frutas y vegetales, así como lograr su disponibilidad fuera de la estación de producción (Ordoñez, 1998).

Estudios recientes, han demostrado las ventajas del deshidratado de higo con aire caliente (Papoff *et al.* 1998; Gallali *et al.* 2000; Yahaya *et al.* 2000; Piga *et al.* 2004; Xanthopoulos *et al.* 2007; Amaya-Flores, 2008; Kulkarni *et al.* 2008). Las condiciones estandarizadas en los estudios realizados han logrado minimizar los cambios de color, la pérdida de características nutricionales y organolépticas, así como la reducción de la actividad del agua, generando mayor estabilidad en la vida de anaquel del higo deshidratado debido a la inactivación de la actividad microbológica. A su vez, se han comprobado que el escaldado reduce el tiempo de secado del higo, además el uso de sulfito durante la operación ayuda a preservar mejor el color en los higos durante la operación de secado (Piga *et al.* 2004). Específicamente, se ha reportado tiempos mínimos de secado de 17 horas (*h*) en procesos escalonados donde se utilizaron temperaturas de 85°C y 90°C, en la deshidratación de la higo entero variedad 'Niedda longa' (Papoff *et al.*, 1998); también se han alcanzado tiempos de 37 *h* a 33 *h* a 55°C en la deshidratación de higo entero de cultivos locales en Turquía (Piga *et al.*, 2004); por otra parte se ha reportado 20 *h* a 30 *h* de secado a 50°C y 60°C en higo entero de la variedad 'Tsapela' (Xanthopoulos *et al.*, 2007).

Amaya-Flores (2006), reporta un tiempo de 48 h en la deshidratación de higo entero variedad kadota utilizando una temperatura de 55°C, reduciendo la humedad hasta un 10%.

Sin embargo, los estudios realizados muestran diferencias en cuanto a la variedad del fruto, tamaño de partícula, condiciones de escaldado, tiempo de secado, temperatura de secado, por mencionar algunos. Por tanto, existe la necesidad de estandarizar el proceso y optimizar las condiciones de escaldado y secado para la deshidratación de la variedad kadota cultivada en la Región de Caborca, Sonora, México; debido a las diferentes propiedades que se modifican en el proceso y a la calidad final que se desea obtener en el producto final.

En la optimización de procesos, el diseño estadístico experimental representa eficiencia, economía y objetividad científica en la utilización de los recursos de un sistema productivo; además proporciona técnicas, estrategias y métodos que dirigen a los procesos hacia mejores condiciones de operación (Montgomery, 2005; Gutiérrez y De la Vara, 2005).

La Metodología Taguchi (MT), es una variante especial del diseño clásico experimental, cuyo objetivo principal es determinar el valor óptimo de los niveles en los factores de un proceso, de tal forma que las características de calidad establecidas se vean mínimamente afectadas por la variabilidad que transmiten aquellos factores difíciles de controlar (alteraciones causadas por condiciones ambientales, variabilidad pieza a pieza, deterioro), llamados factores de ruido, logrando productos de alta calidad con bajos costos de desarrollo y fabricación (Phadke, 1989, Park, 1996). Para lograr la optimización del sistema, la MT establece el diseño paramétrico del proceso, donde se estudia la relación causa-efecto entre los factores de ruido y los de factores de control; además, introduce el análisis de la Señal a Ruido (SN) para evaluar la calidad del proceso, donde la SN representa la relación entre la sensibilidad (o media del proceso) y la variabilidad del sistema, de tal forma que a mayor SN mejor funcionalidad y

estabilidad del sistema (Wu y Wu, 1996). Finalmente, el uso de Arreglos Ortogonales (AO) en el diseño paramétrico, asegura la reproducibilidad y escalamiento del sistema diseñado, a la vez que reduce el costo que representa su desarrollo (Park, 1996; Taguchi, 2001).

La prontitud tecnológica del desarrollo de la investigación, la flexibilidad, reproducibilidad y el costo-beneficio de los sistemas diseñados son las principales ventajas que presenta la MT en comparación con otras técnicas del diseño clásico convencional (Unal y Dean, 1991; Wu y Wu, 1996; Sanchez, 2000; Atil y Unver, 2000; Bingham, 2002; Takeshita y Hosokawa, 2007). Estudios recientes relacionados con el procesamiento de ajo, chile, calabaza, hongos, elaboración de mermeladas, mousse e incluso el procesado de productos cárnicos; muestran la eficiencia de la MT en la optimización y mejora de la calidad de éstos productos (Rito, 1990; Chuaqui *et al.* 2004; Moon y Li-Chan, 2004; Villarroel *et al.*, 2006; Tasirin *et al.* 2007; Emadi *et al.* 2007).

1.1 Justificación

La optimización del proceso de deshidratación del higo kadota, representa una oportunidad de industrialización importante para los productores del Distrito Rural de Caborca, Sonora, lo cual resultará en mejores prácticas de procesamiento que eviten las pérdidas económicas generadas por el fenómeno de descomposición, proporcionando una alternativa que permita colocar el producto en el mercado durante más tiempo y la oportunidad de diversificar el mercado de consumo; además de ofrecer nuevas alternativas de empleo a la comunidad, que al igual que la mayoría de las poblaciones rurales del país, no tiene fuentes de empleo suficientes para la población en crecimiento constante.

El objetivo de esta investigación es optimizar el proceso de deshidratación del higo variedad Kadota aplicando la MT para establecer los niveles óptimos de los parámetros: tiempo de escaldado, temperatura de escaldado, concentración y tipo de aditivo utilizado en el escaldado, tamaño de partícula, así como el tiempo y temperatura de secado. Con el propósito de obtener un producto con el menor cambio total de color y contenido de humedad final aceptable según las normas internacionales de comercio establecidas, además de minimizar la pérdida de propiedades nutricionales como la fibra, calcio y potasio.

Finalmente, el presente trabajo aporta información útil que describe la experiencia con la variedad kadota en cultivos mexicanos, para productores de higo que en el futuro pretendan deshidratar este tipo de variedad

1.2 Hipótesis

Con la aplicación de la Metodología Taguchi es posible establecer el valor óptimo de los niveles, en los factores de control, que intervienen en el proceso de deshidratación del higo variedad Kadota (*Ficus carica L*), que lleven a la obtención de un producto de calidad.

1.3 Objetivo General

Determinar el valor óptimo de los niveles, en los factores de control, que intervienen en el proceso de deshidratación del higo variedad Kadota (*Ficus carica L*), utilizando la Metodología Taguchi, que lleve a la obtención de un producto de calidad en términos de: cambio total de color, contenido final de humedad y propiedades nutricionales; adecuadas para su comercialización en el mercado nacional e internacional

1.3.1 Objetivos Específicos

1. Establecer y desarrollar un diseño paramétrico para el proceso de deshidratación del higo variedad kadota, que minimice la variabilidad de las características de calidad.
2. Estandarizar el proceso de deshidratación del higo variedad kadota, determinando las condiciones óptimas de:
 - a) Tiempo, Temperatura, Concentración y Tipo de Aditivo en la Operación de Escaldado.
 - b) Tamaño de partícula.
 - c) Tiempo y Temperatura de Secado.
3. Obtener un producto final con:
 - a) El menor Cambio Total de Color.
 - b) Contenido de Humedad Final del $6\pm 1\%$, de tal forma que cumpla con los requisitos de comercio nacionales e internacionales.

4. Lograr un proceso de deshidratación que minimice la pérdida de las propiedades nutricionales del higo deshidratado.

1.3.2 Delimitaciones para el desarrollo de la investigación

El desarrollo de la investigación se realizó considerando las siguientes limitantes:

1. La materia prima utilizada es higo de la variedad kadota, cultivada en el Distrito Rural de Caborca, Sonora.
2. Los lotes de materia prima fueron cosechados en el período de Julio a Agosto del 2007 y de Noviembre a Diciembre del 2007.
3. El análisis experimental se desarrolló en la planta piloto del Laboratorio de Alimentos de Origen Vegetal, del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.; en Hermosillo, Sonora.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 La Metodología Taguchi

La Metodología Taguchi (MT), también denominada Ingeniería Robusta e incluso Ingeniería de Calidad, debe su nombre al Dr. Genichi Taguchi quien en la década de los cincuentas desarrolló un enfoque distinto al diseño experimental clásico, introduciendo el diseño paramétrico robusto y utilizando su propia filosofía y métodos de ingeniería de calidad, con el propósito de obtener la mejora en la optimización de productos y de procesos a nivel industrial (De la Vara y Gutiérrez, 2005). Wu y Wu (1991), definen a la MT como la serie de planteamientos para predecir y prevenir las dificultades o problemas que podrían ocurrir en el mercado después de que un producto es vendido y utilizado por el cliente bajo múltiples condiciones ambientales y de utilización en el periodo de vida diseñado. Park (1996), precisa que la MT es una metodología de ingeniería utilizada para la optimización de las condiciones en los procesos, haciéndolos mínimamente sensibles al efecto de las causas de la variación y logrando productos de alta calidad con bajos costos de fabricación y desarrollo.

El objetivo de la MT es lograr productos y procesos robustos frente a las causas de variabilidad (factores de ruido) que ocasionan que las características funcionales de los productos se desvíen de sus valores óptimos provocando costos de calidad, esto se logra a través del : a) diseño del sistema (utilización de principios científicos y de ingeniería); b) diseño de los parámetros (determinación de los valores óptimos de los factores del proceso, que minimicen el efecto de los factores de ruido); y c) diseño de las tolerancias (Taguchi, 2002; Gutiérrez y De la Vara , 2005).

2.1.2 Conceptos Básicos de la Metodología Taguchi

La MT posee cierta terminología que la distingue del diseño experimental convencional, algunos de los conceptos más importantes se describen a continuación (Phadke, 1989; Unal y Dean, 1991; Park, 1996; Gutiérrez y De la Vara, 2005):

Parámetro; se refiere a los factores o variables que afectan la funcionalidad de las características de calidad del sistema o proceso.

Diseño Paramétrico; se refiere a la determinación óptima de los niveles (valores) en los parámetros (factores de control) que minimicen el efecto de los factores de ruido sobre la característica de calidad del producto, así como el costo del desarrollo del producto y la variación alrededor del valor objetivo (en la sección 2.1.4.4 se describe ampliamente este término).

Robustez; es el término empleado para describir un proceso o producto insensible a los factores de ruido.

Diseño Robusto; se refiere al diseño experimental en el cual se estudia el efecto de los factores de ruido sobre las variables de respuesta, así como la interacción entre éstos factores y los factores de control; con el propósito de determinar los niveles óptimos de operación del sistema. Utilizando para ello factoriales fraccionados en matrices ortogonales para estudiar las múltiples combinaciones.

Factor Señal; valor promedio de la respuesta (o valor objetivo), cuyo nivel de operación es seleccionado por el usuario, y que representa la meta del sistema o proceso a optimizar. También se considera como el dispositivo que permite cambiar el nivel de operación de los factores de sistema de acuerdo a los deseos del usuario.

Característica de Calidad; representa a la característica del producto cuyo valor se busca mejorar mediante el diseño de experimentos. La característica de calidad también es denominada Variable de Respuesta. Un modelo puede tener una o varias características de calidad.

Factor de Ruido; se refiere a los factores que actúan en el desarrollo del proceso y se clasifican en:

- a) Ruido Externo. Efecto de las acciones del medio ambiente sobre el proceso: humedad ambiental, polvo, errores en la operación.
- b) Ruido Interno. Variación que se presenta de un producto a otro dentro de un mismo proceso debido a la diversidad en el uso de componentes, falta de uniformidad en la operación del equipo o instrumentación, entre otros.
- c) Deterioro. Efectos que aparecen poco a poco con el tiempo y que pueden causar la aparición de fallas o defectos en el producto, por ejemplo el efecto de la luz y humedad en alimentos almacenados, efecto de la degradación de conservadores, entre otros.

Factores de Control; se les conocen como los factores principales de estudio. La aplicación de la MT establece una clasificación más detallada de los factores de control que pueden influenciar el desarrollo del proceso, según su efecto sobre la media y la variabilidad de la respuesta se pueden distinguir cuatro tipos de factores:

- 1) FACTOR CLASE I: Factores que afectan la Media y la variabilidad; se considera que existe este factor si se observa que el cambio de nivel en el factor produce un cambio (aumento o disminución) en la media y en la variabilidad del proceso.
- 2) FACTOR CLASE II: Factores que afectan la variabilidad; se presenta cuando existe una interacción con un factor de ruido, es decir el efecto del factor de ruido solo cambia la variación

(aumentándola o disminuyéndola) en la respuesta de calidad, la media se mantiene con los mismos valores. Lo relevante de esta situación es elegir la combinación que reduzca la variación en las características de calidad establecidas.

- 3) FACTOR CLASE III: Factores que afectan sólo la media; en este caso la variabilidad que presenta la respuesta Y por la oscilación de éste factor es la misma en cualquier lugar de rango. Este tipo de factor es útil para llevar la media a su valor nominal una vez elegidos los niveles de los factores Clase I y Clase II que minimicen la variabilidad de aquí que este factor se denomine *Factor de Ajuste*. Es decir, con los factores Clase I y Clase II se pueden elegir las condiciones más robustas que reducen la variabilidad de la respuesta, y si la media se mueve de valor objetivo, con este de ajuste se regresa a su valor nominal.
- 4) FACTOR CLASE IV: Factores que no afectan la media ni la variabilidad; estos factores no tienen un efecto significativo en la media y la variabilidad de la respuesta, por tanto se elige el nivel más económico como el mejor, según el criterio del investigador. En el modelo de predicción los factores Clase IV se expresan con el signo de pesos (\$).

2.1.3 Principios de la Metodología Taguchi

La MT fundamenta su análisis en cinco principios básicos (Taguchi, 2002):

1) Principio de la Transformación de la Energía; 2) Aprovechamiento de las interacciones de los Factores de Control y los Factores de Ruido; 3) Uso de los arreglos ortogonales (AO); 4) Optimización del sistema en dos pasos, y 5) Función de pérdida en la ingeniería de calidad en línea. A continuación se hace una breve descripción de ellos:

- 1) Principio de Transformación de la Energía y uso de la señal a ruido; el aspecto más importante de la MT es encontrar y definir una función

sustituible (denominada función ideal) que gobierne la transformación de la energía en el sistema de la señal de entrada hasta la señal de salida (respuesta). Es importante maximizar la energía de transformación minimizando el efecto de los factores incontrolables o factores de ruido. La MT evalúa la funcionalidad del sistema a través de la mejora en la calidad del producto. La transformación de la energía se mide en términos de señal a ruido (SN). A mayor SN mejor transformación de la energía y por lo tanto mejor funcionalidad del sistema.

- 2) Aprovechamiento de las interacciones de los Factores de Control y los Factores de Ruido; la MT no realiza un análisis de la interacción entre los factores controlables. El objetivo de la MT es diseñar sistemas robustos o insensibles a los factores de ruido, por lo cual centra su análisis en la interacción de los factores controlables y los factores de ruido.
- 3) Arreglo Ortogonal (AO); es una matriz factorial fraccionada que asegura la combinación y comparación equilibrada de los niveles en los factores (de control y de ruido) del sistema, así como la reproducibilidad del sistema diseñado. Se trata de una matriz con números dispuestos en renglones y columnas, donde cada renglón representa el nivel de los factores en cada experimento (o corrida) y cada columna representa al factor específico combinado. Se denomina ortogonal porque cada columna es evaluada independientemente. La ventaja de utilizar AO no es aumentar la confiabilidad del sistema, sino evaluar su confiabilidad. Para aumentar la confiabilidad es necesario realizar una correcta evaluación de la estabilidad del sistema, la estabilidad puede ser evaluada con una medida como la SN.
- 4) Función de pérdida; este principio está relacionado con el concepto de calidad y el diseño de las tolerancias. Taguchi define la calidad, desde un punto de vista holístico, en relación al costo que produce su obtención;

considera el costo de manufactura (derivado del tiempo de producción) y el costo que la mala calidad causa al cliente y a la sociedad como un costo total (Phadke, 1989). De tal forma que, la calidad de un producto se determina en función de la pérdida (mínima) que éste ocasiona a la sociedad desde su fabricación hasta el término de su vida útil (Bryne y Taguchi, 1986). La pérdida económica está asociada con el costo por retrabajo, desperdicios de manufactura, costos de garantía, insatisfacción del cliente, tiempo y dinero empleados por los clientes debido a los productos defectuosos, y pérdidas eventuales del segmento de mercado. La pérdida de calidad se representa como una función cuadrática, tal como lo muestra la Ecuación 2.

$$L(y) = k(y - m)^2 \dots\dots\dots 2$$

Donde:

$L(y)$ = Representa el costo económico por cada unidad producida

y = Representa la característica de calidad

m = Representa el valor objetivo de la variable de calidad (media)

k = Representa el valor financiero de la característica de calidad

Taguchi (1987), establece una estimación de las pérdidas financieras tal y como lo muestra la relación cuadrática de la Ecuación 2; por lo tanto si y representa la característica de calidad y m un valor finito de la función objetivo, la pérdida $L(y)$ puede ampliarse y expresarse como una Serie de Taylor en función de m (Park, 1996), como lo muestra la Ecuación 3 :

$$L(y) = L(m) + \frac{L'(m)}{1!}(y - m) + \frac{L''(m)}{2!}(y - m)^2 + \dots\dots\dots 3$$

Debido a que $L(y)$ representa un valor mínimo en $y = m$, se tiene que $L'(y) = 0$. $L(m)$ se considera siempre como una constante y se ignora, debido a que su efecto aumenta uniformemente en relación a los valores que adquiere $L(y)$. Así es como la función de pérdida toma su tercer término:

$$L(y) = \frac{L''(m)}{2!} (y - m)^2$$

$$L(y) = K(y - m)^2$$

Cuando la característica de calidad (y) se desvía del valor objetivo (m), genera una pérdida, es decir, la calidad se define como la nula o poca variación de las características de calidad respecto a la función objetivo (Di Lorenzo, 1990). Éste análisis demuestra que la disminución de los costos sólo se logra disminuyendo la variación en el proceso. La Función de pérdida de Taguchi, es la primer propuesta para diseñar y medir la calidad en función del costo, lo cual permite a los ingenieros lograr un diseño óptimo basándose en un análisis de costo y un análisis experimental (Teicholz, 1987).

2.1.4 Optimización del Sistema

La MT establece dos etapas para optimizar un sistema:

Etapa I. Se determinan los factores controlables que tienen efecto sobre el estadístico de la SN, que fué seleccionado de acuerdo al tipo de característica de calidad deseada. Mediante el uso de las gráficas de efectos principales se identifican los efectos activos y se determinan las condiciones de operación más robustas, que son las que maximizan el valor de la respuesta SN.

Etapa II. Se realiza el análisis para la media $\bar{y}$. Los factores Clase III (que solo afectan la media) se utilizan como factores de ajuste para llevar la media a su valor nominal. Si todos los factores que afectan a la media

también afectaran a la variabilidad (Clase I), será necesario encontrar una solución de compromiso, utilizando como factor de ajuste el de más efecto en la media y con menos efecto en la variabilidad.

Adicionalmente, es útil para cualquier respuesta continua también desarrollar éstas etapas con el estadístico general $SN = -10\log(S^2)$, con el propósito de tener otra visión del análisis. Si los resultados de éste análisis llegaran a diferir de los resultados del estadístico recomendado por Taguchi, se deben analizar con detenimiento las dos soluciones encontradas para determinar cuál es finalmente la mejor. Este segundo análisis puede proteger al experimentador de una solución subóptima que algunas veces generan las señales a ruido originales (Logothetis y Wynn, 1994).

2.1.4.1 Diseño Paramétrico

El diseño paramétrico, es el primer paso para lograr la optimización de un proceso o sistema, ya que provee un método sistemático y eficiente para determinar un diseño óptimo del sistema con un costo mínimo (Kackar, 1985; Phadke, 1989; Taguchi, 1986; Unal y Dean, 1991).

El diseño paramétrico tiene una concepción diferente del sistema o proceso a la expuesta en el diseño clásico de experimentos. La Figura 1, muestra la composición del sistema, en un diseño paramétrico (Taguchi, 2002). Como se observa, el diseño paramétrico busca maximizar la transformación de energía ajustando los factores de control (C) en presencia de los factores de ruido (N); la energía de transformación se encuentra entre la señal de entrada (M) y la respuesta ó característica de calidad (y). La señal de entrada o factores señal, representan los recursos (disponibles) establecidos por el operador del sistema para lograr los objetivos, éstos son seleccionados en base al conocimiento del ingeniero o investigador y en ocasiones uno o más factores señal son seleccionados. Los factores de control (C), representan las especificaciones del producto y son responsabilidad del investigador, cada factor controlable puede

tener uno o más valores, estos valores se denominan niveles. Finalmente, la influencia de los factores de ruido en la respuesta del sistema (y) varía en relación al cambio de sus niveles de un ambiente a otro, y de un tiempo a otro.

a) Etapas del diseño paramétrico

La Figura 2, muestra el Diagrama de las etapas del diseño paramétrico, este modelo es una adaptación del propuesto por Phadke (1989), Wille (1990) y Wu y Wu (1991).

El paso 1 consiste en determinar la función ideal del sistema, es decir, definir si el objetivo del sistema diseñado es maximizar la calidad, el rendimiento, las utilidades, entre otros; minimizar las pérdidas, los tiempos de procesamiento, costos de producción; o llevar el comportamiento de las respuestas a un valor nominal. El paso 2, consiste en seleccionar los factores de ruido de mayor significancia para el desarrollo del sistema, y además establecer las condiciones extremas de su efecto (niveles altos, bajos, estándares).

El paso 3, consiste en seleccionar los factores de control que según la experiencia del investigador, potencialmente pueden producir algún efecto en la característica de calidad. Una vez identificados los factores de ruido, factores de control y sus respectivos niveles, se selecciona la matriz adecuada (paso 4), en la cual el arreglo interno corresponderá a los factores de control y el arreglo externo a los factores de ruido. El paso 5, consiste en llevar a cabo el experimento, siguiendo el orden establecido en el AO.

El paso 6, consiste en graficar los efectos principales de las variables de respuesta para la SN y para la media, después se hace una clasificación de los factores (según lo expuesto en la sección 2.1.2) y finalmente determinar el valor óptimo de los factores de control: 1) el primer paso para llegar a la optimización es seleccionar los niveles de los factores de control que mayor señal a ruido

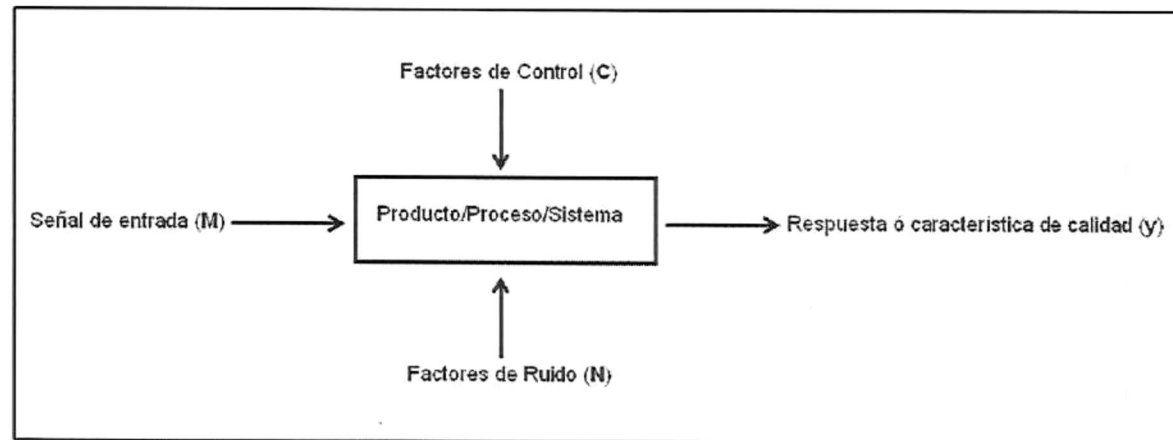


Figura 1. Sistema/Proceso en el Diseño Paramétrico

Diagrama de las Etapas del Diseño Paramétrico

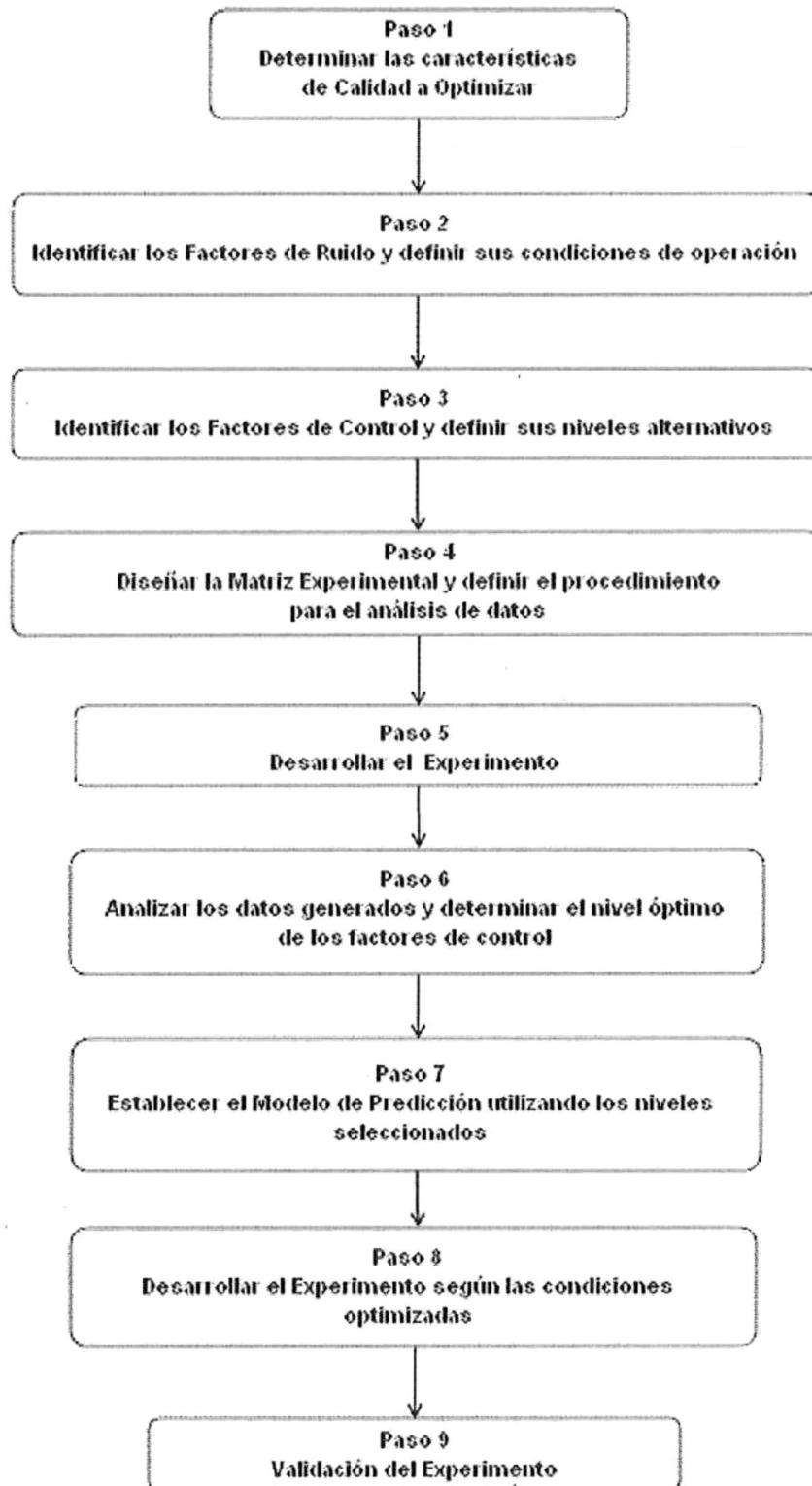


Figura 2. Diagrama de las Etapas del Diseño Paramétrico (modificado de Phadke (1989), Wille (1990) y Wu y Wu (1991))

presenten, 2) el segundo paso es identificar los factores de control cuyo cambio de nivel no afecte la relación de la señal a ruido pero si la sensibilidad (la media).

El paso 7, consiste en identificar la combinación óptima de todos los factores de control y establecer un modelo de predicción, a través del uso de una ecuación donde cada factor y su respectivo nivel sean claramente representados; después se estima o pronostica el valor de las variables de respuesta. El paso 8, consiste en realizar un experimento de comprobación, desarrollando las condiciones establecidas en el modelo de predicción. Finalmente el paso 9, consiste en comparar el valor pronosticado de las variables de respuesta con el valor real obtenido en el experimento comprobatorio. Posteriormente se establece el nivel de confianza del modelo.

2.1.4.2 Interacciones y Matrices Ortogonales

La MT distingue dos tipos de interacciones en su diseño de experimentos: 1) interacciones entre los factores de control y, 2) las interacciones entre los factores de control y los de ruido. Tal distinción no existe en el diseño convencional. Desde el punto de vista de la MT el primer tipo de interacción es perjudicial y el segundo beneficioso. La interacción es sinónimo de inconsistencia y no de reproducibilidad, el objetivo de la MT es predecir los problemas que podrían ocurrir en el mercado y orientar la investigación y diseño del producto antes de iniciar la producción; esto es diseñar un producto basándose en las conclusiones de laboratorio, las cuales deben estar libres de interacciones y ser reproducidas más tarde, tanto en los proceso de fabricación a gran escala, como en las manos del cliente (Wu y Wu, 1991; Taguchi, 2002).

Por otra parte, si los efectos de los factores son muy similares, éstos pudieran confundirse con varias interacciones y las conclusiones serían irreales; para asegurarse que esto no ocurra, la condición óptima seleccionada en la experimentación debe verificarse a través del experimento comprobatorio. Cuando se utilizan todas las columnas de la matriz ortogonal para albergar los

factores y ninguna para asignar alguna interacción, y las conclusiones obtenidas se verifican en el experimento comprobatorio se dice que la conclusión es robusta (Wu y Wu, 1991).

La Figura 3, muestra la estructura de una matriz ortogonal, la cual está compuesta por un arreglo exterior y un arreglo interior donde están dispuestos los factores de ruido y los factores de control respectivamente. Como se puede

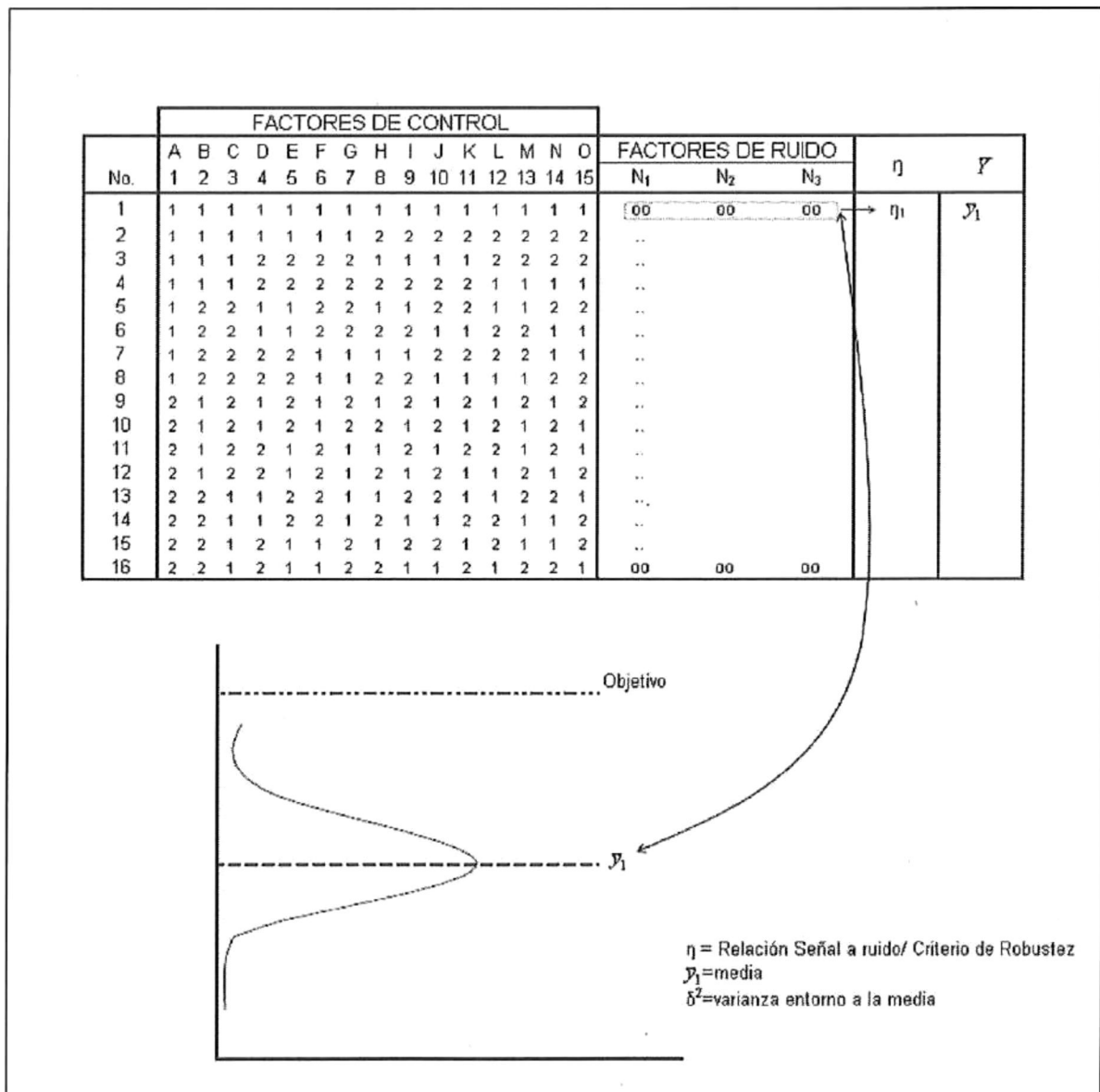


Figura 3. Esquema de una Matriz Ortogonal

observar, tanto el comportamiento de la media $\bar{y}$ como el de la SN, son registrados y monitoreados durante el experimento.

Mientras que el diseño clásico experimental utiliza el estudio (a prueba y error) de cada uno de los parámetros de un sistema así como sus respectivas iteraciones para lograr la optimización del mismo, lo cual representa una inversión considerable de tiempo y dinero (Phadke, 1989), el diseño paramétrico recurre al uso de arreglos factoriales fraccionados, con lo cual se logra un análisis factible, reproducible y económico que conduce a la solución óptima del diseño (Kackar, 1985; Phadke, 1989; Taguchi, 1986). Por ejemplo el estudio de trece factores con tres niveles de operación (3^{13}), requiere de 1' 594,323 corridas experimentales para estudiar todas las posibles reacciones, en el diseño clásico, con lo cual el tiempo y el costo de dicho estudio resultarían prohibitivos para cualquier estudio. Con la aplicación del diseño paramétrico y el uso de diseños factoriales fraccionarios, solo una fracción del total de experimentos es analizada; este análisis permite reducir el costo, tiempo y material invertido en cada investigación.

Los AO tienen la propiedad de ortogonalidad es decir, sus columnas son linealmente independientes (lo cual se obtiene si la multiplicación de dos cualesquiera es igual a cero). Los AO, se denotan como $L_a(b^c)$ donde:

- a = Representa el número de corridas experimentales o número de combinaciones de niveles que conforman el arreglo.
- b = Representa el número de niveles por cada factor
- c = Representa el número de columnas del arreglo
- L = Representa al diseño Cuadrado Latino

Existen varios modelos para estudiar el efecto de los factores, los cuales varían de acuerdo al número de factores y niveles que se deseen utilizar para el análisis de un sistema. La Figura 4, muestran cinco de los AOs de mayor uso en

Arreglo $L_4 (2^{3-1})$

No. Corridos Experimentales	No. Columnas		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Arreglo $L_8 (2^{7-4})$

No. Corridos Experimentales	No. Columnas						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Arreglo $L_9 (3^{4-2})$

No. Corridos Experimentales	No. Columnas			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Arreglo L_{12} (Plackett-Burman para $k=11$)

No. Corridos Experimentales	No. Columnas										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

Arreglo $L_{16} (3^{15-11})$

No. Corridos Experimentales	No. Columnas														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Figura 4. Ejemplo de Arreglos Ortogonales

el diseño paramétrico, son: L_4 , L_8 , L_9 , L_{12} y L_{16} . Por ejemplo, con el AO L_{16} se pueden estudiar desde 4 hasta 15 factores (para menos de 4 factores se utiliza el L_8). Si se estudiaran cuatro factores, estos se deben asignar a las columnas 1, 2, 4 y 8 para poder estimar de manera separada las interacciones, y en este caso equivaldría a un diseño factorial completo 2^4 . Si se estudian 15 factores el arreglo L_{16} equivaldría a una fracción 2_{III}^{15-11} . Si el número de factores de estudio aumenta, se tienen menos grados de libertad para estudiar las interacciones; debido a que Taguchi no enfatiza en el estudio de las interacciones, prefiere saturar lo más posible los arreglos y estudiar sólo los efectos principales de cada factor. A partir de los arreglos dados en la Figura 7, se pueden hacer modificaciones para construir nuevos arreglos ortogonales que permitan estudiar factores con diferentes cantidades de niveles. Por ejemplo, el arreglo L_{16} (4^{15-11}) se puede modificar para convertirlo en $L_{16}(4^{5-3})$ ó $L_{16}(4 \times 2^{12-10})$, según se requiera.

Taguchi organiza las columnas de los AO en un orden diferente al de Yates. La primera columna de cada arreglo ortogonal es aquella donde los niveles aparecen los más agrupados posible, de manera que el factor correspondiente se cambia de nivel un mínimo número de veces si el arreglo se corre en ese orden. Taguchi recomienda asignar a la primera columna aquel factor que sea más difícil de manipular durante el experimento; es decir, aquel factor que sea difícil cambiarle su nivel entre una corrida experimental y otra. De lo anterior se concluye que, Taguchi no enfatiza la necesidad de correr el experimento en orden aleatorio como se recomienda en el diseño clásico, si no más bien presupone las complicaciones prácticas que se han señalado, y estructura el orden de las columnas conforme a estas dificultades. Cuando se estudian los efectos de los factores uno a uno, evidentemente el porcentaje de éxito se incrementa, pero es imposible distinguir entre los efectos principales y las interacciones. Este es un riesgo que se incrementa al validar la función óptima, cuando el diseño se reproduce a gran escala y bajo las condiciones (generalmente inciertas) del mercado.

2.1.4.3 Análisis y clasificación de la Razón Señal a Ruido

La SN (por sus siglas en inglés signal-to-noise) pretende capturar y transmitir la magnitud de la información real (señal) del sistema, después de que dicho sistema se ha expuesto al efecto de los factores de ruido.

La razón SR se determina como lo muestra la Ecuación 4:

$$SN = \frac{\text{Poder de la señal}}{\text{Poder del ruido}} = \frac{(\mu^2)}{(\sigma^2)} \dots\dots\dots 4$$

Entre mayor sea el valor de la SN, mejor es el sistema. Todos los sistemas establecen una relación entre la energía que entra y la energía que sale del mismo, esta relación se denomina función ideal (objetivo). La MT utiliza y enfoca ésta relación proponiendo un sistema que alcance el objetivo ideal, si toda la energía se convierte en energía de salida (y , respuesta), el sistema no presentaría pérdidas. Lo cual resultaría en la eliminación del retrabajo, desperdicio, ruido, variación en las partes producidas, quejas, reclamación de garantías, e incluso el departamento de control de calidad resultaría innecesario. Sin embargo, resulta difícil lograr la función ideal. La realidad es que existe una pérdida de energía durante el proceso de transformación. Esta pérdida es ocasionada por la variabilidad y el efecto de los factores de ruido. La energía perdida crea problemas en el sistema, a mayor cantidad de energía perdida mayor es el efecto de los problemas (Park, 1996).

Existe una variedad de SN utilizadas para analizar la variabilidad en un sistema, las cuales dependen del tipo de problema que se esté analizando. Los criterios para evaluar la proporción o magnitud de la SN, dependen del tipo de diseño del sistema. En términos generales, los sistemas se clasifican en estáticos y dinámicos; la diferencia radica en la presencia o ausencia del factor señal (Wu y Wu, 1991). Los sistemas estáticos se caracterizan por la ausencia del factor señal, dependen de valores establecidos como respuesta deseada, esta respuesta adquiere valores continuos o discretos. Para medir la calidad de las respuestas de calidad (y) en los sistemas estáticos, se utilizan tres categorías o

criterios de robustez, los cuales establecen que la pérdida de calidad se minimiza cuando la respuesta (y) es:

1. Reducida (Menor es lo mejor)
2. Incrementada (Mayor es lo mejor)
3. Orientada hacia su valor nominal (Nominal es lo mejor)

a) Menor es lo Mejor (SNs)

Park (1996) explica la pérdida de calidad a partir de la Ecuación 2, de la siguiente forma. Si representamos la variación de la función objetivo como $m \pm \Delta_0$ y la pérdida como $A_0^* = m \pm \Delta_0$, y sustituimos por k tenemos la Ecuación 5:

$$k = \frac{A_0^*}{\Delta_0} \dots\dots\dots 5$$

Sustituyendo la Ecuación 5 en la Ecuación 2 tenemos la Ecuación 6;

$$L(y) = k(y - m)^2 = \frac{A_0^*}{\Delta_0} (y - m)^2 \dots\dots\dots 6$$

Para obtener la ecuación que represente la pérdida de calidad en la SNs, consideramos que $m = 0$ y tenemos la Ecuación 7:

$$L(y) = ky^2 = \frac{A_0^*}{\Delta_0} y^2 \dots\dots\dots 7$$

La Ecuación 7, representa el valor de la característica de calidad cuando se utiliza el criterio lo 'menor es lo mejor', sin embargo para utilizar este concepto en el diseño estadístico de experimentos, Taguchi recomienda utilizar la función de logaritmo y multiplicar la SN por 10, para expresar la SN en decibeles, tal y como se analiza en el área de las comunicaciones. Entonces, suponiendo $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$, representan un conjunto de características de calidad la estimación de la función objetivo $E(y^2)$, esta dada por:

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - 0)^2$$

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2$$

Donde MSD representa la desviación de los cuadrados medios de las características de calidad en relación a la función objetivo. Para ser consistente con el principio de la SN (a mayor señal, mejor funcionamiento del sistema), se realiza la siguiente transformación para la característica SN_s , como se muestra en la Ecuación 8;

$$SN_s = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y^2 \right] \dots\dots\dots 8$$

Por lo tanto la función SN_s se utiliza cuando los valores de las respuestas con continuos, positivos y tienden a cero.

b) Mayor es lo Mejor (SN_B)

Continuando con el análisis de Park (1996), para esta función sustituimos $1/y$ por y , en la Ecuación 6, y obtenemos la Ecuación 9;

$$L(y) = k \left(\frac{1}{y^2} \right) \dots\dots\dots 9$$

Para determinar el valor de k se establece un límite en la función y al sustituir en la Ecuación 4 se obtiene $k = A_0^* A_0^2$, por lo que la función de pérdida para éste tipo de característica de calidad esta dada por la Ecuación 10:

$$L = E \left[k \left(\frac{1}{y^2} \right) \right] = k \left(1/\mu^2 \right) \left(1 + 3\sigma^2/\mu^2 \right) \dots\dots\dots 10$$

Realizando un análisis similar al SN_s , para estimar el valor de la SN_B tenemos la siguiente Ecuación 11:

$$SN_B = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2} \right] \dots\dots\dots 11$$

c) Nominal es lo Mejor (SN_N)

Los valores de la respuesta son continuos y no representan algún extremo de la función objetivo (no marcan una tendencia a cero o bien a lograr un valor alto). La Ecuación 6 no considera que la calidad de cada producto y , incurra en la misma pérdida de calidad $L(y)$, lo que en realidad significa es que la pérdida promedio de los productos y esta dada por la función $L(y)$. Por lo tanto, si la variable aleatoria y toma el significado de μ , y la varianza se reconoce como σ^2 , para expresar la pérdida de calidad de la característica de calidad considerando un valor nominal se llega a la Ecuación 12:

$$\begin{aligned} L &= E[L(y)] = E[k(y - m)^2] \\ L &= kE[(y - E(y)) + (E(y) - m)^2] \\ L &= k[\sigma^2 + (\mu - m)^2] \dots\dots\dots 12 \end{aligned}$$

Por lo tanto, para minimizar la pérdida de calidad debemos reducir la variación σ^2 de la característica de calidad, e incluso reducir la diferencia entre el valor de la característica de calidad μ y el valor objetivo m . La SN para este tipo de característica esta dado por la Ecuación 13:

$$SN_N = 10 \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right) \dots\dots\dots 13$$

$\bar{y}/s$ es el recíproco del coeficiente de variación, con el se mide la dispersión de la calidad. Sin embargo, Taguchi propone la Ecuación 14 para representar mejor la SN_N:

$$SN_N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m)^2 \right] \dots\dots\dots 14$$

Esta ecuación es más adecuada por tres razones: 1) cuando y_i , tome valores positivos o negativos, es posible para S_m ser menor que V , por consiguiente la Ecuación 13 no puede utilizarse. 2) Si $\bar{y}$ aumenta la SN aumenta, consecuentemente si los valores de $\bar{y}$ son mayores a los de la función objetivo m , la SN será errónea; y 3) los valores de la Ecuación 13 no corresponden con el principio de la función de pérdida. A diferencia de los otros criterios, el tipo SN_N considera dos estadísticos en la representación de su análisis, la diferencia entre los dos estadísticos esta dada por el tipo de característica de calidad. Se denomina Tipo I, al estadístico que considera respuestas no negativas que van de cero a infinito, cuyo valor objetivo es diferente de cero y que la varianza es cero cuando la respuesta es cero. El valor de la SN_N del Tipo I, se representa con la Ecuación 15:

$$L = -10 \log \left(\frac{y^2}{\sigma^2} \right) \dots\dots\dots 15$$

El estadístico Tipo II, se utiliza para respuestas que pueden tomar valores positivos y negativos, y el cero puede ser el valor nominal. El valor de la SN_N para el Tipo II, se representa como lo muestra la Ecuación 16:

$$L = -10 \log(\sigma^2) \dots\dots\dots \text{Ecuación.16}$$

$$\sigma^2 = \sum \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n-1}$$

Donde:

σ^2 = Representa la varianza del proceso

y_i = Representa el valor actual de la característica de calidad

$\bar{y}$ = Representa el valor promedio del proceso

n = Representa el número de eventos desarrollados

Otra distinción entre el estadístico Tipo I y el Tipo II, es que el primero se recomienda cuando la media y la desviación estándar tienen una relación lineal y el Tipo II se recomienda cuando la media y la desviación estándar son independientes (Fowlkes y Creveling, 1995). Para verificar el tipo de relación entre la media y la desviación estándar se utiliza un diagrama de dispersión con los puntos calculados a partir de los renglones del arreglo interior. Si los puntos caen en una banda horizontal a lo largo del eje X, entonces la media y la desviación estándar son independientes. Si los puntos muestran alguna relación lineal de otro tipo, son independientes. El Cuadro 1, muestra la recopilación y comparación de las características de calidad descritas en esta sección.

2.1.5 Ventajas de la aplicación de la Metodología Taguchi respecto al Diseño Clásico Experimental

Algunas de las ventajas del diseño robusto, que plantea la MT, respecto al diseño convencional son (Gutiérrez y De la Vara, 2005):

1. La introducción de la idea de robustez; en el diseño clásico no se considera la posibilidad de minimizar el efecto de un factor ruido, sin tener que controlarlo directamente, algo esencial en el diseño robusto. Con el diseño robusto se puede formular un producto o proceso: que trabaje sobre el valor objetivo con la mínima variación, que sea insensible a los cambios de las condiciones ambientales y que sea insensible a la variación transmitida por sus componentes; y al mismo tiempo tenga el menor costo de fabricación.
2. Hace énfasis en buscar siempre minimizar la varianza, al mismo tiempo que lleva la medida de su valor nominal; el diseño clásico centra su atención en mejorar el desempeño de la medida del proceso, muchas veces ignorando el comportamiento de la varianza. En diseño robusto es típico enfocar en análisis al revés: primero se minimiza la varianza y después se lleva a cabo la medida de su valor objetivo.

Cuadro 1. Comparación de la Función de Pérdida entre las características de calidad

Tipo de característica	Función de Pérdida	Pérdida Esperada	Estimación de la Pérdida Esperada	Formulación Estadística de la Pérdida Esperada
MENOR ES LO MEJOR	$k_1 y^2$	$k_1(\sigma^2 + \mu^2)$	$k_1[V + (\bar{y})^2]$	$SN_S = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y^2 \right]$
MAYOR ES LO MEJOR	$\frac{k_2}{y^2}$	$\frac{k_2}{y^2} \left(1 + \frac{3\sigma^2}{\mu^2} \right)$	$\frac{k_2}{y^2} \left(1 + \frac{3V^2}{y^2} \right)$	$SN_B = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2} \right]$
NOMINAL ES LO MEJOR	$k_1(y - m)^2$	$k_1[\sigma^2 + (\mu - m)^2]$	$k_1[V + (\bar{y} - m)^2]$	$SN_N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m)^2 \right]$

3. El diseño robusto reconoce que es durante las etapas de diseño de un nuevo producto y diseño del proceso, que el diseño de experimentos debe tener mayor impacto; de aquí que el nombre alternativo de control de calidad fuera de la línea (*off-line*) para las técnicas de calidad que se aplican en la etapa de diseño, desarrollo de nuevos productos y procesos. El diseño robusto establece que en la etapa de diseño de un nuevo producto es cuando se deben atacar las tres principales fuentes de variación que afectaran su desarrollo futuro: variables ambientales, deterioro del producto y variaciones de manufactura. El diseño clásico no enfatiza lo suficiente el hecho de que una vez diseñado el producto y su correspondiente proceso, se reduce el margen de maniobra para optimizarlo, puesto que sólo se queda por atacar la variación en la manufactura.
4. *El diseño con arreglo externo e interno*; La MT permite introducir el efecto de los factores de ruido en cada combinación de los factores controlables. Por lo general supone que al menos para fines experimentales, los factores de ruido serán controlables, lo que permite manejarlos como parte del experimento.

Wu y Wu (1991), mencionan que el uso de la SN en la optimización del sistema, presenta los siguientes beneficios:

1. La relación SN es inversamente proporcional a la función de pérdida, debido a que la SN es la relación entre los cuadrados de la sensibilidad y la variabilidad. Por tanto, su inversa es la varianza por unidad de entrada, siendo así es posible una evaluación monetaria. La pérdida es proporcional a la varianza.
2. Simplificación del diseño directo del producto. Se realiza la comparación de las relaciones SN entre los niveles de los factores de control, seleccionando aquellas con mayor relación SN como las condiciones óptimas y en base a ello se desarrolla el producto.

3. Simplificación del diseño. El uso de la SN permite al ingeniero o investigador maximizar la robustez por simple selección de los niveles de los factores de control que dan una mayor SN, el siguiente paso es ajustar la media al valor nominal. De esta manera, la eficacia de la investigación puede mejorarse por factor de diez, cien o mil.
4. Simplificación del ajuste o calibración. Uno de los elementos claves de la SN es la linealidad. Cuando la relación entrada/salida no es lineal, la desviación desde la linealidad se evalúa como el error después de la descomposición en variación. En consecuencia la SN disminuye, cuando se mejora la linealidad, la SN crece. Por tanto el ajuste del sistema es más sencillo.
5. Reducción del ciclo de vida del desarrollo del producto. La consistencia de las conclusiones obtenidas en estudios a pequeña escala en el laboratorio pueden ser fielmente reproducidas en la fabricación a gran escala y también en el mercado cuando el cliente utiliza el producto.
6. Investigación para familias de productos (desarrollo de tecnologías). Un producto individual tiene su propio valor objetivo. Tradicionalmente, se realiza la investigación cada vez que se planifica un nuevo producto. Pero para una familia de productos con la misma función objetivo dentro de un cierto rango de salida, podría ser antieconómico realizar investigaciones redundantes. En cambio, podríamos establecer una relación SN apropiada basada en la función ideal de un grupo de productos y maximizarla; el diseño de un cierto tipo de productos es fácil de obtener ajustando la señal de entrada.

No obstante las ventajas que la aplicación del MT genera, se han generado diversos debates y sugerencias en torno a su desarrollo. Lo anterior se debe principalmente a que la MT fue defendida en Occidente principalmente por empresarios y la ciencia estadística subyacente no había sido revisado formalmente por especialistas (Montgomery, 2005). Los resultados de una revisión muy completa se demostraron que los conceptos de ingeniería robusta

de Taguchi y el objetivo del diseño robusto tenían bases sólidas, aunque había detalles de fondo en la estrategia experimental (Box, 1988, Pignatiello y Ramberg, 1991; Nair *et al.* 1992). Un punto importante del diseño robusto es que sí proporciona información acerca de las interacciones de los factores de ruido y los factores de control, estas interacciones son cruciales para el diseño óptimo y la solución de problemas en un sistema (Montgomery, 2005).

2.1.6 Aplicación de la Metodología Taguchi en la optimización de procesamiento de alimentos

Las aplicaciones de la MT, para la mejora y optimización de productos y procesos se extienden a diversas áreas: construcción, industria manufacturera, electrónica, ciencias biológicas y de la salud, ciencias marinas, comunicaciones, ciencias sociales, administrativas, procesamiento e ingeniería de alimentos, por mencionar algunos (Pillet, 1994; Yang, 1995; Sarin, 1997; Barreau *et al.*, 1999; Wilkins, 2000; Jugulum y Dichter, 2001; Woodall *et al.*, 2003; Turkmen *et al.*, 2003; Takeshita y Hosokawa, 2006; Mohtada y Mohammadi, 2007). A continuación se hace una breve descripción de las aplicaciones más recientes de la MT en la optimización de procesos en la ingeniería y procesamiento de alimentos.

Rito (1990); logró un proceso que permite obtener ajo (*Allium sativum* L.) en polvo con características de color, olor y sabor que satisfacen los requerimientos internacionales del mercado (FDA). La optimización del proceso se desarrolló utilizando un arreglo ortogonal $L_4 (2^3)$, las principales variables de operación obtenidas fueron: tiempo de escaldado (10 minutos), concentración de sustancia química en escaldado (0.1%), tiempo de aireado (20 h), tiempo de secado en horno (70°C:5 h), tamaño de partícula retenida en malla (60). El contenido de la humedad final fue de 4 a 5%.

Limón-Romero (2004), desarrolló un proceso que permite determinar las condiciones óptimas de operación en el proceso de deshidratación del ajo (*Allium sativum* L.) del Distrito Rural de Ures, Sonora. Dos factores de control

fueron analizados la temperatura de secado y el tiempo de secado. Las condiciones óptimas del proceso fueron dadas por una temperatura de 70°C y con un tiempo de 6 h, lo cual generó una humedad final del 4.9% y un ángulo matiz de 86°Brix.

Chuaqui *et al.* (2004); estableció un método para optimizar la calidad de postres funcionales destinados al adulto mayor y un estudio de prefactibilidad técnico. Se utilizó un AO L₈(2⁷), con el que se estudiaron 7 factores a dos niveles de operación cada uno. Con la aplicación de la MT se logró determinar los valores óptimos de variables físicas, químicas, microbiológicas y sensoriales en el proceso de elaboración del mousse sabor naranja.

Villarroel *et al.* (2006); emplearon la MT para determinar la calidad sensorial de una formulación optimizada de mousse de linaza, utilizando un AO L₉ (3⁴) con nueve corridas experimentales. En el estudio de estudiaron cuatro variables independientes (proceso térmico, relación carragenina/gelatina, relación coco rallado/saborizante y tiempo de batido) a tres niveles de trabajo cada una. La composición química del producto optimizado fue: humedad 6%, extracto de éter 20%, proteína 20%, fibra dietaria total 18% e hidratos de carbono 26.7%, con una composición energética de 430 kilocalorías (kcal) /100 g.

Emadi *et al.* (2007), realizaron un estudio para optimizar el proceso de corte abrasivo de calabazas utilizando dos nuevos dispositivos de corte llamados almohadillas abrasivas y discos abrasivos, con el propósito de disminuir la pérdida de materia prima durante el proceso. Para evaluar corte con almohadillas se estudiaron cuatro factores con tres niveles de operación: velocidad angular del corte, velocidad angular del soporte, ángulo de las hojas de corte y punto de interacción de las navajas de corte con la calabaza; dado el número de factores se utilizó un AO L₉ para estudiar los efectos correspondientes. A su vez, para la evaluación del corte con discos se estudiaron cinco factores con tres niveles de operación cada uno: tamaño, grado

de abrasión, velocidad angular de la calabaza, velocidad angular de la cabeza cortadora y fuerza de corte, para el estudio de estos factores se utilizó un AO L₂₇. Se realizó un ANOVA para determinar la contribución y efectos de los factores sobre la variable de respuesta, además del análisis de la SN correspondiente. Los resultados muestran un incremento del rendimiento en el corte de 71.85 y 79.01% en las áreas cóncava y convexa respectivamente, este efecto reduce la pérdida de tiempo en el corte de 1.05%. Los resultados también muestran que el proceso diseñado es confiable y tiene potencialidad para escalarse a nivel industrial.

Parag y Singhal (2007); aplicaron la MT para optimizar las estrategias de requerimientos nutricionales y la condiciones ambientales de alimentación en la producción de cierto tipo de hongo. Se utilizó un arreglo L₁₆, para el estudio de cuatro factores a cinco niveles de operación cada uno y se hizo un estudio de comparación evaluando los efectos de los factores en un estudio completo (un factor a la vez). El análisis de resultados se realizó utilizando el software MINITAB 13.3. Los resultados muestran que es posible llegar a la solución óptima tanto el experimental completo como el modelo diseñado por la MT y por lo tanto obtener una producción máxima del sistema.

Tasirin *et al.* (2007), desarrollaron un diseño experimental para la optimización del proceso de deshidratación del chile "ojo de pájaro" en un secador de gabinete. Se estudió el comportamiento de tres factores: velocidad del aire, temperatura de secado, tiempo de secado con tres niveles de operación cada uno, por lo cual se utilizó un arreglo L₁₈. Los resultados obtenidos en la optimización a través del análisis de la SN, se compararon y verificaron con un análisis Pareto-ANOVA y con el análisis "un factor a la vez", presentando una coincidencia en los tres métodos en relación a las condiciones óptimas del proceso. El factor de mayor significancia en el control del proceso de secado es el tiempo de secado (86%), seguido por la temperatura (9%) y la velocidad del aire (5%). Por tanto las condiciones óptimas de secado que conducen a lograr

un mínimo porcentaje de humedad son: tiempo de secado 120 min , temperatura 70°C y velocidad del aire de 1.09 m/s .

2.1.7 Análisis de Pareto-ANOVA

El análisis de Pareto es una herramienta estadística muy utilizada en el control de calidad en los procesos. El objetivo es identificar y diferenciar las verdaderas causas o factores que afectan un determinado problema, mediante la representación gráfica o tabular de los datos relacionados con dichos efectos, logrando establecer con ellos la contribución o incidencia en el problema global. Considerando estos principios, el análisis Pareto-ANOVA es un método sencillo y rápido que se utiliza para analizar los resultados del diseño paramétrico el cual no requiere desarrollar la tabla ANOVA completa, por lo tanto no utiliza la prueba del estadístico F . Este método proporciona el nivel de significancia de los factores y las interacciones utilizadas en el diseño experimental, incluso proporciona información suficiente para determinar la combinación óptima de niveles en los factores analizados (Park, 1996).

Una vez determinada la SN deseada para la característica de calidad, el primer paso para realizar el análisis Pareto-ANOVA es obtener la diferencia entre los niveles de cada factor de operación, por ejemplo $A(N1-N2)$, $B(N1-N2)$, y así sucesivamente. Después se suman las diferencias de niveles por cada factor, por ejemplo si A presentara tres niveles de operación la suma estaría dada por $A(N1-N2)+A(N1-N3)+A(N2-N3)$. Posteriormente se obtiene el cuadrado de cada sumatoria por factor. La suma de cuadrados de todos los factores equivale al cien por ciento del efecto. Por lo tanto para determinar la contribución individual por factor se aplica una regla de tres. Finalmente, la contribución individual de cada factor se divide entre el número de grados de libertad del factor, y el resultado es la contribución o magnitud del efecto final del factor sobre la característica de calidad. Park (1996), describe detalladamente los pasos necesarios para lograr estructurar el análisis Pareto-ANOVA.

2.2 El higo

El higo común (*Ficus carica* L.), nativo del Suroeste de Asia y el Este del Mediterráneo perteneciente a la familia de las *Moráceas*, es uno de los primeros frutos recolectados y deshidratados por el hombre para su conservación y consumo, desde hace más de 9000 años (Salunke y Kadam, 1995; Chessa, 1997, Stover *et al*, 2007). El higo fue introducido de Europa a Norte América a principios de 1600, sin embargo, fue hasta 1900 cuando inició su comercialización (Ryall y Pentzer, 1982; Sfikas, 1993; Campos y Herrera, 1997; Crisosto *et al*, 2002).

Aunque se considera una fruta, el higo es una inflorescencia, la Figura 2 muestra la evolución de la flor de la higuera hasta convertirse en fruto; las flores están ocultas en el interior de un receptáculo en forma de pera que tiene un pequeño polo apical. Estas flores originan unos pequeñísimos granos duros denominados achenios, verdaderos frutos de la higuera, todo ello está cubierto por una carnosa masa jugosa y azucarada dentro del receptáculo. Las flores y frutos se desarrollan en el interior de una estructura esférica que en botánica se llama sicono o higo.



Figura 5. Etapas de crecimiento del higo (*Ficus carica* L.)

2.2.1 Características de la higuera

Las higueras forman el género *Ficus*, de la familia de las Moráceas, por tanto la higuera común es *Ficus carica* (Desai y Kotecha, 1995) y sus características principales son:

a) Botánica

La higuera es un árbol o arbusto caducifolio, que llega a medir de 3 a 10 m de altura. Tiene hojas simples, alternas ovales, rugosas, irregularmente dentadas, con 3 a 7 lóbulos, miden de 10 a 20 centímetros (cm) de longitud. Poseen un tronco con numerosas ramas gruesas y madera poco densa, se ramifica a poca altura del suelo y llega a tener de 12 a 30 ramas en promedio (Stover *et al.* 2007).

Flor.-La inflorescencia donde se arreglan las flores se llama sicono, a flor femenina tiene cinco pétalos y un sólo carpelo de color rosado arreglado en el fondo del sicono, la flor masculina con 3 sépalos y tres estambres esta arreglada en la entrada del sicono. Los higos comunes sólo producen flores postiladas de estilo largo. (Desai y Kotecha, 1995).

Fruto.- El fruto es un sícono blando elipsoide, carnoso, recubierto con una piel muy fina, con pequeños y numerosos aquenios incluidos en el fruto, según la variedad puede ser de color negro a morado, azulado, verde, amarillo-dorado e incluso puede presentarse con franjas verdes y amarillas. El fruto mide en promedio de 3 a 10 cm de largo y tiene sabor dulce, mucilaginoso. El sícono o fruto falso es en realidad el receptáculo que en su evolución se hincha y se vuelve carnoso tras la fecundación, formando la breva o el higo según sea la fecha de madurez. El peso promedio higo es de 36 ± 19 gramos (g) y el número promedio de aquenios por sicono es de 8.

Hábitat.- El desarrollo y crecimiento de la higuera es favorecido por inviernos benignos y veranos calurosos con poca precipitación. Es una especie típica del mediterráneo (subtropical con inviernos cálidos y veranos secos y frescos) que

resiste bien el frío. En México requiere una temperatura media anual de 17°C a 19°C y una precipitación anual de 90 a 120 milímetros (*mm*). Es un árbol poco exigente en cuanto a suelos, crece en tierras fértiles y en áridas, con un pH de 8 a 8.5. No debe plantarse en suelos arenosos, ligeros y sumamente ácidos. Para producir frutos de buena calidad conviene suelos ricos en calcio. Las higueras maduras pueden soportar heladas de hasta -10°C (el fruto muere a los -6°C) y sequías prolongadas. Además, las higueras son resistentes a los daños causados por los isópteros (termitas) y toleran aguas de riego hasta con 2 g de Cloruro de Sodio por litro. Sin embargo, la higuera es vulnerable a la humedad en exceso lo cual origina la pudrición de la raíz, también al daño por virus, hongos e insectos (Miranda y Bastistella, 2000; CONABIO, 2002).

b) Variedad Kadota

Actualmente, se conocen entre 600 y 1900 especies pertenecientes al género *Ficus*, de entre las cuales alrededor de 750 son variedades comestibles de higo (Stover *et al*, 2007). En América existen cinco principales variedades comerciales: Misión, Adriatic, Calimyrna, Brown Turkey y Kadota (ERS-USDA, 2004). Cada variedad se distingue por su color característico, el cual va de púrpura oscuro a dorado-ámbar pasando por el verde (Solomon *et al*. 2006). Específicamente, la variedad Kadota es de tamaño pequeño, con pocas semillas, piel delgada, y adquiere un color amarillo-ámbar en la etapa de madurez comercial. Esta variedad es la versión americana de la variedad italiana Dattato, en otras partes del mundo se conoce como medott, white endrich, white pacific y abruzzes. La variedad kadota es utilizada mayormente en los procesos de envasado y deshidratado (Desai y Kotecha, 1995; Miranda y Bastistella, 2000, Ferguson y Crisosto, 2007).

c) Características del Cultivo

La producción de higo está influenciada fuertemente por las condiciones climatológicas y la localización del cultivo. La primer fructificación comercial ocurre entre los 3 y 4 años de edad de la planta, y la edad de máximo

rendimiento es a los 10 años. El volumen de cosecha promedio por árbol es de 55 kilogramos (*kg*), la población normal por hectárea (*ha*) es de 115 árboles. En condiciones áridas y con cuidados mínimos se logran obtener de 5 *t* a 7 *t* por *ha*, mientras que bajo condiciones favorables de riego se logran obtener 12 *t/ha* (Grassi, 1991). Un árbol con una copa de 2 *m* de diámetro puede dar de 60 a 80 *kg* de higo fresco o de 20 a 27 *kg* de higo seco.

El cultivo de higueras comunes se clasifica, según el número de cosechas anuales, en dos tipos: 1) Higueras bíferas o reflorcientes, llamadas brevaes, breberas o bacoreras, que dan frutos de Junio a Julio (brevas) y de Agosto a Noviembre (higos), y 2) Higueras comunes, que sólo dan una cosecha (higos) de Agosto a Septiembre.

d) Madurez, Cosecha y Poscosecha

Se conoce como madurez de consumo o comercial, al estado de desarrollo en el que el fruto ha alcanzado su máxima calidad estética y sensorial que lo hacen apto para el consumo humano inmediato (Kader, 1992). Existe una amplia cantidad de características físicas de los productos vegetales empleadas para evaluar su madurez y establecer el periodo de cosecha, algunas de las más importantes son: la forma, el tamaño, el color y las características de la superficie como rugosidad o brillo (Barret *et al.* 2005). Por otra parte, la madurez fisiológica de los frutos frecuentemente está asociada a muchos cambios en su composición química y algunos de ellos pueden emplearse como indicadores de madurez satisfactorios; entre los más utilizados se encuentran: Grados Brix, Sólidos Solubles Totales (SST), Acidez Títulable, Relación SST/Acidez, Color, por mencionar algunos (Willis *et al.* 1989; Kays, 1991, Barret *et al.* 2005).

Grados Brix (°Brix); Representan el porcentaje de sacarosa determinado en el jugo del fruto, se miden utilizando un brixómetro o un refractómetro para grados brix, las lecturas registradas están dadas a la temperatura indicada por estos instrumentos.

SST; Las frutas y hortalizas contienen otros sólidos solubles diferentes de la sacarosa, esto es, otros tipos de azúcares y también ácidos orgánicos, por lo que es más frecuente determinar el contenido total de éstos en un tanto por ciento. Para ello, se emplean instrumentos como el refractómetro. Frecuentemente se consideran los °Brix como equivalentes de los SST porque el mayor contenido de sólidos solubles en el jugo de las frutas son azúcares, sin embargo es más preciso realizar las correcciones pertinentes a las lecturas registradas con los brixómetros para obtener datos reales en términos de SST. En el caso del higo, se ha reportado que el contenido de glucosa es mayor al de fructuosa durante la maduración del fruto (Chessa *et al.* 1992), asimismo el higo presenta un incremento del contenido de azúcar del 90% al llegar al estado de madurez comercial (Crane, 1986).

Acidez Títulable. La mayoría de las frutas son particularmente ricas en ácidos orgánicos que están usualmente disueltos en la vacuola de la célula, ya sea en forma libre o combinada como sales, ésteres, glucósidos, etc. La acidez libre (acidez titulable) representa a los ácidos orgánicos presentes que se encuentran libres y se mide neutralizando los jugos o extractos de frutas con una base fuerte, el pH aumenta durante la neutralización y la acidez titulable se calcula a partir de la cantidad de base necesaria para alcanzar el pH del punto final de la prueba; en la práctica se toma como punto final pH = 8.5 usando fenolftaleína como indicador. Bajo estas condiciones, los ácidos orgánicos libres y sólo una parte del ácido fosfórico y fenoles están involucrados en el resultado final. Para reportar la acidez, se considera el ácido orgánico más abundante del producto vegetal, el cual varía dependiendo de la especie de que se trate, por lo que el resultado se expresa en términos de la cantidad del ácido dominante. El higo inmaduro contiene altos niveles de ácido cítrico el cual disminuye un 50% con la maduración (Chessa, 1997).

Relación SST/Acidez. Desde el punto de vista práctico, los azúcares y la acidez son componentes muy prácticos en poscosecha y la relación que guardan constituye un índice, incluso legal, del estado de madurez para la cosecha de cítricos y uvas (Kumar y Hoda, 1974; Durán, 2006).

Color. La maduración de las frutas generalmente va unida a una variación del color, la transición más habitual de verde a otro color, está relacionada con la descomposición de la clorofila, de modo que quedan al descubierto otros colorantes que antes ocultaba dicho compuesto. Además, aumenta la producción de colorantes rojos y amarillos característicos de las frutas maduras. El contenido de carotenos, por ejemplo, se incrementa fuertemente en los cítricos y el mango durante la maduración. La formación de otros colorantes como las antocianinas, suele estar activada por la luz. Particularmente, el higo kadota madura de verde a amarillo-cobrizo, debido a que durante la fase final de maduración existe una concentración mayor de azúcares lo cual contribuye al rápido oscurecimiento de la piel (Solomon *et al.* 2006).

Los indicadores de madurez descritos son índices sencillos, precisos y confiables que permiten determinar el estado de madurez adecuado para la cosecha, pueden emplearse como referencia del estado de madurez poscosecha y también como información objetiva relacionada con la calidad (Durán, 2006).

El estado de madurez que poseen las frutas al ser cosechadas, es el factor más importante a considerar ya que determina la calidad y potencial de conservación de las frutas para su manejo, transportación y comercialización. En general las frutas se clasifican en climatéricas y no climatéricas; las climatéricas son aquellas frutas que se cosechan una vez que han alcanzado su madurez total (moras, toronjas, limón, naranja, piña, fresas), y las no climatéricas son frutas que pueden ser desprendidas de la planta o árbol maduras o inmaduras puesto que su proceso de maduración continua después de la cosecha (manzanas,

peras, duraznos, kiwi, aguacate, mango, papaya, plátanos) (Barret *et al.* 2005). El higo pertenece al grupo de las frutas no climatéricas, los factores que usualmente se consideran como indicadores del grado de madurez en los higos frescos están relacionados con las características organolépticas y la apariencia, dichos factores son: el tamaño, forma y color típico de la variedad (Salunke y Kadam 1995; Chessa, 1997, Solomon *et al.* 2006). La ruptura superficial de la piel produce pérdida de nutrientes, incluso está correlacionada negativamente con la pérdida del contenido de calcio (Aksoy y Akyuz, 1992). La textura del higo es otro indicador importante del estado de madurez utilizado. Estudios realizados por Díaz-Sánchez (2008), muestran que el higo kadota presenta de tres a cuatro etapas de maduración, las cuales van de inmaduro, maduro, madurez comercial y sobremaduro; en éste último es el que presenta la textura con mayor debilidad.

Los higos frescos deben ser cosechados preferentemente en la mañana (lo más temprano posible), cuidando que la fruta no se dañe al ser desprendida del tallo. Después de la recolección, la fruta debe ser colocada en canastas donde se asegure la circulación del aire y se evite el movimiento horizontal o vertical, las canastas no deben sobresaturarse con la fruta para evitar el aplastamiento. Los criterios que determinan el tiempo óptimo de recolección, son principalmente dos: el color y la firmeza del fruto. Los higos negros deben recolectarse antes de adquirir un color violeta o azulado, por otra parte los higos claros deben recolectarse antes de que la piel tome un color amarillo claro o bien adquiera tonalidades blancas (Chessa, 1997).

El proceso de respiración de las frutas cosechadas es uno de los indicadores más importantes que determinan el periodo de vida poscosecha de la fruta. Durante el proceso de respiración de las frutas el oxígeno es transformado en dióxido de carbono, lo cual contribuye a la pérdida o degradación de sus características de calidad (especialmente de sabor, olor y nutrimentales). El grado de deterioro en la frutas es directamente proporcional al nivel de

respiración, por ejemplo el higo, la papaya, el damasco, el aguacate (maduro), la chirimoya y otras frutas presentan niveles altos de respiración (Barret *et al.* 2005).

Para mantener la calidad del higo, se recomienda un enfriado inmediato mediante aire forzado a 0°C, para un almacenamiento prolongado se recomiendan temperaturas iguales o menores a 0°C. Los higos son levemente sensibles al efecto del etileno en la aceleración del ablandamiento y en el agravamiento de las pudriciones, especialmente si se mantienen a temperaturas iguales o mayores a 5°C (Crisosto *et al.* 2002). Asimismo, se han reportado temperaturas de 0°C a 1.7°C y humedad relativa del 85 al 90% para conservar el higo hasta por siete semanas, aunque durante el este periodo se pierde cerca del 11.5% del peso total del fruto (Salunke y Kadam, 1995). Es importante mencionar que las condiciones mencionadas varían de acuerdo al tipo de variedad y etapa de madurez en el momento de la cosecha, por ejemplo para higos "Black Mission" y "Calimyrna" se han almacenado hasta por 2 semanas en aire y entre 3 a 4 semanas en aire acondicionado (Crisosto *et al.* 2002).

2.2.2 Composición Nutricional

El Cuadro 2, muestra la composición nutricional del higo fresco. Como se puede observar, el higo es fuente natural de fibra y energía, contienen sales como potasio, magnesio, calcio y vitaminas A, B1, B2, B3 y C; además contienen entre el 19% y el 25% de azúcar y entre el 0.16% y el 0.27% de ácidos. Aunque el ácido cítrico es el ácido predominante en los higos, estos también contienen otros ácidos orgánicos como el ácido málico y el ácido acético (Chessa, 1997), Estudios realizados por Lianju *et al.* (2003) y Vinson *et al.* (2005) muestran que el higo posee mayor concentración de minerales y vitaminas, por ejemplo una porción de 100 g, contiene: 30% hierro, 15.8% calcio, 14% potasio, Tiamina (B₁), 7.1%, 6.2% B₂; por otra parte contienen un 5.5% de fibra dietaria (w/w), mayor al reportado en frutas como la manzana, la naranja, el plátano, las uvas, las pasas, las ciruelas entre otras. Finalmente los higos presentan niveles muy bajos de

Cuadro 2. Composición Nutricional de higos frescos

Componentes	Porción en 100gr
Agua (gr)	78.0 - 83.50
Proteína (gr)	1.10 - 1.4.0
Grasa (gr)	0.40 - 0.50
Carbohidratos (gr)	12.90
Fibra Dietaria Total (gr)	2.04
Sodio (mg)	2.00
Potasio (mg)	190.0 - 290.0
Magnesio (mg)	20.00
Calcio (mg)	54.00
Hierro (mg)	0.60
Cobre (µg)	70.00
Zinc (mg)	0.10 - 0.40
Fósforo (mg)	32.00
Yodo (µg)	1.50
Caroteno (µg)	48.00
Vitamina B1 (µg)	31.00 - 50.00
Vitamina B2 (µg)	50.00
Vitamina B6 (mg)	0.11
Vitamina C (mg)	8.80
Acido Fólico (µg)	4.90

Fuente: Souci, Fachmann y Kraut, 1989/90

sodio, grasa y colesterol; y contienen por lo menos 17 aminoácidos (Lianju *et al.* 2003).

2.2.3 Propiedades Funcionales y beneficios a la salud

Los alimentos funcionales, son aquellos que se consumen como parte de una dieta normal y contienen componentes biológicamente activos, que ofrecen beneficios para la salud y reducen el riesgo de sufrir cierto tipo de enfermedades, entre ellas el cáncer. Entre los alimentos funcionales, destacan las frutas y vegetales que contienen determinadas concentraciones de minerales, vitaminas, ácidos grasos o fibra dietaria; los alimentos a los que se han añadido sustancias biológicamente activas, como los fitoquímicos u otros antioxidantes, y los probióticos, que tienen cultivos vivos de microorganismos beneficiosos (Ashwell, 2001). La tendencia del mercado actual es producir alimentos que promuevan el cuidado de la salud y contribuyan a reducir el riesgo o retrasar la aparición de importantes enfermedades, como las enfermedades cardiovasculares, el cáncer y la osteoporosis.

Vinson (1999), Dueñas *et al.* (2008), Del Caro y Piga (2008), presentan una revisión muy completa sobre las propiedades funcionales del higo, donde destacan las propiedades antioxidantes y la presencia de polifenoles en el higo. Vinson (1999), sugiere que el consumo de higo ayuda a reducir el riesgo desarrollar ciertos tipos de cáncer como el de hígado, pulmones y colon. Una porción de 40 g de higo proporciona 444 miligramos (mg) de polifenoles (los cuales aumentan la capacidad antioxidante en la sangre), esta cantidad es superior al consumo diario sugerido de 218 mg (Vinson *et al.* 1999; Vinson *et al.* 1998). Solomon *et al.* (2006), revela la presencia de antocianinas en cinco variedades comerciales de higo incluyendo la variedad kadota; la antocianina juega un rol importante en la prevención de degeneración de células de órganos en humanos, en combinación con el ácido elágico desarrolla una potencia preventiva contra ciertos tipos de cánceres. Por otra parte los antioxidantes contenidos en el higo protegen las lipoproteínas (en el plasma) de la oxidación, y

producen un incremento significativo en la capacidad antioxidante por cuatro horas posteriores al consumo. El consumo de antioxidantes naturales mejora la calidad de vida, previniendo varias enfermedades, entre ellas, las cardíacas como la obstrucción de la arteria coronaria (Hertog *et al.* 1996).

2.2.4 Procesamiento e Industrialización

Debido a la naturaleza perecedera del higo, las dificultades que representa su transporte y su corta vida en anaquel, es una fruta muy susceptible al procesamiento, existiendo en el mercado una variedad de productos derivados, entre los cuales destacan el higo seco o deshidratado, el higo en almíbar, barras de higo, mermeladas, jugos concentrados, higos con cubierta de chocolate, los higos saladitos, el higo en polvo utilizado como ingrediente de productos de repostería y en el arte culinario en general. Alemania consume un promedio anual de 9, 706,000 toneladas métricas (*tm*) de higo deshidratado generando ingresos de \$19, 294,000 de dólares a Turquía y Estados Unidos, dos de los principales países exportadores de higo deshidratado (FAOc, 2004). El 85% de la producción de higo en California, Estados Unidos es deshidratada, donde la variedad Kadota se comercializa principalmente en conservas de almíbar, productos deshidratados y pastas (ERS-USDA, 2004). Por otra parte, México exporta un promedio de 292 *tm* de higo deshidratado, generando ingresos de \$1,578 dólares (FAO, 2004).

Además de las ventajas económicas que presenta el mercado de higo deshidratado, también posee propiedades nutricionales importantes de calidad incluso comparándolo otras frutas comerciales, tal y como se muestra en los Cuadros 3 y 4. El Cuadro 3, muestra que una porción de 100 g contiene 283 calorías, lo cual representa el 14.15% de la ingesta promedio (2000 calorías por día) recomendada por el Instituto Americano de Nutrición y Alimentación (DRI por sus siglas en inglés Dietary Reference Intakes of Food and Nutrition Board, Institute of Medicine). Por otra parte, el higo al igual que otras frutas y vegetales,

Cuadro 3. Composición Nutricional de higos secos

Componentes	Porción en 100gr
Calorías Totales	283
Calorías/grasa	4.7
Grasa (gr)	0.52
Grasa Saturada (gr)	0.00
Colesterol (mg)	0.00
Sodio (mg)	12.26
Potasio (mg)	609.00
Carbohidratos Totales(gr)	66.16
Fibra Total (gr)	12.21
Insoluble (gr)	8.74
Soluble(gr)	3.47
Azúcar (gr)	49.00
Proteína (gr)	3.14
Vitamina A (IU)	9.76
Vitamina C (mg)	0.68
Calcio (mg)	133.00
Hierro (mg)	3.07

Fuente: Reporte de California Fig Advisory Board, 1998.

Cuadro 4. Comparación Nutricional del higo con otras frutas comunes

Fruta (38 gr)	Calorías (Kcal)	Fibra Dietaria (gr)	Potasio (mg)	Calcio (mg)	Hierro(mg)
Higo Seco	95	3.70	258	62	0.770
Dátil	107	3.03	249	14.73	0.380
Uva Pasa	114	1.41	284	19.13	0.710
Nuez	190	1.90	225	100.52	2.300
Manzana	141	0.90	40.75	2.2	0.048
Fresa	140	0.90	59	5.77	0.147

Fuente: Nutritive Value Foods 2002. USDA *National Nutrient Database for Standard Reference, Release 20*.
Home and Garden Bulletin No. 72

no contiene colesterol y grasa saturada además de presentar niveles bajos de sodio y grasas.

La DRI de fibra recomendada es de 21 a 30 g, como se puede observar una porción de 100 g aporta del 40 a 58% de la ingesta diaria recomendada (DRI, 2002). Está comprobado que el consumo de fibra está asociado con numerosos beneficios a la salud principalmente en la prevención de enfermedades cardiovasculares y la reducción del riesgo de padecer cierto tipos de cáncer como: cáncer de colon, apendicitis, infartos, diverticulosis y litiasis (Watanabe, 1979). Brender *et al.* (1885), demostró en un estudio epidemiológico que al aumentar los niveles de consumo de fibra entre 70 g y 100 g al día, la incidencia de apendicitis disminuye hasta cerca de un 50 %. Rutishauser (1985) estima que el consumo de fibra dietaria para México es de 47 g/persona/día, sin embargo Bright-See y Keown-Eyssen (1984), estiman un consumo promedio de 39.9 g/persona/día, tomando en cuenta que nuestra dieta contiene al maíz como base. Por otra parte, el Cuadro 4 muestra un contenido superior de fibra en el higo en comparación con el contenido en frutas como dátil, uva pasa, manzana y fresa. También se puede observar que el contenido de potasio y potasio del higo seco es mayor al reportado en el dátil, manzana y fresa, algo similar ocurre con el contenido de hierro.

2.2.5 Producción Mundial de higo

En la actualidad, el cultivo del higo es de gran importancia comercial en el consumo mundial de frutas. Cada año se producen en promedio 1,056,820 *tn*. Turquía es el mayor productor, aportando el 27% de la producción mundial con 285, 000 *tn* lo cual genera ingresos de \$99' 260'000 millones de dólares aproximadamente. Egipto es el segundo mayor productor con 160,120 *tn*, seguido de Irán con 90,000 *tn*, Argelia con 63,000 *tn* y Marruecos con 60,000 *tn*. En América, Estados Unidos es el mayor productor con 46,090 *tn*, secundado por Brasil con 26,840 *tn* (FAO, 2005).

Brasil, México, Argentina y Chile son los principales productores de higo de América Latina. A excepción de Brasil, ninguno de los otros países ha incrementado el desarrollo de su producción. En años recientes, Argentina ha renovado su interés en la cosecha del higo, llegando a producir el doble en algunos de sus estados, a través de la creación de plantaciones de alta densidad. La mayor parte de la producción en Latinoamérica se destina al mercado local de productos frescos (Botti y Muchnik, 1998).

a) Exportación e Importación

Turquía exporta anualmente un total de 171,070 *tn* de higo, lo que representa un 52% de la exportación mundial. El 70% del higo exportado es higo seco (Askoy *et al.* 2003). Estados Unidos es el segundo país con mayor exportación de higo y el mayor en América con 12,950 *t* anuales, el 100% del higo de exportación se produce en California, en el Valle de San Joaquín (USDA, 2005). Los mayores consumidores mundiales de higo seco son: Alemania, Francia e Italia con 9,706,000 *tm*; 9,155,000 *tm* y 5,795,000 *tm* anuales, respectivamente.

2.2.6 Producción Nacional

Las primeras higueras plantadas en México fueron en 1560, sin embargo en la actualidad, la higuera se cultiva de forma aislada en nuestro país y es considerada como una especie marginal. Según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), los mayores productores de higo en nuestro país, durante el 2006, fueron Morelos e Hidalgo con 4,630 *tn* y 615 *tn* respectivamente, tal y como lo muestra el Cuadro 5. Como se puede observar, Sonora ocupa el octavo lugar de importancia en la producción nacional de higo, sin embargo es el mayor productor de la variedad kadota (SIAP, 2006). El 32.86% de la producción de higo nacional es exportada, generando ingresos de \$1,640,000 de dólares. México ocupa el décimo sitio en la lista de los principales países exportadores mundialmente y el segundo en América después de Estados Unidos (USDA, 2005).

Cuadro 5. Producción Nacional de Higo ciclo 2006, Modalidad Riego+Temporal.

Estado	Superficie Sembrada (ha)	Superficie Cosechada (ha)	Producción (t)	Valor Producción (Miles de pesos)
1 MORELOS	612	599	4,630	41,842
2 HIDALGO	66	66	615	2,460
3 VERACRUZ	45	45	534	2,136
4 BAJA CALIFORNIA SUR	268	268	234	6,409
5 DISTRITO FEDERAL	22	22	122	632
6 DURANGO	9	9	108	756
7 SAN LUIS POTOSI	10	10	50	300
8 SONORA	7	7	39	597
9 BAJA CALIFORNIA	9	9	9	54
TOTAL	1,047	1,034	6,341	\$55,185

Fuente: SIAP-Anuario Estadístico de la Producción Agrícola 2006.

2.2.7 Producción en Sonora

El Distrito Rural de Caborca, es el único productor de higo variedad kadota en el Estado con un promedio anual de 48t, alcanzando incluso las 50t en épocas de lluvias prolongadas. Durante el 2006, se produjeron 38.5t, con un valor de \$596.75 mil pesos y un rendimiento por ha es de 5.5tn (SIAP, 2006).

2.3 Deshidratación de Frutas

La deshidratación industrial o deshidratación artificial de frutas es un método importante de preservación de una extensa variedad de frutas y productos, que se sustenta tanto en conocimientos científicos y de ingeniería como en el empirismo (Ratti y Mujumdar, 2005). La deshidratación se define como la extracción deliberada y en condiciones controladas del agua contenida en los alimentos a través de la evaporación (o sublimación en el caso de la deshidratación en frío), extendiendo con ello la vida útil de las frutas a través de la reducción del contenido de humedad y de la actividad del agua (a_w) (Sun, 2006).

El agua libre de las frutas y hortalizas es el agua que está disponible para las reacciones químicas, para el desarrollo de microorganismos y para actuar como medio de transporte de los compuestos. Sin embargo, se ha comprobado que frutas y alimentos en general con el mismo contenido de humedad se descomponen de forma diferente, por lo que se deduce que el contenido de humedad no es por sí sola una herramienta indicativa del deterioro de los alimentos, razón por la cual se utiliza la a_w como indicador de la fracción del contenido de humedad de un producto que esta libre, y en consecuencia disponible, para el crecimiento de microorganismos y para que se puedan llevar a cabo diversas reacciones químicas que afectan su estabilidad (Fennema, 1985, Ratti y Mujumdar, 2005). Un incremento de la a_w generalmente va acompañado de un aumento en el contenido de agua, aunque no de forma lineal (Ratti y Mujumdar, 2005). Por lo tanto, las frutas con mayor contenido de humedad son las más perecederas, en el caso del higo se ha reportado

contenidos de humedad del 78 al 83% en higos maduros (Salunke *et al*, 1995, Desai y Kotecha, 1995).

El uso de las distintas técnicas y métodos de deshidratación han permitido incrementar la calidad nutritiva de las frutas, modificar la calidad sensorial, facilitar el consumo, elaborar nuevos productos y diversificar el mercado de consumo, además de lograr su disponibilidad fuera de la estación de producción (Ordoñez, 1998). King (1974), establece como objetivos principales del proceso de deshidratación los siguientes:

1. Calidad del Producto;

- Degradación mínima de las reacciones químicas y bioquímicas.
- Eliminación selectiva del agua sobre otras sales y sustancias volátiles de sabor y aroma.
- Mantenimiento de la estructura de la materia prima.
- Densidad del color.
- Rápida y simple rehidratación.
- Estabilidad en el almacenamiento del producto: requerimientos mínimos de refrigeración y empaque.
- Estabilidad del color de la materia prima.
- Libre de contaminación o adulteración.

2. Economía del proceso;

- Mínima pérdida del producto.
- Eliminación rápida del agua.
- Recursos económicos de energía.
- Problemas mínimos de mantenimiento.
- Facilidad para realizar procesos continuos.
- Facilidad en el manejo y operación del equipo.

3. Mínimo impacto ambiental.

2.3.1 Factores que influyen en el proceso de deshidratación

Para lograr resultados de calidad durante el proceso de deshidratación es necesario considerar los siguientes factores en la planeación del proceso: a) las condiciones del proceso, b) la naturaleza del alimento y c) el equipo a utilizar (Fellows, 2000).

2.3.1.1 Condiciones del proceso

La calidad de los alimentos deshidratados está influenciada por las condiciones del proceso y se determina en relación a la degradación física y bioquímica ocurrida en los alimentos durante la deshidratación. (Heldman y Lun, 2000). Para obtener frutas deshidratadas de alta calidad, es necesario que la materia prima sea de calidad. El clima, variedad de cultivo, manejo en campo, época y forma de cosecha, y proceso poscosecha, son factores que determinan características de calidad importantes como la apariencia (tamaño, forma, color, brillo, defectos), textura (firmeza), sabor (dulzura, acidez, aroma) y la seguridad (higiene, residuos químicos de fertilización) de la materia prima. Los componentes mencionados, además de determinar gran parte de la calidad del producto final, son agentes claves para establecer la disponibilidad de la materia prima para un proceso determinado (Ordoñez, 1998).

Para conservar la higiene, la estabilidad de almacenaje, la retención del color, sabor y las propiedades nutricionales de las frutas frescas se requiere, del desarrollo de pretratamientos u operaciones unitarias como el lavado, el descascarado, el pelado, el escaldado, la inmersión en soluciones alcalinas, el tratamiento con soluciones sulfurosas, entre otros (Ibarz, 2003).

a) Lavado

En la operación de lavado, el método de lavado en húmedo es el más utilizado en la limpieza de frutas. La materia prima se sumerge en agua fría para remover las partículas y residuos contaminantes de la superficie como polvo, tierra, hojas, tallos, etcétera. La adicción de soluciones cloradas para desinfectar la materia

prima generalmente sucede durante ésta operación (Fellows, 2000). Generalmente, se recomienda concentraciones de 100 a 150 partes por millón (*ppm*) (Ratti *et al.* 2005).

b) Escaldado

El escaldado tiene varias funciones, una de las principales es destruir la actividad enzimática en los vegetales y frutas, previo a futuros procesamiento (Cano, 1996). Durante ésta operación, la materia prima es expuesta en un medio húmedo a temperaturas elevadas durante un periodo corto de tiempo, para posteriormente colocarse a temperatura ambiente (Sun, 2006). Los dos métodos más utilizados para escaldar son 1) el paso de la fruta o vegetal a través de una atmósfera saturada de vapor, o bien 2) la inmersión de la materia prima en baños de agua caliente. Generalmente, la temperatura de escaldado va de 70°C a 100°C y el tiempo de 1 min hasta 15 min, estas condiciones varían según el medio utilizado y las características de la materia prima a escaldar. Por otra parte, se ha comprobado que temperaturas de 100°C y tiempos de 0.58 min conservan mejor la firmeza en las frutas y vegetales, en comparación con el uso de bajas temperaturas por periodos largos de tiempo como 70°C a 10 min (Roy *et al.* 2001). En el caso del escaldado de higo, Piga *et al.* (2004) reporta buenos resultados al utilizar tiempos de 1 min a 3 min (no se especifica la temperatura de escaldado), utilizando 3% de Metabisulfito de Sodio, lo cual contribuye a reducir el tiempo de deshidratación de 54 h a 33 h. Por otra parte, estudios realizados con la variedad kadota cultivada en el Distrito de Caborca, revelan que se obtienen mejores resultados al escaldar el higo en términos de color, textura y humedad, en comparación con los resultados del higo deshidratado sin escaldar (Amaya-Flores, 2008).

Por otra parte, los factores que determinan la calidad del proceso de escaldado son: tipo de fruta, tamaño, estado de madurez, tiempo de escaldado, temperatura de escaldado (el uso de temperaturas superiores a los 70°C en intervalos cortos de tiempo produce menor pérdida de vitaminas), y método de

escaldado (Sun, 2006). Esta operación puede causar alguno de los siguientes efectos: la reducción del tiempo de deshidratación; la eliminación del aire intercelular de los tejidos en la materia prima; el suavizamiento de la textura superficial; retrasa el desarrollo de olores y sabores desagradables de la materia prima durante el almacenamiento, debido al crecimiento enzimático; ayuda en la retención de caroteno y ácido ascórbico durante el almacenaje; causa baja pérdida de sólidos solubles (Heldman y Lund, 2007). Asimismo, diversos estudios han demostrado que el escaldado aumenta la intensidad del color de algunas frutas y vegetales secos con humedad intermedia (Cumming *et al.* 1981; Selman, 1987; Beveridge y Weintraub, 1995; Latapi y Barrett (2006); Kingsly *et al.* 2007; Ngo *et al.* (2007); Castro *et al.* 2008).

c) Reducción del Tamaño de partícula

Según las características fisicoquímicas, nutricionales y termofísicas de las frutas, estas pueden ser deshidratadas enteras (uvas, fresas, damascos, ciruelas, higos), en rodajas (mango, papaya, kiwi, plátano, duraznos), o bien en tamaños pequeños de partícula (Sweat, 1995; Saravacos y Kostaropoulos, 1996; Rao, 2000; Ratti y Mujumdar, 2005, Kingsly *et al.* 2007).

El tamaño de partícula se clasifica según el rango de reducción en: a) cortado, rebanado, picado, cortado en cubos; b) molienda fina para obtener polvo y, c) emulsificación y homogenización (Fellows, 2000). Tanto en frutas maduras e inmaduras, la reducción del tamaño de partícula acelera la oxidación (lo cual aligera la actividad enzimática y microbiológica), la pérdida de sabor, olor y por consiguiente el deterioro de la fruta (Erdman y Erdman, 1982; Fellows, 2006). Papoff *et al.* (1998); Gallali *et al.* (2000); Piga *et al.* (2004) y Xanthopoulos *et al.* (2007); utilizaron higo entero en el proceso de deshidratación, el cual en todos los casos se encontraba en estado de madurez comercial.

Fellows (2000), establece que con un tamaño pequeño de partícula en la fruta a deshidratar la eliminación del contenido humedad es mayor y más rápida. En

efecto se han desarrollado varios modelos de predicción de la eliminación en la humedad de frutas con base en el tamaño de partícula, los cuales coinciden con ésta afirmación (Broker *et al.* 1992; Karathanos y Belessiotis, 1999; Xanthopoulos *et al.* 2007). Por otra parte, Montoya-Ballesteros (1991), propone utilizar un tamaño de partícula grande, cuando la fruta que se desea deshidratar presenta sobremadurez.

2.3.1.2 Naturaleza de la fruta

Kramer y Twigg (1970), definen la calidad de las frutas procesadas, como el conjunto de características sensoriales (color, textura, sabor, apariencia), nutricionales y de seguridad que determina el grado de aceptabilidad de los consumidores. Por tanto, es necesario tener conocimientos de ingeniería y procesamiento de alimentos, para realizar un correcto diseño, simulación, optimización y control del procesado de frutas y vegetales en general (Delgado *et al.*, 2006). Los mayores indicadores de calidad en los procesamientos de deshidratación de las frutas son el color, el aroma, el sabor, la textura y la conservación de las propiedades nutricionales (Sun, 2006). Algunas frutas son más sensibles a la transmisión de calor que otras, y por tanto los métodos utilizados para su procesamiento varían en relación a este hecho. El higo tiene gran adaptabilidad para la deshidratación con aire caliente, deshidratación por congelación, osmótica e incluso para la deshidratación al vacío, así lo demuestran algunos estudios realizados recientemente (Papoff *et al.* 1998; Gallali *et al.* 2000; Piga *et al.* 2004, Arreola y Rosas, 2007 y Xanthopoulos *et al.* 2007).

2.3.1.3 Equipo

La elección de equipo adecuado en el proceso de deshidratación depende en gran medida de la forma física de la fruta y del producto final que se desee obtener. La Figura 3, muestra una guía general para la elección del equipo de secado, propuesta por Ratti y Mujumdar (2005). Como se puede observar, para la deshidratación de frutas con tamaño de partícula pequeño se recomienda

utilizar cabinas y gabinetes de aire frío o caliente. Estudios recientes relacionados con la deshidratación de higo entero reportan buenos resultados en términos de color y contenido de humedad al utilizar gabinetes de aire caliente. (Papoff *et al*, 1998; Gallali *et al*, 2000; Piga *et al*, 2004, Xanthopoulos *et al* 2007, Amaya-Flores, 2008). Por otra parte, se ha reportado que el uso de gabinetes de aire caliente en la deshidratación de frutas y hortalizas en rodajas o capas finas, produce igualmente buenos resultados (Madamba *et al*. 1996, Sarsavadia *et al*. 1999, Akpinar y Bicer, 2005, Kingsly *et al*. 2007).

Por otra parte, existe gran variedad de equipos comerciales para el deshidratado con aire caliente. El Cuadro 6, muestra de forma general las características de algunos de los equipos comerciales que existen en el mercado, según las características del alimento y el tipo de proceso de deshidratación a desarrollar. En el caso de la deshidratación del higo, el cual posee un contenido de humedad del 83 al 87% (Chessa, 1995), el secado en gabinete y el secado en túnel son los más utilizados, ya que permiten desarrollar procesos escalonados (Papoff *et al*. 1998) o bien continuos (Piga *et al*. 2004, Tasirin *et al*. 2007), e incluso combinar cabinas de secado solar y el secado en gabinete (Gallali *et al*. 2000).

Por otra parte, el costo del equipo está directamente relacionado con la capacidad y la eficiencia, al respecto Axtell y Bush (1991) y Axtell y Russell (2000); hacen una comparación del equipo disponible en el mercado para la producción a pequeña y gran escala de productos deshidratados, donde destaca; el Secador de Gabinete como uno de los mejores y más económicos para la producción a pequeña escala (con capacidad de 500 *kg* por cada 24 *h*), mientras que para la producción a gran escala es el Secador de Túnel (con capacidad de 6000 *kg* por cada 24 *h*). El consumo de energía y el costo de

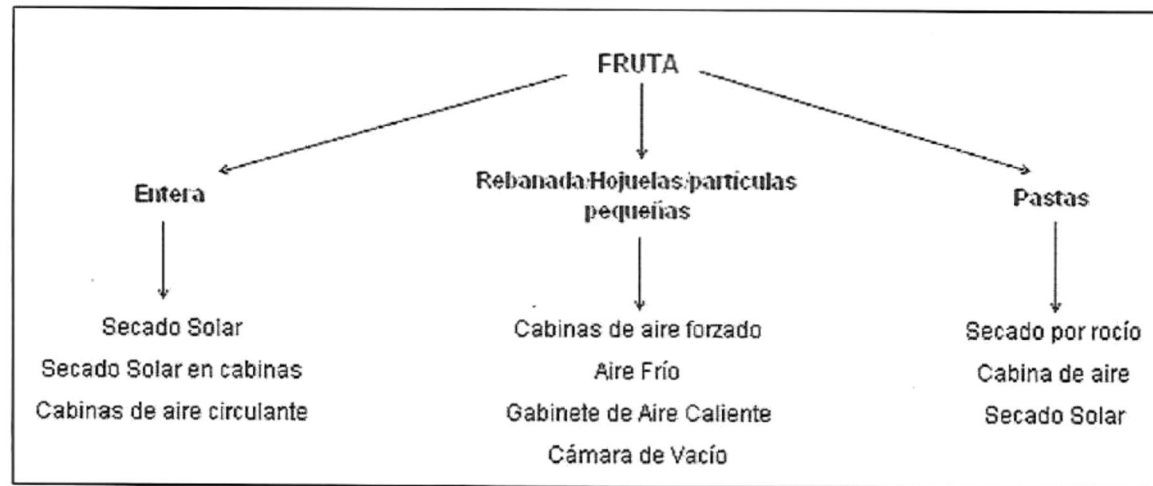


Figura 6. Tipos de deshidratación de frutas según el tamaño de partícula.

Cuadro 6. Características de algunos tipo de Secadores Comerciales

Tipo de Secador	Tipo de Proceso: Intervalos (I) ó Continuo (C)	Características del Alimento				Condiciones de Secado		Ejemplo de productos
		Sólido o Líquido	Contenido Inicial de Humedad	Sensible al Calor	Tamaño de partícula	Rango de secado	Contenido Final de Humedad	
Cubo	I	S	Bajo	—	Intermedio a grande	Lento	Bajo	Vegetales
Gabinete	I	S	Moderado	—	Intermedio a grande	Medio	Moderado	Frutas y Vegetales
Banda Transportadora	C	S	Moderado	—	Intermedio a grande	Medio	Moderado	Cereales, Frutas, vegetales, dulces, galletas
Contenedor	C	S	Moderado	—	Pequeño (polvo)	Medio	Moderado	Polvo de patatas, frutas, para preparar nieve, Vegetales en rebanadas, guisos, granos, hierbas, frutas secas, semillas
Cama de Fluido/Cámara de espuma	CI	L	—	Si	Pequeño (polvo)	Rápido/ Medio	Bajo	Productos de repostería
Horno	I	S	Moderado	—	Intermedio a grande	Lento	Moderado	Polvo para sopas, pure de patatas, jugos.
Microondas/ Dieléctrico	CI	S	Bajo	Si	Pequeño (polvo)	Rápido	Bajo	Nueces, cereales, pastas, líquidos viscosos,
Rotatorio	CI	S	Moderado	Si	Pequeño (polvo)	Medio	Moderado	Café, leche en polvo, polvo para bebidas.
Spray	C	S	—	—	—	Rápido	Moderado	Frutas y Vegetales
Solar	I	S	Moderado	—	Intermedio a grande	Lento	Moderado	Frutas y Vegetales
Túnel	C	S	Moderado	—	Intermedio a grande	Medio	Moderado	Frutas y Vegetales
Banda de Vacío	C	L	—	—	—	Rápido	Bajo	Jugos, carne, chocolate

Fuente: Adaptado de Barr y Deker (1997)

mantenimiento del equipo son otros de los factores importantes a considerar en la selección del equipo.

2.3.2 Métodos de deshidratación

El término secado se refiere a la desecación natural, que se obtiene exponiendo la fruta directamente a la acción del sol. Durante largo tiempo el secado al sol fue utilizado en la industria de alimentos en Estados Unidos, donde se deshidratava la tercera parte de la producción de frutas y vegetales (Brekke y Nury, 1964). Aunque el secado y el deshidratado son términos que implican la eliminación del agua de los alimentos, en la tecnología la deshidratación se refiere al secado por medios artificiales.

El deshidratado es un proceso de eliminación de humedad en los alimentos, que se da por la acción de un flujo de aire, el cual transporta la humedad contenida en la superficie del alimento hacia una corriente externa. Algunos de los métodos más utilizados en la deshidratación de frutas son, la deshidratación con aire caliente, el deshidratado por congelación, y la deshidratación por microondas (Sun, 2006).

En la deshidratación con aire caliente, la eliminación de la humedad se obtiene a través de la acción de aire caliente, el cual transporta el agua contenida en la superficie del producto hacia la corriente de aire a través de la evaporación, la cual es ocasionada por la transferencia de calor del medio externo al alimento (Fellows, 2000). En la sección 2.3.2.1, se mencionan los aspectos más relevantes de la deshidratación con aire caliente.

La deshidratación por congelación o liofilización se reconoce como el mejor método de conservación de las características de calidad de los alimentos deshidratados (Boonsupthip y Heldman, 2007; Heldman y Lun, 2007). Este método se realiza a través de la sublimación al vacío, consta de tres fases: sobrecongelación, desecación primaria y desecación secundaria.

Las aplicaciones del método en la industria alimentaria son diversas, por ejemplo el congelado de frutas, vegetales, elaboración de leche, café, entre otros. No obstante las ventajas del método, el procesamiento es lento, el equipo y el mantenimiento son costosos, por tanto su escalamiento industrial requiere de una fuerte inversión (Kyzlink, 1990, Fellows, 2000; Clary *et al.* 2007; Heldman y Lun, 2007).

Otro de los métodos utilizados en la deshidratación de frutas es la deshidratación por microondas, la cual se utiliza frutas y vegetales que presentan alta sensibilidad a la aplicación de calor (Carrol *et al.* 1996, Lian *et al.* 1997). Durante el proceso el alimento es expuesto a ondas de luz, que atraviesan la superficie originando una fricción y con ello el calor suficiente para eliminar la humedad del alimento (Sun, 2006). Aunque la deshidratación por microondas representa eficiencia en el manejo de la energía, una de sus principales desventajas es la desproporcionalidad del deshidratado en el alimento, lo cual se debe a la falta de uniformidad en la distribución de la energía de microondas, o bien a las propiedades dieléctricas y termofísicas que ocurren de manera natural dentro de los alimentos (Oliveira y Franca, 2002). Otra de las desventajas del método, es su alto costo y el hecho de que sus aplicaciones aún no se han escalado a nivel industrial.

Estudios recientes, muestran que la aplicación de métodos combinados utilizando la deshidratación osmótica y la deshidratación al vacío originan buenos resultados en la calidad de las frutas y hortalizas deshidratadas (Funebo y Ohlsson, 1998; Sharma y Prasad, 2001; Cui *et al.* 2003; Ruiz *et al.* 2003; Gowen *et al.* 2006; Clary *et al.* 2007; Giri y Prasad, 2007). La deshidratación osmótica se define como el tratamiento de eliminación parcial del agua, donde se sumerge la materia prima en una solución hipertónica que tiene una alta presión y baja actividad de agua, siendo la fuerza impulsora para que el agua del alimento se difunda en el medio, originándose así una transferencia de masa desde la región de mayor concentración hacia la de menor concentración (Kaymak y Sultanoglu,

2000). Arreola y Rosas (2007), realizaron un estudio combinado utilizando la deshidratación osmótica y al vacío en la deshidratación de higo (con humedad inicial de 86.8%), para lo cual se utilizaron dos temperaturas (35 y 45 °C), bajo vacío constante (aprox. 40 *kPa*), los resultados muestran que en un tiempo de 2 horas se redujo la humedad a un 55%. Sin embargo, al igual que el deshidratado por microondas, la deshidratación al vacío también requiere de una fuerte inversión.

2.3.2.1 Deshidratación del higo con Aire Caliente

Como se mencionó con anterioridad, la deshidratación con aire caliente consiste en la eliminación de la humedad de la fruta a través de la acción de aire caliente, el cual transporta el agua contenida en la superficie del producto hacia la corriente de aire a través de la evaporación. El calor del aire caliente que absorbe el alimento proporciona el calor suficiente para evaporar el agua contenida en la superficie (Sun, 2006). Las frutas y vegetales deshidratados puede prolongar su vida útil hasta por más de un año (Ratti y Mujumdar, 2005).

La reducción de humedad durante el proceso de deshidratación varía según el tipo de fruta, en el caso de los higos deshidratados, La Administración de Alimentos y Fármacos (FDA, por sus siglas en inglés) y el Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), establecen que un contenido de humedad en el rango de 5% a 7% es seguro para el consumo humano debido principalmente a que la actividad microbiológica esta controlada (USDAA, 2004). Por otra parte, se establece un límite máximo del 30% de humedad intermedia, para higos deshidratados siempre y cuando se agregue un inhibidor adecuado para evitar el desarrollo de microorganismos que afecten la calidad de la fruta (USDAb, 2001). Algunos de los trabajos de deshidratación de higo, se describen a continuación.

Papoff *et al.* (1997), desarrolló un proceso escalonado de deshidratación para higo entero (variedad "Niedda Longa") con aire caliente, para determinar el

efecto de las condiciones del proceso en la calidad de la fruta. El deshidratado se realizó en dos etapas, la primera utilizando dos secadores de túnel y la otra simulando un proceso de deshidratación solar; en la segunda etapa se realizó un pretratamiento con sorbato de potasio. En la etapa inicial, el higo se introdujo en el túnel de secado por 3 h con un gradiente de temperatura de 85°C a 95°C, después el higo deshidratado se cambió a un segundo túnel por 14 h a 85°C. Durante la etapa dos, se utilizó un simulador solar, donde se expuso la fruta por 120 h a 32°C a una humedad relativa del 35%. Finalmente los higos deshidratados, para posteriormente ser almacenados en bolsas herméticas y almacenados a 20°C durante 6 meses. Un total de 11 h fue el tiempo suficiente para obtener estabilidad en la carga microbiológica sin la utilización de pretratamientos, lo cual permitió alcanzar un contenido de humedad final del 12% y una a_w del 0.60; a las 17 h el contenido de humedad fue del 9% y la a_w de 0.57. El contenido final de humedad en los higos deshidratados en el simulador solar fue de 26 y 29% respectivamente, utilizando un escaldado con sorbato de potasio. Después de 6 meses en almacén, el higo deshidratado no presentó desarrollo microbiano que afectara la calidad de la fruta, sin embargo se presentaron algunas deficiencias en las propiedades sensoriales (sabor a quemado) y la textura. Con base en estos resultados Pappof *et al* (1998), establecen que la deshidratación industrial utilizando el deshidratado con aire caliente o la simulación del secado solar no afecta la calidad de los higos deshidratados.

Gallali *et al* (2000), realizó un estudio comparativo entre el secado natural y en la deshidratación en un simulador solar para determinar el efecto de éstos procesos en la composición química y sensorial de uvas, higos (enteros), tomates y cebollas. En relación a los resultados alcanzados en los higos, el estudio reporta un contenido final de humedad del 23.5% en higos deshidratados en el simulador solar (a 80.5°C), y un 46.9% en higos deshidratados naturalmente. Respecto al efecto de los procesos sobre las características químicas de la fruta se reporta: un incremento en la acidez de higos secados

naturalmente (30.18%) en comparación con los deshidratados en el simulador los cuales presentan una acidez del 15.2%. La concentración de ácido ascórbico fue de 6.28% en el método natural y de 4.13% en el otro método. La concentración total de azúcar en los higos se redujo $4.8 \mu/g$ en el método natural y $2 \mu/g$ utilizando las condiciones simuladas de deshidratación solar. Los resultados de la evaluación sensorial muestran una aceptación de los higos deshidratados en condiciones controladas del 52% en términos de color, 33% en textura y 35% en sabor; mientras que los higos secados al sol, presentan un 33% en color, 28% en textura y 32% en color.

Piga *et al.* (2004), desarrolló un proceso de deshidratación de higo entero (cultivar local de Turquía) con aire caliente para establecer las condiciones adecuadas de tiempo y temperatura de secado, tratando de evitar la pérdida en calidad de la fruta. Para ello, se establecieron como factores principales de estudio el cambio de color y el contenido final de humedad. Parte de los tratamientos fueron escaldados con 3% de Metabisulfito de Sodio por 3 min, otra parte se escaldó por 1 min sin utilizar aditivo y se fijaron tratamientos control. La temperatura de secado fue de 55°C , con un 40% de humedad relativa y velocidad del aire de $1840 \text{ m}^3/h$. Los tratamientos donde se escaldó el higo (con metabisulfito de sodio y sin aditivo), presentaron un tiempo de secado de 37 h y 33 h, mientras que los tratamientos sin escaldar tardaron 54 h; ninguna diferencia significativa fue observada entre los tratamientos de escaldado. El contenido final de humedad fue de 14% para higos escaldados sin aditivo, 15% en higos escaldados con Metabisulfito de Sodio y 14% en higos sin escaldar. El pH en higos escaldados sin aditivo fue de 4.87, en higos escaldados con Metabisulfito de Sodio, mientras que en higos sin escaldar fue de 4.97. Respecto al cambio en de los parámetros L^* , a^* , b^* , y $^{\circ}h$, se tiene que los tratamientos escaldados con metabisulfito de sodio presentaron menor cambio de color ($L^*=52.70$; $a^*=-3.08$; $b^*=49.57$ y $^{\circ}h=93.26$) respecto al color de la materia prima ($L^*=62.15$; $a^*=-21.76$; $b^*=49.85$ y $^{\circ}h=113.68$), seguido por los tratamientos escaldados sin aditivo ($L^*=46.56$; $a^*=-0.01$; $b^*=38.49$ y $^{\circ}h=89.96$);

finalmente los tratamientos sin escaldar fueron los que presentaron mayor cambio de color ($L^*=39.57$; $a^*=-1.99$; $b^*=31.12$ y $h=86.26$). El proceso de rehidratación se realizó por inmersión de los higos en agua caliente por periodos de 3 min a 5 min, resultando en un 30% a 35% de humedad intermedia; un análisis sensorial posterior mostró que los higos con pretratamiento presentaron mejor sabor, consistencia y textura.

Xanthopoulos *et al.* (2007); realizaron un estudio de deshidratación para investigar la adaptabilidad de un modelo diseñado para la deshidratación de higo en rebanadas delgadas en la deshidratación de higo entero. Para ello se utilizó higo de la variedad *Tsapela* (higo negro), cultivado en Grecia, y no se desarrollaron pretratamientos. Se utilizaron dos tiempos de secado: 23 h (60°C , 3.0 m/s) y 53.3 h (47.2°C , 2.0 m/s). Los resultados muestran que el método es efectivo ($p=0.01$) para la deshidratación de higo entero, el cual permite alcanzar un contenido final de humedad menor al 30%.

Amaya-Flores (2008), desarrolló un proceso para la deshidratación del higo entero variedad kadota (cultivado en Caborca, Sonora), donde alcanzó un contenido final de humedad del 10%, en un tiempo de 48 h a 55°C . Posteriormente se rehidrató el higo hasta lograr una humedad intermedia del 29% al 34%.

2.3.2.2 Ventajas del deshidratado con Aire Caliente respecto a otros métodos de deshidratación.

Las principales ventajas del deshidratado con aire caliente, respecto al secado natural es el establecimiento de condiciones controladas de temperatura de secado, tiempo de secado, control del contenido de humedad, control de las condiciones sanitarias y condiciones de higiene. La deshidratación con aire caliente agrega mayor valor a las frutas deshidratadas, puesto que mejora su calidad; además el rendimiento de la producción es mayor. Por otra parte, el cambio de color es superior en la fruta expuesta directamente al sol, mientras

que las condiciones controladas en la deshidratación con aire caliente, permite lograr resultados óptimos. Aunque el secado natural es más económico que la deshidratación con aire caliente, sobre la base de tiempo la calidad y el rendimiento de la producción alcanzados por este último reditúan perfectamente la inversión.

La deshidratación de frutas a través de métodos como la congelación, deshidratado por microondas, deshidratación osmótica, al vacío y otros combinados, ha demostrado eficiencia en la conservación de las características de calidad de las frutas deshidratadas, sin embargo los altos costos de inversión, mantenimiento y desarrollo de los procesos han limitado en gran medida su aplicación (Fellows, 2005; Sun, 2006; Heldman y Lun, 2007). Específicamente en la deshidratación de frutas, los métodos de deshidratación osmótica, al vacío y microondas aun no presentan un desarrollo de aplicaciones a nivel industrial.

2.4 Calidad de las frutas deshidratadas

Todas las frutas presentan cambios al ser procesadas y almacenadas, lo cual ocasiona pérdidas en la calidad, en comparación con la calidad de su estado inicial. En la industria de alimentos, la calidad está relacionada estrechamente con la aceptabilidad. Lo anterior implica, por un lado el cumplimiento de las normas y leyes establecidas por organismos gubernamentales que garantizan la higiene y seguridad de los alimentos durante su procesamiento; y por otra parte la consistencia del producto con las necesidades establecidas por el mercado consumidor. Particularmente los procesos de deshidratación, los atributos de calidad de mayor importancia a preservar en las frutas y vegetales son: el color, olor, sabor, textura, y componentes nutricionales; además de garantizar la seguridad (química y microbiológica) de su consumo (Ratti y Mujumdar, 2005; Sun, 2006).

2.4.1 Color

El color es un factor determinante en la apariencia, procesamiento y aceptabilidad de las frutas. El color frente a la textura y el sabor del alimento, tiene una peculiaridad importante: su apreciación se realiza siempre en primer lugar. La relación que existe entre el color y otros factores de calidad en las frutas como el estado de madurez, el grado de desarrollo y la composición química, hacen posible utilizar al color como índice de transformaciones naturales de los alimentos frescos o de cambios ocurridos en el proceso industrial. Con el propósito de normalizar la medida del color, la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE por sus siglas en francés), definió en 1971 un sistema de medición basado en un nuevo espacio cromático por transformaciones no lineales del sistema CIE 1931, al que se denomina CIELAB. En la Figura 5, se muestra la representación gráfica de las coordenadas del sistema CIELAB de Color, como se puede observar se define un espacio de tres planos en coordenadas rectangulares (L^*, a^*, b^*) junto con otro de coordenadas cilíndricas (L^*, Hue^*, C^*) . Con éstas coordenadas se define un nuevo plano cartesiano donde: (L^*) corresponde a la claridad y (a^*, b^*) a la cromaticidad. Concretamente a^* define el complemento rojo-verde; rojo para valores positivos y verde para valores negativos. El parámetro b^* define el componente amarillo-azul; amarillo para valores positivos y azul para valores negativos. En el caso de las coordenadas cilíndricas, L^* es la claridad, C^* el croma (la intensidad o saturación del color) y Hue^* el tono del color (Calvo y Duran, 1997).

El sistema CIELAB se utiliza en tareas de control de calidad de productos de color. Específicamente en la industria alimentaria, los cambios de color que las frutas y vegetales experimentan en los distintos procesos se representan a través de una sola variable, la cual establece una correlación entre el color visual y la degradación del color como una característica de calidad (Hutchings.; 1994). Esta razón de cambio esta dada por la Ecuación 17.

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_{ref})^2 + (a - a_{ref})^2 + (b - b_{ref})^2} \dots\dots\dots 17$$

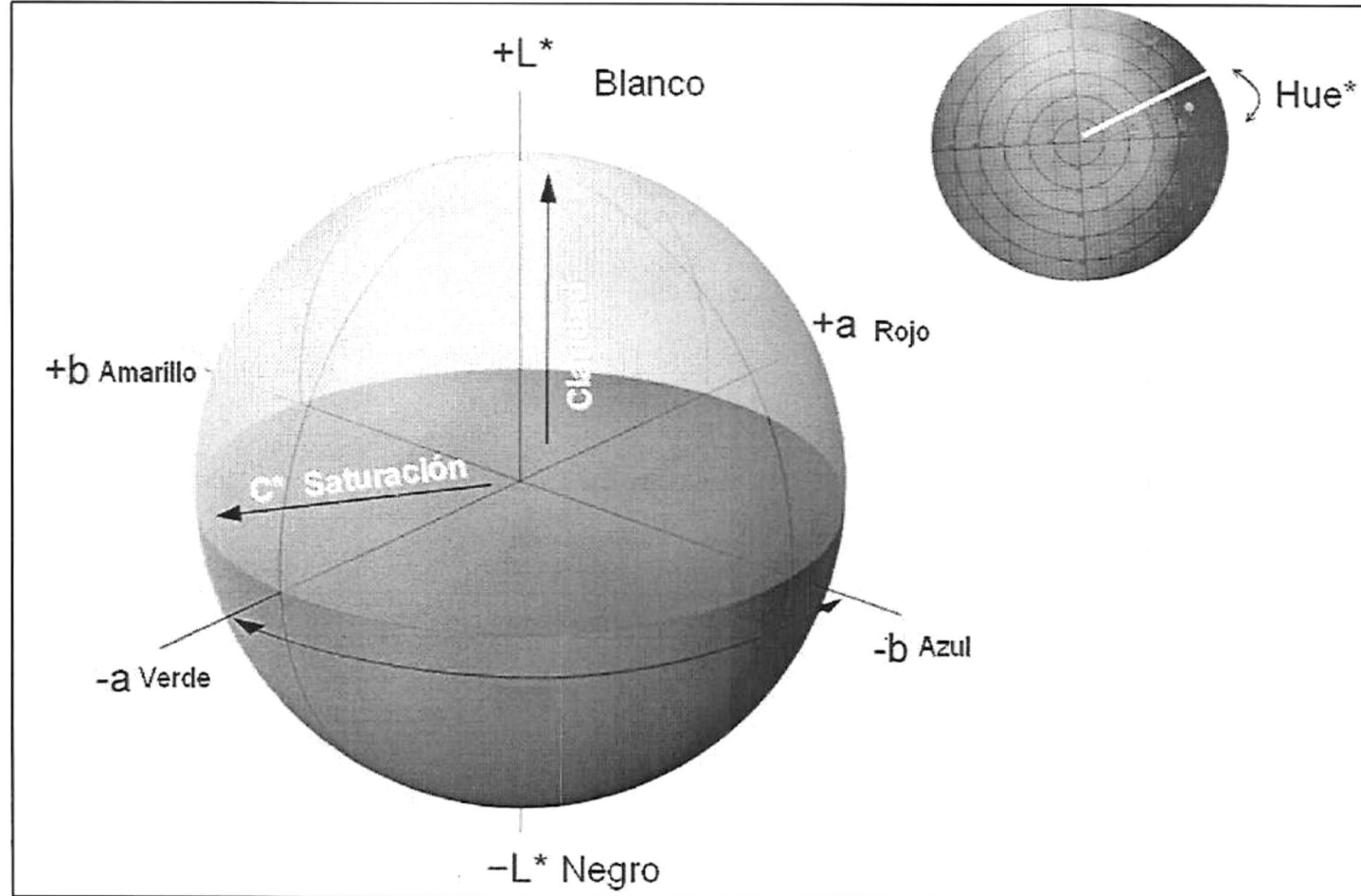


Figura 7. Representación gráfica de coordenadas del Sistema CIELAB de Color

Donde:

ΔE = Representa el Cambio Total de Color (CTC) que presenta la fruta deshidratada en respecto al color de la fruta en fresco

L, a, b = Representa los valores de los parámetros del color del producto final

$L_{ref}, a_{ref}, b_{ref}$ = Representa los valores de los parámetros de color de la fruta en fresco

Cuanto mayor sea el valor del ΔE , mayor será la degradación de la frutas o vegetales procesadas. Por el contrario, valores menores representan mayor conservación de la característica de calidad (Young y Whittle, 1985; Nanke y Sebranek, 1999, Hutchings, 1994). Los criterios de evaluación de los resultados obtenidos varían en relación al producto, proceso y condiciones de mercado, por tanto son responsabilidad del investigador (Sun, 2006).

Una medida para preservar el color de las frutas y de los vegetales durante su procesamiento, es el uso de aditivos. En el más amplio sentido de la palabra, un aditivo es una sustancia añadida a un alimento y que afecta sus características de cualquier alimento. Un aditivo de color es cualquier tinte, pigmento o sustancia que pueda impartir color al ser aplicado a un alimento. Los aditivos de colores se usan en alimentos principalmente para compensar la pérdida de los colores en los alimentos durante el procesamiento, almacenamiento o bien para corregir las variaciones naturales del color de algunos alimentos. El uso y concentración de aditivos se encuentra regulado por FDA. Entre estos aditivos está el uso de sulfitos y el ácido ascórbico.

a) Uso de Sulfitos

El término sulfitos o agentes sulfatantes se emplea para describir al dióxido de azufre y otros sulfitos inorgánicos que se pueden utilizar como aditivos en los alimentos, bebidas y productos farmacéuticos, con el propósito de inducir o recrear ciertas reacciones benéficas (Taylor y Bush, 1983). El dióxido de azufre es un gas no inflamable e incoloro que se disuelve fácilmente en agua, y que se

hidrata para obtener ácido sulfuroso y que puede disociarse a bisulfito y bisulfito. Dada la capacidad de transformación, las concentraciones de sulfitos en alimentos se pueden expresar en partes por millón (*ppm*) de dióxido de azufre y a lo inversa, el contenido de dióxido de azufre se puede expresar en su forma equivalente en miligramos de sulfito, es decir las *ppm* de dióxido de azufre son igual a *mg* de sulfito por *kg* de alimento (Serra-Baldrich, 1989).

Los sulfitos se emplean ampliamente en la industria alimentaria, por diversas razones, entre las cuales destaca: 1) es inhibidor enzimático y no enzimático del oscurecimiento de frutas y vegetales; 2) es un antioxidante que retrasa el efecto que microorganismos producen en el deterioro de la frutas o vegetal; 3) inhibe diversas reacciones enzimáticas, tales como la ascorbato oxidasa, la lipoxigenasa, la peroxidasa y la polifenoloxodasa (la inhibición de la polifenoloxodasa es importante en el control del oscurecimiento de los alimentos), 4) es un agente antimicrobial, 5) fungicida y 6) recubre las células en el interior de la fruta o vegetal, facilitando la eliminación del agua libre durante la deshidratación (Fisher, 1989; Gould y Russell, 1991; Ough, 1993, Latapi y Barrett, 2006; Ngo *et al.* 2007; Castro *et al.* 2008; Petri *et al.* 2008). La FDA establece como límite concentraciones de 10 *ppm* para el uso de sulfitos en el procesamiento de alimentos, incluyendo la deshidratación de frutas, con el propósito de evitar reacciones adversas en la salud de los consumidores (FDA, 2000). En el procesamiento de frutas y vegetales los sulfitos más utilizados son el bisulfito y metabisulfito de sodio, aplicaciones recientes incluyen procesamiento de manzanas (Beveridge y Weintraub, 1995), ajo (Kim y Cho, 1999), damascos (Ozkan y Cemeroglu, 2002); higos (Piga *et al.* 2004), Tomates (Latapi y Barret, 2006), fresas (Ngo *et al.*, 2007) por mencionar algunos. Particularmente en el caso del higo, Piga *et al.* (2004), reporta buenos resultados en términos de color al utilizar 3% de metabisulfito de sodio.

b) Uso de Ácido Ascórbico

El ácido ascórbico también conocido como Vitamina C, es un ácido de azúcar en apariencia es un polvo de color blanco-amarillo, soluble en agua y con ciertas propiedades antioxidantes auxiliares en la reducción del oscurecimiento y degradación del color de las frutas y vegetales frescos o procesados (Bauernfeind, 1985; Sapers, 1993). Además se ha demostrado que el ácido ascórbico es un agente antibacterial efectivo (Burnham *et al*, 2001), que contribuye a disminuir el deterioro en los alimentos. El ácido ascórbico, carbonato de calcio, la vitamina A, el óxido de Zinc, el Hierro entre otros, son considerados por la FDA como aditivos que mejoran y mantienen la calidad nutritiva de los alimentos, por lo que su uso es ampliamente aceptado (FDA, 2000).

Las aplicaciones del ácido ascórbico en el procesamiento de frutas y vegetales es bastante extenso, las concentraciones varían en relación al proceso y al tipo de fruta o vegetal. Gerald *et al.* (1995), realizó un estudio para determinar el efecto del ácido ascórbico como inhibidor del oscurecimiento en la piel de papas enteras, para ello utilizó concentraciones de 1% y 2% en el proceso de escaldado a 45 y 55°C por 5 y 20 min; y comparó los resultados obtenidos con concentraciones de 4% y 1% pirofosfato de sodio, los resultados muestran que el uso de ácido ascórbico es una alternativa viable para sustituir el uso de sulfitos en el procesamiento de papas.

Esparza-Rivera *et al.* (2006), evaluó el efecto del ácido ascórbico en lechuga verde almacenada a 5°C, utilizando dos métodos de hidratación 1) inmersión y 2) aspersión. Para ello, utilizó concentraciones de ácido ascórbico del 1% en ambos métodos por 2 minutos a $5\pm1^\circ\text{C}$, el pH del ácido ascórbico fue de 3.0; y también se realizaron inmersiones en ascorbato de sodio bajo las condiciones descritas. Los resultados muestran que la lechuga tratada con ácido ascórbico conservó niveles adecuados de humedad por 21 días a 5°C en comparación con

los tratamientos tratados con ascorbato, sin embargo este último presenta mejor rendimiento en el color de las lechugas.

Petri *et al.* (2008), realizaron un estudio para demostrar como el uso de sulfitos, ácido ascórbico y el ácido cítrico tienen un efecto positivo en el proceso de respiración de las papas frescas (en rebanadas) y que a su vez extienden la vida en anaquel. Para ello se utilizaron concentraciones de a) 0.1 y 0.5% de metabisulfito de sodio; b) 0.1 y 0.5% de ácido cítrico + 0.1 y 0.5% de metabisulfito de sodio; c) 0.1 y 0.5% de ácido ascórbico + 0.1 y 0.5% de metabisulfito de sodio; y d) 0.1 y 0.5% de metabisulfito de sodio + 0.1 y 0.5% de ácido cítrico + 0.1 y 0.5% de ácido ascórbico. Los resultados muestran que al aumentar la concentración de metabisulfito de sodio de 1 a 5% la respiración en las papas disminuye fuertemente, debido a la capacidad antioxidante de éste aditivo lo cual dificulta el proceso de respiración y el crecimiento enzimático. Los resultados también muestran que no se presentaron diferencias significativas en los tratamientos con ácido ascórbico + ácido cítrico + metabisulfito (0.5%) en relación a los tratamientos con metabisulfito (0.5%). Las conclusiones sugieren que el uso de metabisulfito de sodio o bien la combinación de éste con ascórbico y ácido cítrico reducen el proceso de oxidación de la lechuga verde.

2.4.2 Sabor y Olor

El calor, además de vaporizar el agua durante el proceso de deshidratación, causa la pérdida de componentes volátiles como el olor y el sabor, ocasionando una variación respecto a la materia prima original. La abertura de poros en la estructura de las frutas y vegetales permite el acceso del oxígeno, el cual es la segunda causa importante de pérdida de olor y del sabor debido a la oxidación producida. Los cambios de sabor, debido a la oxidación, son comúnmente prevenidas con el uso de dióxido de sulfuro, sulfitos, ácido ascórbico, ácido cítrico o bien con el escaldado y la pasteurización (Fellows, 2000).

Extender la pérdida de componentes volátiles depende de la temperatura, el contenido de humedad de las frutas y del grado de solubilidad de dichos componentes en el agua. Para frutas con niveles bajos de sabor y olor, es recomendable utilizar temperaturas bajas durante el proceso de deshidratación (Sun, 2006). Particularmente, los higos (verde o negro) son muy susceptibles a la pérdida de sus compuestos volátiles, la cual inicia desde la cosecha y se incrementa durante el procesamiento (Jennings, 1976). Por tanto, se ha demostrado que un adecuado manejo poscosecha es uno de los factores que mantiene en un nivel adecuado el sabor y aroma del higo (Crisosto, 2002).

2.4.3 Textura

Los cambios en la textura de las frutas y de los vegetales es un factor importante que indica su grado de deterioro. La naturaleza y duración de los pretratamientos, el método de reducción del tamaño empleado y la naturaleza de la superficie de la fruta o vegetal afectan su textura. El aire caliente causa cambios químicos y físicos complejos en la superficie, haciéndola rígida e impermeable, si el proceso de deshidratación de las frutas es rápido y con altas temperaturas, se originan cambios drásticos en la textura. Para minimizar este tipo de efectos, es conveniente controlar la humedad interna de la fruta y la del medio de secado durante el proceso de deshidratación (Fellows, 2000; Heldman y Lund, 2007).

2.4.4 Valor Nutricional

Las frutas y vegetales presentan gran variedad de cambios en las propiedades nutricionales, cuando son expuestas al proceso de deshidratación. La vitamina C es muy sensible al calor y a la oxidación cuando se utilizan tiempos cortos, bajas temperaturas, niveles bajos de humedad y oxígeno durante el proceso de deshidratación y almacenamiento. Sin embargo, el valor biológico y digestivo de las proteínas no cambia en la mayoría de las frutas y vegetales durante el proceso (Fellows, 2000). Por otra parte, con la reducción del contenido de agua, algunos nutrientes como la fibra, calcio, potasio, hierro, proteína, se concentran

incrementando su contenido en la fruta. Por ejemplo, el higo fresco contiene alrededor de 2.04 % fibra dietaria total, de 190 a 290 *mg* potasio y 54 *mg* de potasio (Chessa, 1997); y al ser deshidratado se presentan concentraciones de 12.21% fibra, 609 *mg* potasio y 133 *mg* de calcio (Vinson, 1999). Resultados similares se observan con otras frutas deshidratadas como la uva pasa y dátiles (Clary *et al.* 2007).

2.4.5 Rehidratación

En años recientes, la industria y el mercado de las frutas con humedad intermedia (IM) se ha incrementado considerablemente, lo cual ha llevado a la rehidratación de frutas secas hasta lograr contenidos de humedad del 25 al 40% (Cemeroglu, 1986; Desai y Kotecha, 1995; Simmons *et al* 1997, Demirbükler *et al* 2004). La frutas con humedad intermedia presentan gran diversidad de uso,, por ejemplo en ensaladas, cereales, galletas, como ingredientes de repostería, mermeladas, conservas, bebidas, entre otros (De Danza *et al.* 1997).

Durante la deshidratación el contenido de agua de las frutas se reduce a un nivel mínimo usualmente del 5% al 20% (Desai y Kotecha 1995), en la rehidratación las frutas y vegetales son introducidos en un medio húmedo bajo condiciones controladas de tiempo y temperatura con el propósito de el agua de hidratar las paredes celulares de los alimentos, sin embargo el agua eliminada no es remplazada de la misma forma. La pérdida de presión celular, los cambios en la permeabilidad de la membrana celular, la migración de solutos, la cristalización y coagulación de la proteína celular, la textura y la pérdida de componentes volátiles son algunos de los factores que sufren cambios irreversibles durante el proceso de deshidratación y que afectan la rehidratación de las frutas y vegetales (Rahman y Perera, 1999). El grado y tiempo de rehidratación, es un factor que indica la calidad de la fruta o vegetal deshidratado. Si las condiciones del proceso de deshidratación de las frutas y vegetales fueron óptimas, la rehidratación será rápida y uniforme; por el contrario si el tiempo se extiende y la

consistencia varía, la calidad del proceso y el producto son pobres (Fellows, 2000).

Para estabilizar la actividad enzimática en las frutas rehidratadas, se utilizan ciertos aditivos como el sorbato, sulfitos, benzonatos, peróxido de sodio, entre otros, los cuales inhiben el crecimiento de organismos patógenos relacionados con el deterioro del fruto cuando el nivel de humedad es del 7 al 10% de humedad (De Danza *et al*, 1997, Chanes *et al*, 1997; Cemeroglu *et al*, 2001, Zambrano *et al*, 2007). Estudios recientes, muestran que la aplicación de peróxido de hidrógeno en la rehidratación de higo presenta buenos resultados en términos de color, textura y control de la carga bacteriana (Demirbüker *et al* 2004; Amaya-Flores, 2008). Demirbüker *et al*. (2004), utilizó concentraciones de 2.5% de peróxido de sodio, a intervalos de 4, 8 y 12 min y temperatura de 80°C, alcanzando una humedad intermedia de 30 a 40%.

III. MATERIALES Y METODOS

La presente investigación se desarrolló en cinco etapas principales:

- Etapa I. Estudio Preliminar para la Deshidratación del higo.
- Etapa II. Experimental Final para la Deshidratación del higo.
- Etapa III. Optimización del proceso.
- Etapa IV. Estudio de Comprobación del Modelo de Predicción.
- Etapa V. Determinación de la vida en anaquel del higo deshidratado.

A continuación se hace una descripción de los materiales y métodos empleados en cada una de las etapas mencionadas.

3.1 Etapa I: Estudio Preliminar para la Deshidratación del higo

En esta primera etapa se establecieron las variables de respuesta del proceso de deshidratación, se identificaron y definieron los factores de estudio (llamados factores controlables), estos parámetros se definieron con base en los resultados de estudios realizados en México, Turquía, Grecia, Libia, Italia entre otros relacionados con la deshidratación del higo con aire caliente (Papoff *et al.* 1997; Gallali *et al.* 2000; Piga *et al.* 2004; Xanthopoulos *et al.* 2007; Amaya-Flores, 2008). Por otra parte, los niveles (valores) de operación de los factores se establecieron, con base en los estudios previos realizados por el Laboratorio de Ingeniería de Alimentos de Origen Vegetal (LITAOV) del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), A.C. de Hermosillo (Montoya-Ballesteros y Robles-Ozuna, 2007). Se definieron las etapas del proceso de deshidratación, se desarrolló el experimental y finalmente se realizó el análisis de datos.

3.1.1 Diseño del Modelo Experimental

El diseño del modelo experimental de la investigación, se basó en las etapas del diagrama del Diseño Paramétrico expuesto en Figura 2, de la sección 2.1.4.1. El modelo utilizado es una adaptación del modelo propuesto por Phadke (1989), Wille (1990), Wu y Wu (1991). A continuación se describe cada una de las etapas.

Paso1. Determinación de las Características de Calidad a Optimizar

Entre los factores importantes que determinan la calidad de las frutas deshidratadas, incluyendo el higo, se encuentra: el cambio total de color, el contenido de humedad final y la calidad nutricional (Fellows, 2000; Ratti y Mujumdar, 2005, Sun, 2006). Las características de calidad seleccionadas para el modelo de esta investigación fueron las siguientes:

- 1. Cambio Total de Color (CTC).**- Representa el grado de degradación o alteración del color del higo deshidratado en relación al color del higo fresco. Cuanto mayor sea el valor numérico del CTC, mayor será la

degradación del higo deshidratado; por el contrario, valores menores representan mejor conservación del color, lo cual se traduce en mejor calidad del producto y del proceso. Considerando lo anterior y para asegurar la calidad del color en el higo deshidratado según los principios de la MT, se estableció el criterio: "Lo Menor es lo Mejor", por ser la SN más adecuada en la evaluación de la característica de calidad descrita. Para determinar el CTC en el higo deshidratado, se aplicó la Ecuación 1 descrita en la Sección 2.4.1 (Hutchings, 1994) y se realizaron tres mediciones repetidas.

2. Contenido Final de Humedad.- Se refiere a la cantidad de agua contenida en el higo deshidratado. Un alto contenido de humedad favorece al deterioro de las propiedades fisicoquímicas y nutricionales del higo, disminuyendo con ello el tiempo de vida útil (Crissosto *et al.*2002; Stover *et al.*2007). La FDA permite un contenido final de humedad del 30% en higos deshidratados, siempre y cuando se utilicen los aditivos necesarios para controlar y estabilizar la actividad microbiológica, por otra parte, establece que contenidos de humedad del 5% al 7% se consideran seguros y son permisibles aún sin la necesidad de utilizar aditivos (FDA, 2001). Con base en la reglamentación internacional para el comercio de higos deshidratados descrita y en los resultados de estudios previos realizados con la variedad kadota por el LITAOV del CIAD (Montoya-Ballesteros y Robles-Ozuna, 2007), se estableció un contenido de humedad final del $6\pm1\%$ para medir la calidad de higo deshidratado. Siendo la SN más adecuada para evaluar esta característica de calidad: "Lo Nominal es Lo Mejor". Para determinar el contenido final de humedad se utilizó el método oficial establecido por A.O.A.C. (por su siglas en inglés Association of Analytical Communities) (A.O.A.C., 1980).

3. Propiedades Nutricionales.- La pérdida de nutrientes durante el proceso de deshidratación, al igual que en otros métodos de deshidratación, es un

hecho inevitable (Fellows, 2000; Sun, 2006; Heldman y Lund, 2007). Sin embargo, es posible disminuir la pérdida a través de la planeación y desarrollo adecuado del proceso. El higo deshidratado se caracteriza por contener altos contenidos de fibra dietaria, calcio y potasio, los cuales representan diversos beneficios a la salud (Vinson *et al.* 1999; Dueñas *et al.* 2008; Del Caro y Piga 2008). Por lo tanto, en esta investigación se estableció como criterio de calidad lograr un proceso que disminuya la pérdida de fibra, calcio y potasio. Debido al alto costo y a los largos periodos de procesamiento que conlleva la determinación de éstos nutrientes, se decidió seleccionar las dos mejores combinaciones siguientes (según la experiencia y criterio de economía del equipo investigador), además de la combinación óptima de factores, y posteriormente se desarrolló las corridas de comprobación. Finalmente se eligió la combinación con la cual se obtuvo un CTC menor, un contenido de humedad final de $6\pm 1\%$ y cuyo con mayor contenido de Fibra, Calcio y Potasio. Para determinar el contenido de fibra, calcio y potasio se utilizaron los métodos correspondientes establecidos por la A.O.A.C. (2000).

Paso 2. Identificación de los Factores de Ruido y Condiciones de Operación

En el desarrollo del experimental preliminar se identificaron dos factores cuyo efecto posiblemente pudiera intervenir en el proceso. Para evaluar y determinar su importancia se midieron y registraron de forma independiente a la AO interno, es decir no se anexó como Arreglo Externo. Estos factores fueron:

1. *La desviación de la temperatura durante la inmersión del higo en la operación de escaldado ($^{\circ}\text{C}$).* Durante la operación de escaldado, el agua presenta inicialmente la temperatura establecida para el experimento, sin embargo al introducir la materia prima se presenta un descenso de la temperatura (Primera Ley de la Termodinámica). Por lo tanto, para estimar el rango de desviación de la temperatura en el escaldado del higo,

se decidió registrar dos mediciones, la primera al minuto 2 después de la inmersión del higo y la segunda al minuto 4. Posteriormente se realizó el análisis de datos correspondiente.

2. *Rendimiento de la materia prima después del proceso de reducción (%)*. Durante el proceso de reducción del tamaño de partícula de la materia prima, se presenta una pérdida de ésta debido a la eliminación de agua y a la materia que se adhiere al equipo, entre otros factores (Fellows, 2000). Para evaluar el posible efecto de este factor, se decidió pesar la muestra antes y después de la reducción de partícula, y después se realizó el análisis de datos correspondiente.

Paso 3. Identificación de los Factores de Control y sus condiciones de Operación

Se ha demostrado que los factores de mayor importancia en la deshidratación del higo con aire caliente son: el tiempo y temperatura de escaldado, tiempo y temperatura de secado, así como el uso de aditivos para conservar el color (Papoff *et al.* 1998; Piga *et al.* 2004; Xanthopoulos *et al.* 2007; Amaya-Flores, 2008). Estos factores afectan significativamente la calidad del higo deshidratado en términos de color, humedad y propiedades nutricionales. Sin embargo, las condiciones de los factores identificados presentan diferencias en los valores asignados, además de utilizar distintas variedades de higo. Asimismo, estos estudios no reportan el efecto del tamaño de partícula en la deshidratación del higo. Por lo tanto, considerando los resultados de los estudios realizados en la deshidratación del higo con aire caliente y en la experiencia del equipo investigador del laboratorio de IAOV del CIAD, se establecieron 7 factores de control para el desarrollo del estudio preliminar:

1. **Concentración y Tipo de Aditivo (8 niveles)**. Para conservar y disminuir la variación y oscurecimiento del color en el higo deshidratado, se utilizaron dos aditivos: Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) y Ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$); estos aditivos son recomendados ampliamente por ser inhibidores de diversas

reacciones enzimáticas, agentes antimicrobiales además de facilitar la eliminación del agua libre durante la deshidratación (Fisher, 1989; Gould y Russell, 1991; Ough, 1993; Ozkan y Cemeroglu, 2002; Piga *et al.* 2004; Latapi y Barret, 2006). En el caso de la deshidratación de higo, se han reportado buenos resultados al utilizar concentraciones de 1% a 3% (Piga *et al.*, 2004; Montoya-Ballesteros y Robles-Ozuna, 2007). Con base en lo anterior, se establecieron cuatro concentraciones por cada aditivo (los aditivos no se combinaron durante el proceso): 0.15%, 0.30%, 0.45% y 0.75%. Adicionalmente, se efectuó un tratamiento control, el cual consistió en escaldar el higo sin agregar aditivo alguno.

2. Temperatura de Escaldado (2 niveles). Para conservar mejor la firmeza de la fruta y lograr una disminuir la actividad microbiológica se recomienda utilizar temperaturas entre los 70 y 100°C, sin embargo estas condiciones varían de una fruta a otra según las propiedades termofísicas (Roy *et al.* 2001; Sun, 2006). Estudios realizados con la variedad kadota, muestran buenos resultados en términos de firmeza al utilizar temperaturas de 80°C (Amaya-Flores, 2008). Considerando lo anterior, se fijaron dos niveles de operación para evaluar este factor de estudio: Bajo (80°C) y Alto (90°C).

3. Tiempo de Escaldado (2 niveles). Se ha reportado como efectivo la utilización de tiempos de 1 a 3 min en el escaldado de higo, para concentraciones de 3% de Metabisulfito de Sodio, sin embargo no se especifica la temperatura (Piga *et al.* 2004). Latapi *et al.* (2006), reporta tiempos de hasta 7.5 min al utilizar concentraciones de 0%, 4%, 6% y 8% de bisulfito de sodio, a 25°C. Por otra parte, Petri *et al.* (2008), reporta buenos resultados con tiempos de 3 min al utilizar concentraciones de 0.6% de Metabisulfito de Sodio, 2.4% de la combinación de Metabisulfito de Sodio + ácido cítrico, así como 4.4% de la combinación de Metabisulfito de Sodio + ácido cítrico + ácido ascórbico, sin especificar la temperatura de escaldado. Con base en lo anterior y en los estudios previos realizados por Montoya-

Ballesteros y Robles-Ozuna (2007) en el escaldado de higo kadota, se fijaron dos niveles de operación para este factor de estudio: Bajo (5 min) y Alto (15 min).

4. Uniformidad del proceso de Inmersión (2 niveles). Para asegurar que la materia logre absorber uniformemente el aditivo adicionado en el proceso de escaldado, ésta debe ser agitada constantemente. Para lograr homogeneidad en los resultados, se establecieron dos niveles de operación para este factor de estudio: Bajo(5 revoluciones por minuto, *rpm*) y Alto (15 *rpm*).

5. Tamaño de Partícula (2 niveles). Estudios recientes en la deshidratación del higo, se han desarrollado utilizando la materia prima en su forma original (Papoff *et al.* 1998; Gallali *et al.* 2000; Arreola y Rosas, 2007; Piga *et al.* 2004; Demirbüker *etal.* 2004; Xanthopoulos *et al.* 2007). Sin embargo, en la deshidratación de frutas, se considera que entre menor sea el tamaño de partícula de la fruta a deshidratar, mayor y más rápida es la eliminación del contenido humedad (Sarsavadia *et al.* 1999; Fellows, 2000; Ratti y Mujumdar, 2005; Kingsly *et al.* 2007). Por lo tanto, para evaluar el efecto de este factor se establecieron dos niveles de operación: Bajo (1.346 ± 0.2 centímetros(*cm*)) y Alto (0.457 ± 0.2 *cm*).

6. Tiempo de Secado (2 niveles). Estudios realizados por Piga *et al.* (2004) y Xanthopoulos *et al.* (2007) muestran buenos resultados en términos de contenido final de humedad y color en la deshidratación de higo entero, utilizando procesos continuos de 33 *h*, 37 *h*, 40 *h* y 57 *h*; en los procesos desarrollados la mayor cantidad de humedad se eliminó en las primeras 10 *h* de procesamiento. Amaya-Flores (2008), reporta un contenido de humedad final cercano al 10%, en higo (entero) kadota deshidratado durante 47 *h*. Considerando los resultados de los estudios mencionados y los resultados de estudios previos realizados por los investigadores del laboratorio

de IAOV, se consideraron los siguientes niveles de operación para el factor de estudio: Bajo (24 h) y Alto (36 h).

7. Temperatura de Secado (2 niveles). Estudios recientes muestran que al utilizar temperaturas de 46.1°C, 50°C, 55°C y 60°C, se logra disminuir el contenido de humedad en el higos deshidratado del 30% hasta el 10% (Piga *et al.* 2004; Xanthopoulos *et al.* 2007; Amaya-Flores, 2008). Por lo tanto, los niveles establecidos para el estudio de este factor fueron: Bajo (50°C) y Alto (60°C).

El Cuadro 7, muestra la relación de los factores de estudio descritos con anterioridad y sus respectivos niveles de operación.

Paso 4. Diseño de la Matriz Ortogonal

El AO $L_{16} (2^{15-11})$ se emplea para estudiar desde 4 hasta 15 factores con dos niveles de operación, de tal forma que a mayor cantidad de factores de estudio menor grados de libertad para estudiar interacciones (Park, 1996; Gutiérrez y De la Vara, 2005). En esta investigación se establecieron 7 factores de estudio, de los cuales un factor presenta 8 niveles de operación (se fijaron 2 aditivos y cuatro combinaciones por cada uno) y 6 con 2 niveles de operación, es decir se trata de un factorial mixto 8×1 y 2×6 , debido a esto fué necesario hacer una modificación al AO $L_{16} (2^{15-11})$. Generalmente, la modificación se realiza con base en el concepto de grados de libertad. El número de grados de libertad de una suma de cuadrados es igual al número de elementos independientes en dicha suma de cuadrados (Montgomery, 2005).

Para facilitar el análisis, la modificación de la matriz se realizó utilizando el programa "MINITAB 14", el cual automáticamente generó el arreglo correspondiente, mismo que se muestra en el Cuadro 8 inciso A. Adicionalmente, el inciso B muestra el AO $L_{16} (2^{15-11})$.

Cuadro 7. Factores de Control del proceso de Deshidratación del higo kadota y sus respectivos niveles: Experimental Preliminar

No.	Símbolo	Factores	Unidad	Bajo	Intermedio			Alto
1	A	Aditivos: $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ / $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$	%	0.00	0.15	0.30	0.45	0.75
2	B	Tiempo de Escaldado	<i>min</i>	5				15
3	C	Temperatura de Escaldado	°C	80				90
4	D	Uniformidad del proceso de Inmersión	Revoluciones por Minuto (<i>rpm</i>)	15				45
5	E	Tamaño de Partícula	<i>cm</i>	1.346±0.2				0.457±0.2
6	F	Temperatura de Secado	°C	50				60
7	G	Tiempo de Secado	Horas (<i>h</i>)	24				36

Como se observa en el Cuadro 8, inciso A, los factores de estudio están representados por las letras A, B, C, D, E, F y G; los niveles de cada factor están representados por los números 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8; y finalmente los renglones proporcionan la combinación de niveles de los factores de estudio para cada experimento. Taguchi acomoda las columnas diferentes al orden de Yates, de tal forma que a la primera columna de cada AO asigna aquel factor cuyos niveles aparecen lo más agrupados posibles, de manera que el factor se cambia de nivel un mínimo de veces si el arreglo se corre en ese orden; además recomienda asignar aquel factor que sea más difícil de manipular durante el experimento (cambiar su nivel de una prueba a otra). De tal forma que el proceso de esta investigación incluyera el estudio de 7 factores con dos niveles de operación cada uno, las columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14 y 13, serían las adecuadas para desarrollar el modelo (Gutiérrez y De la Vara, 2005). Sin embargo, al tratarse de un factorial mixto, el programa utilizado asignó automáticamente las columnas 8, 9, 10, 11, 12 y 13 del AO $L_{16}(2^{15-11})$ para los factores B, C, D, E, F y G, como observa en el Cuadro 8, debido a que estos factores sólo requieren dos grados de libertad.

El factor A, el cual tiene 8 niveles (es decir requiere 8 grados de libertad), se asignó a la columna 1, de tal forma que los grados de libertad necesarios para el factor resultaron de agrupar las columnas 1, 2, 3, 4, 6, 7, 14 y 15 del AO $L_{16}(2^{15-11})$. Por lo tanto, los 2 grados de libertad de la columna 5 (la cual no fue utilizada) automáticamente se asignan al error aleatorio, aunque la matriz resultante no la incluya explícitamente.

Taguchi no enfatiza la necesidad de correr el experimento en orden aleatorio como se recomienda en el diseño clásico, sino más bien presupone las complicaciones prácticas que ello conlleva, y estructura el orden de las columnas conforme a estas dificultades. Sin embargo, en este experimento se decidió aleatorizar el orden de inicio de los tratamientos, para asegurar que las pequeñas diferencias provocadas por los materiales, equipos y todos los

adro 8. Arreglo Ortogonal $L_{16}(8^{1-1} 2^{6-7})$ para el proceso de deshidratación del higo kadota, utilizando MINITAB 14.

Experimento No.	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2	2
3	2	1	1	1	1	2	2
4	2	2	2	2	2	1	1
5	3	1	1	2	2	1	1
6	3	2	2	1	1	2	2
7	4	1	1	2	2	2	2
8	4	2	2	1	1	1	1
9	5	1	2	1	2	1	2
10	5	2	1	2	1	2	1
11	6	1	2	1	2	2	1
12	6	2	1	2	1	1	2
13	7	1	2	2	1	1	2
14	7	2	1	1	2	2	1
15	8	1	2	2	1	2	1
16	8	2	1	1	2	1	2

B)

Arreglo Ortogonal $L_{16}(2^{15-11})$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2	1	2	1	2	1	2	2	2	1	2	1	2	1	2
2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

factores no controlados, se repartan de manera homogénea en todos los tratamientos. El Cuadro 9 muestra el AO L₁₆ (8x1 2x6) el modelo experimental, ya sustituido con sus factores y niveles correspondientes.

Paso 5. Desarrollo del Experimento

El experimental preliminar se desarrolló en el LIAOV del CIAD, en Hermosillo, Sonora. Los primeros 8 tratamientos se realizaron de forma consecutiva del 15 al 21 de Julio del 2007. Los 8 experimentos restantes se llevaron a cabo del 20 al 27 de Agosto del 2007 inmediatamente después de ajustar los valores de los niveles en los factores E (Tamaño de partícula) y F (Temperatura de secado).

Paso 6. Análisis de Datos

Cuando los 16 experimentos se concluyeron, se determinó el CTC en cada uno de ellos. Los datos se analizaron con el programa "MINITAB 14" de la siguiente forma:

- a) Primero se ingresó a la sección *Diseño Taguchi* y se generó la matriz.
Después se agregaron tres columnas con los resultados de las mediciones de CTC de cada uno de los tratamientos. Los tres datos correspondían a las mediciones repetidas de la misma unidad experimental, por cada uno de los 16 experimentos.
- b) Posteriormente se seleccionó la SN correspondiente, en este caso la señal seleccionada fué "Lo Menor es lo Mejor".
- c) El programa realizó el análisis y generó las gráficas de efectos correspondientes.
- d) Con las gráficas de efectos principales se identificaron los efectos activos y se determinaron las condiciones óptimas de operación.
- e) Se realizó el análisis de medias y se clasificaron los factores según los criterios descritos en la Sección 2.1.2.
- f) Se establecieron las condiciones óptimas. Para expresar la combinación óptima se tomó la letra representativa de cada factor óptimo seleccionado

Cuadro 9. Modelo Experimental con los factores y niveles correspondientes: Experimental Preliminar

Tratamiento	L ₁₆ (8**1 2**6)						
	A Concentración y Tipo Aditivo (%)	B Temperatura de Escaldado (°C)	C Tiempo de Escaldado (min)	D Uniformidad del proceso inmersión (rpm)	E Tamaño de Partícula (cm)	F Temperatura de Secado (°C)	G Tiempo de Secado (h)
T ₁	Bisulfito 0.015	80	5	15	1.346±0.2	50	24
T ₂	Bisulfito 0.015	90	15	45	0.457±0.2	60	36
T ₃	Bisulfito 0.030	80	5	15	1.346±0.2	60	36
T ₄	Bisulfito 0.030	90	15	45	0.457±0.2	50	24
T ₅	Bisulfito 0.045	80	5	45	0.457±0.2	50	24
T ₆	Bisulfito 0.045	90	15	15	1.346±0.2	60	36
T ₇	Bisulfito 0.075	80	5	45	0.457±0.2	60	36
T ₈	Bisulfito 0.075	90	15	15	1.346±0.2	50	24
T ₉	A.Ascórbico 0.015	80	15	15	0.457±0.2	50	36
T ₁₀	A.Ascórbico 0.015	90	5	45	1.346±0.2	60	24
T ₁₁	A.Ascórbico 0.030	80	15	15	0.457±0.2	60	24
T ₁₂	A.Ascórbico 0.030	90	5	45	1.346±0.2	50	36
T ₁₃	A.Ascórbico 0.045	80	15	45	1.346±0.2	50	36
T ₁₄	A.Ascórbico 0.045	90	5	15	0.457±0.2	60	24
T ₁₅	S/Aditivo 0.000	80	15	45	1.346±0.2	60	24
T ₁₆	S/Aditivo 0.000	90	5	15	0.457±0.2	50	36

y el nivel de operación se indicó con un subíndice. Para identificar a los factores que no afectan la media ni la variabilidad (Factores clase IV) se utilizó el símbolo \$. En ésta etapa experimental, se determinó la combinación de factores óptimos con base en los resultados del CTC.

Con base en la combinación de factores establecida en esta etapa, se realizaron los ajustes necesarios al modelo experimental y se desarrolló el estudio experimental final; en reemplazo de la corrida de comprobación.

Los resultados del contenido final de humedad se estimaron con el propósito de establecer un patrón de comportamiento del proceso.

3.1.2 Materia Prima

El higo, variedad kadota, utilizado en el experimental preliminar, fue cultivado en "Estación Enchilladas", Distrito Rural del Caborca, Sonora, durante la cosecha de Julio y Agosto del 2007. La Figura 8, muestra el higo recolectado en cual, como se observa, presentaba en distintas etapas de madurez.



Figura 8. Higo Kadota, cultivado en "Estación Enchilladas", Caborca, Sonora.

3.1.3 Proceso de Deshidratación del Higo

La Figura 9, muestra las etapas de proceso de deshidratación del higo variedad kadota. El diagrama es una adaptación del modelo propuesto por Artés y Hernández (2000), Artés (2000) y Ratti y Mujumdar (2005). Los materiales y métodos utilizados en el desarrollo de cada una de las etapas se describen a continuación.

1) Recolección de Materia Prima

La recolección del higo se realizó manualmente. Los criterios de recolección fueron: color, firmeza de la piel y tamaño. Respecto al tamaño, se eligieron muestras relativamente uniformes. Asimismo, se consideró que los higos no presentaran daño superficial (ruptura de la piel), ó bien algún tipo de contaminación. Los higos recolectados se colocaron en contenedores (Hielera Coleman 5298-718 100QT/95LT), donde se almacenaron provisionalmente a temperatura ambiente (20-26°C) para ser transportados inmediatamente a la planta piloto, donde la materia prima se almacenó en cámaras de refrigeración con ambiente controlado (0°C) hasta iniciar el análisis.

2) Limpieza de la Materia Prima

Para disminuir la contaminación por microorganismos y, consecuentemente, prolongar la calidad y vida útil de la materia prima, se efectuó la operación de limpieza. La materia prima se sumergió en un baño de agua clorada de 100 *ppm* por 5 min, durante éste periodo se eliminó manualmente la materia en mal estado y con rupturas o daños. Después, la materia prima se cambió a un baño de agua con flujo corriente, y finalmente se colocó en contenedores ventilados.

3) Selección y Caracterización de la Materia Prima

Se seleccionaron las frutas sanas, con mejor apariencia (color, firmeza de la piel y tamaño uniforme) y se descartaron las frutas descompuestas, con defectos superficiales y con alto grado de inmadurez. Según lo expuesto en la Sección 2.3.2.1., comúnmente el higo es deshidratado cuando alcanza su madurez comercial, por lo tanto el primer paso consistió en clasificar la fruta recolectada en grupos según el estado de madurez (EM).

Los criterios considerados para determinar el grado de madurez fueron el color y la firmeza en la piel del higo. De esta forma se identificaron cinco estados de madurez tal y como se muestra en la Figura 10, donde: al EM1 corresponde el higo inmaduro el cual presenta un color verde opaco y piel firme; al EM2 corresponde el higo inmaduro pero con menor rigidez de piel y de color verde claro; EM3 representa al higo maduro

Diagrama de las Etapas para el proceso de deshidratación del higo kadota

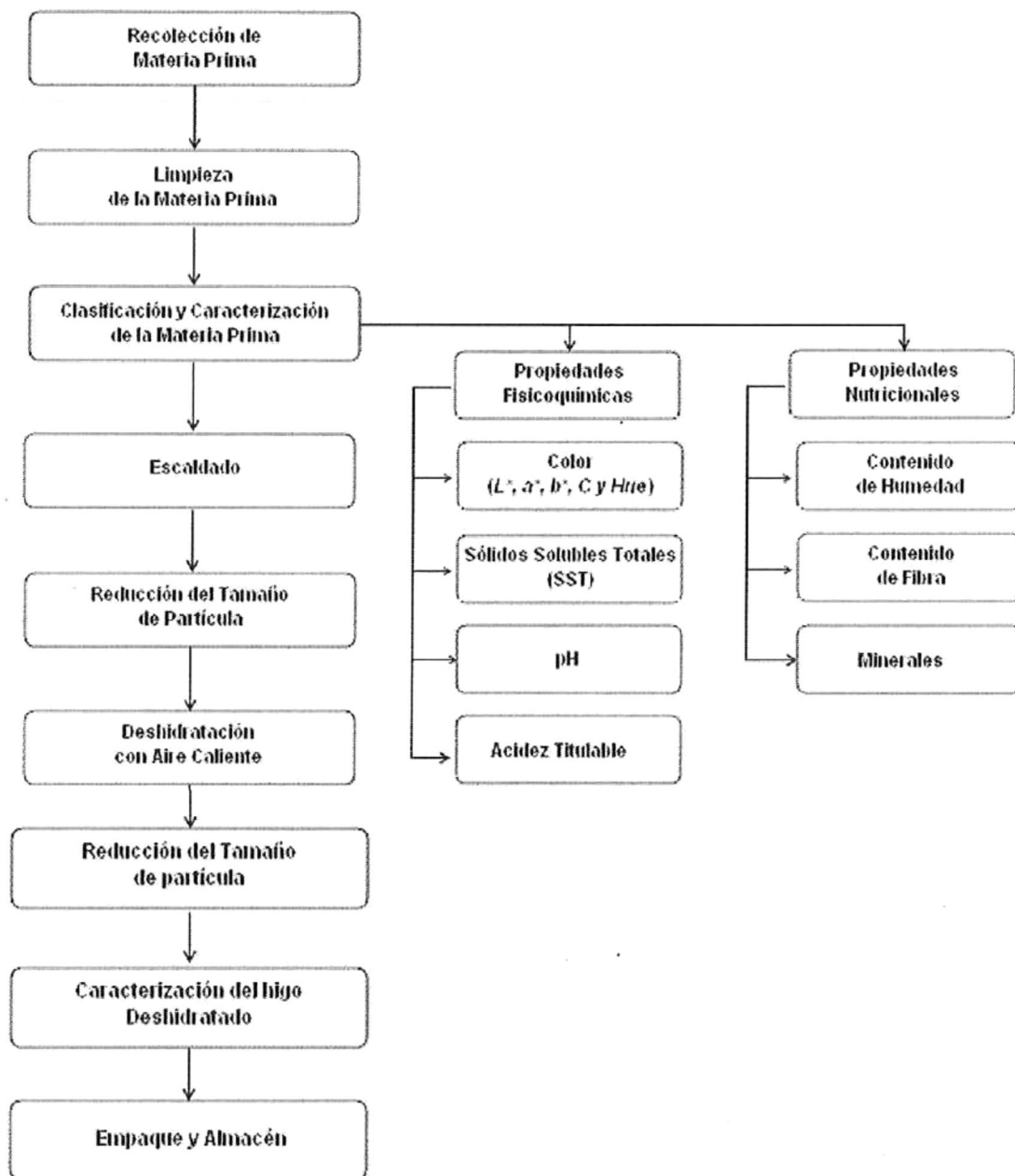


Figura 9. Diagrama de las Etapas para el proceso de deshidratación del higo kadota.
Fuente: Modificado de Artés (2000), Artés y Hernández (2000), Ratti y Mujumdar (2005).

de color verde-ámbar; el EM4 es el grupo que contiene higos reblandecidos de color amarillo-dorado; y el EM5 es el grupo que contiene higos sobremaduros con gran flacidez en la piel y de color amarillo-cobrizo.

Por otra parte, para definir la calidad inicial de la fruta en cada uno de los estados de madurez, se determinaron las características fisicoquímicas y las características nutricionales de la materia prima, para ello se tomó una muestra de 500 gr de higo fresco de cada EM. La determinación del tamaño del lote en cada EM, se realizó pesando las muestras en una balanza digital (Sartorius GMBH Gottingen, Type 3826, MP8-1, Fabr 36040037, 220V~50/60hz). Una vez realizada la clasificación de la materia prima, se seleccionó el EM5 para desarrollar el proceso de deshidratación de la Etapa I. Adicionalmente se realizaron dos experimentos en los cuales se utilizó el EM1, estas muestras también fueron caracterizadas bajo los principios, que se describen a continuación.

a) Propiedades Fisicoquímicas

Las características fisicoquímicas de mayor interés para el estudio fueron: color, pH y Acidez así como Sólidos Solubles Totales.

Color; Para medir el color de la materia prima se utilizó un colorímetro Minolta (CR 400/NS3000765, AC120V~50-60Hz 0.4A N. América & Japan) ajustado a CR-D65.

El color es representado en valores de L^* , a^* , b^* , C y $^{\circ}h$. El $^{\circ}h$ es determinado con ayuda de los parámetros a^* y b^* ($\tan^{-1}b^*/a^*$), para mostrar la intensidad del color (Little, 1975). Primero se seleccionaron 20 higos correspondientes al EM1, a cada uno de ellos se le midió L^* , a^* , b^* , C y $^{\circ}h$, tal y como se muestra en la Figura 11, es decir se colocó la lente del colorímetro sobre tres distintos extremos de la fruta para realizar las lecturas correspondientes. Este procedimiento se hizo en cada una de las

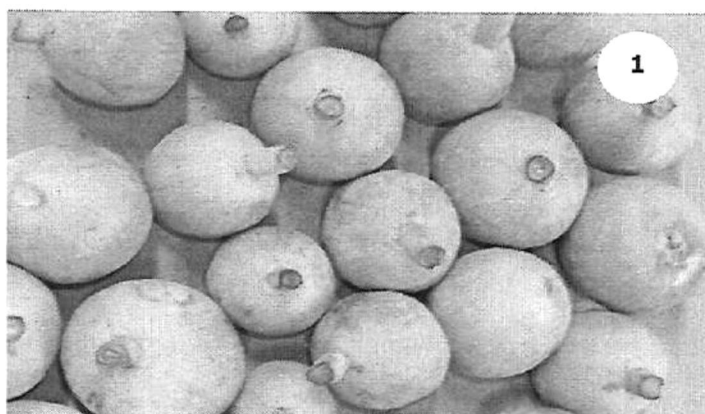
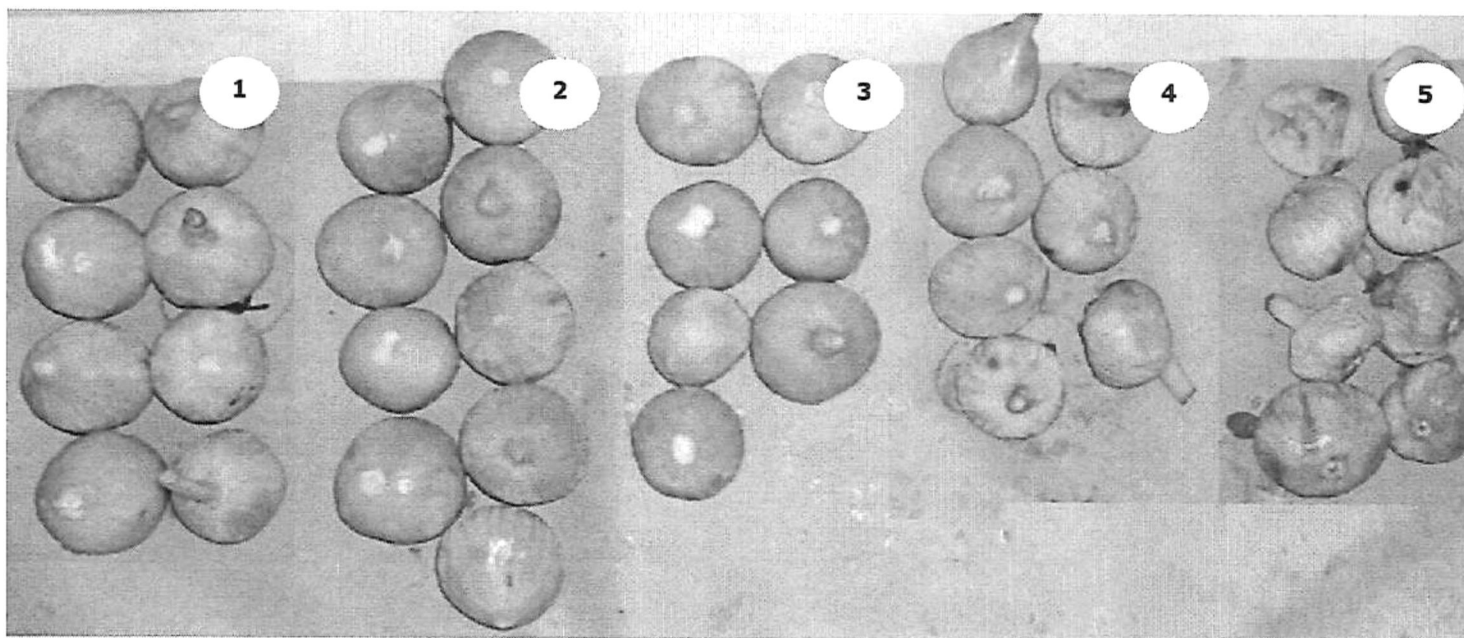


Figura 10. Clasificación del higo según su Estado de Madurez del 1) verde hasta el 5) sobremaduro.

20 muestras del EM1. Posteriormente se seleccionaron 20 higos correspondientes al EM2 y nuevamente se efectuaron las mediciones por triplicado de los parámetros L^* , a^* , b^* , C y $^{\circ}h$, la operación se repitió con los EM3, EM4 y EM5. Finalmente, la fruta utilizada en la medición de color se regresó al lote experimental para ser utilizada en el proceso de deshidratación.

pH y Acidez; Se utilizó una muestra de 10 gr de higo fresco por cada EM, para determinar el pH y Acidez, contenidos en la materia prima. El pH fue medido a 20°C, según el método A.O.A.C. (2000). Se utilizó un potenciómetro digital (PH Meter 445, Corning, NS 002361, U.K.) y un Titulador automático (Mettler DL21 Titrator, SNRM 16127, Hightstown, N.J.). Todas las mediciones se realizaron por triplicado en cada EM.

Sólidos Solubles Totales; Para determinar la cantidad de sólidos solubles contenidos en la materia prima de cada EM, se aplicó el método A.O.A.C. (2000). Se tomó una muestra de 10 gm de cada EM y se diluyó en una solución de agua destilada. Posteriormente se utilizó un refractómetro digital (Modelo PR-32α, RE-243041, 10% sol. sucrosa), para determinar la concentración de °Brix en cada uno de los EM. Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

b) Propiedades Nutricionales

Las características nutricionales de mayor interés determinadas en el higo, fueron: el contenido de humedad, el contenido de fibra dietaria, y la determinación de minerales. En esta primera experimental sólo se determinó el contenido de humedad y el contenido de fibra.

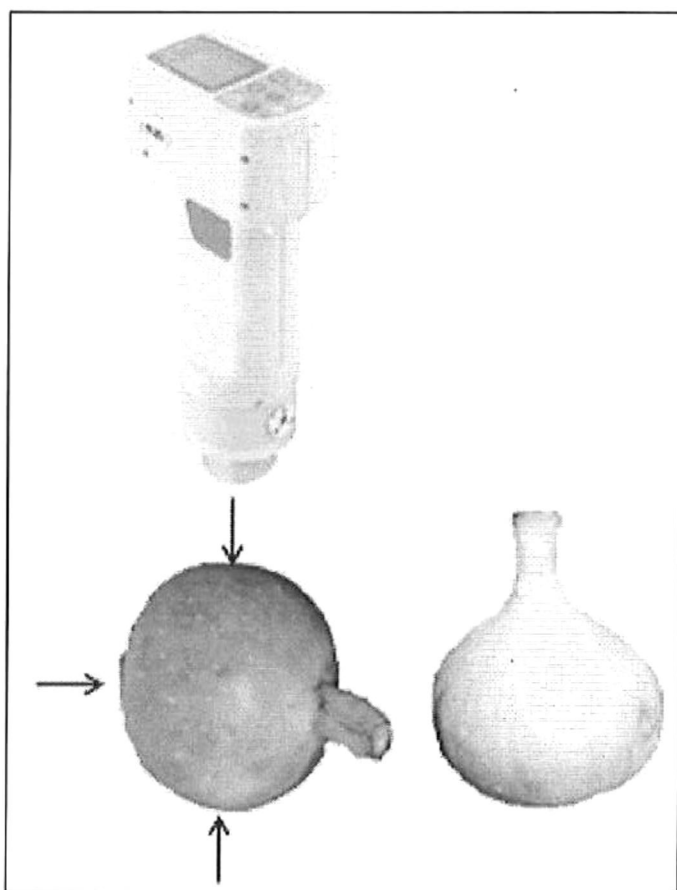


Figura 11. Medición de los parámetros de color L^* , a^* , b^* y $^{\circ}h$ en el higo kadota.

Contenido de Humedad; Para determinar el contenido de humedad del higo fresco, se aplicó el método de la A.O.A.C. (1980) para higos deshidratados. Se seleccionó una muestra de 2 gr de higo fresco del EM5 (estado seleccionado para realizar el experimental preliminar). La muestra se introdujo durante 6 horas a $70^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ en una estufa de vacío (VWR Scientific Inc, Mod 1430 Sheldon Manufacturing; Oregon, EUA) con una presión no mayor a 100 mm de Mercurio. Posteriormente, la muestra se colocó en un desecador (Desiccator shields H42050 y H42051, No. Serie 9993202237) donde se almacenó por 6 h. Una vez transcurrido el tiempo de enfriamiento de las muestras, se pesaron en una balanza analítica (Adventurer TM , ART1530, Max. Cap 150g, Readability .001g, Power requirements 8-14.5V, 50/60 Hz 6VA, or 9.5-20V 6W, SN J341 122633051 P. OHAUS Corp. Pine Brook. NJ.) para determinar el contenido de humedad. Este mismo procedimiento se utilizó para determinar el contenido de humedad del higo deshidratado. Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

Fibra; El contenido total de fibra de la materia prima se determinó según el método 960.52 de la A.O.A.C. (2000). Sólo se determinó el contenido de fibra del EM1 y EM4, puesto que la mayor variación del contenido de fibra y otros nutrientes del higo, se presentan cuando el fruto está inmaduro y cuando llega a la madurez comercial (Marei y Crane, 1971; Salunke y Kadam, 1995; Chessa, 1997). Con este mismo método se determinó el contenido de fibra de la combinación optimizada del modelo de predicción.

4) Escaldado

Para efectuar la operación de escaldado, se dividió el lote del EM5 en 16 muestras iguales de 1500 gr, de acuerdo con lo expuesto en la Sección 3.1.1 paso 4. El escaldado de la fruta se realizó en una marmita (Marmita polinox, doble fondo, cap. 2k/cm², 60lb psi, NS 1339400001). Posteriormente, las

muestras se colocaron en contenedores ventilados a temperatura ambiente ($25\pm1^{\circ}\text{C}$) hasta enfriar.

5) Reducción del Tamaño de Partícula

La reducción del tamaño de partícula en la Etapa I, se realizó utilizando dos métodos. Inicialmente, con base en lo recomendado por Ratti y Mujumdar (2005) y Fellows (2000) para procesos de deshidratación de frutas donde el objetivo es obtener polvo, se establecieron dos tamaños de partícula: $0.457\pm0.2\text{ cm}$ y $1.320\pm0.2\text{ cm}$; y para ello se utilizó un molino (comitrol model 3600, impeller drive-10, H.P. 200-208 v, 50/60 Hz, 3000/3600 rpm. Type CU6B) y dos cabezas cortadoras. La Figura 12 muestra el tamaño de partícula obtenido y el equipo utilizado.

Posteriormente, se realizaron ajustes al tamaño de partícula, debido a los inconvenientes que se presentaron con el manejo de la materia prima durante la operación de secado. Los nuevos tamaños de partícula definidos fueron $1.347\pm0.2\text{ cm}$ y $2.108\pm0.2\text{ cm}$. Para obtener los tamaños, el proceso de reducción se realizó manualmente. Se dividió el higo en cuatro y ocho rebanadas, tomando como origen el centro polar del higo, tal y como se muestra en la Figura 13. Los $1.347\pm0.2\text{ cm}$ y $2.108\pm0.2\text{ cm}$ representan el grosor de cada rebanada. El cuadro 10, muestra la matriz experimental con los cambios realizados en el tamaño de partícula.

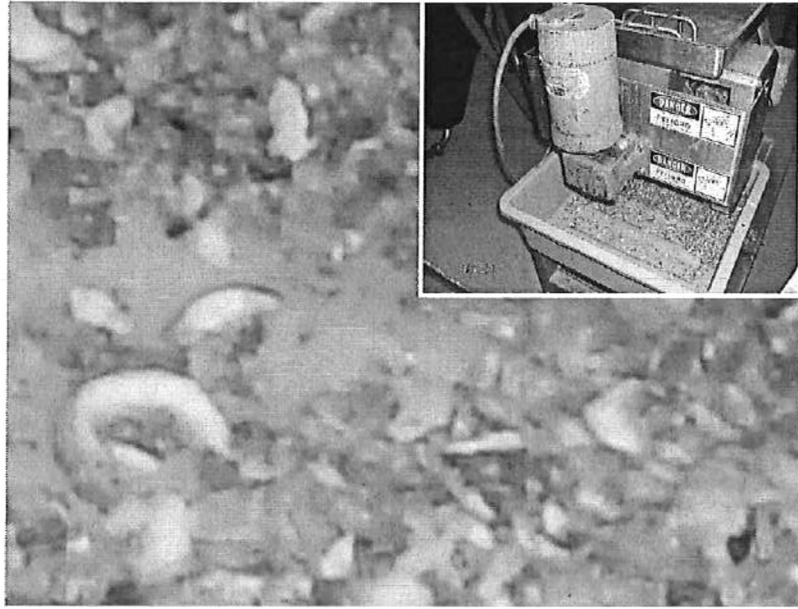


Figura 12. Reducción del tamaño de partícula de la materia prima utilizando un molino.

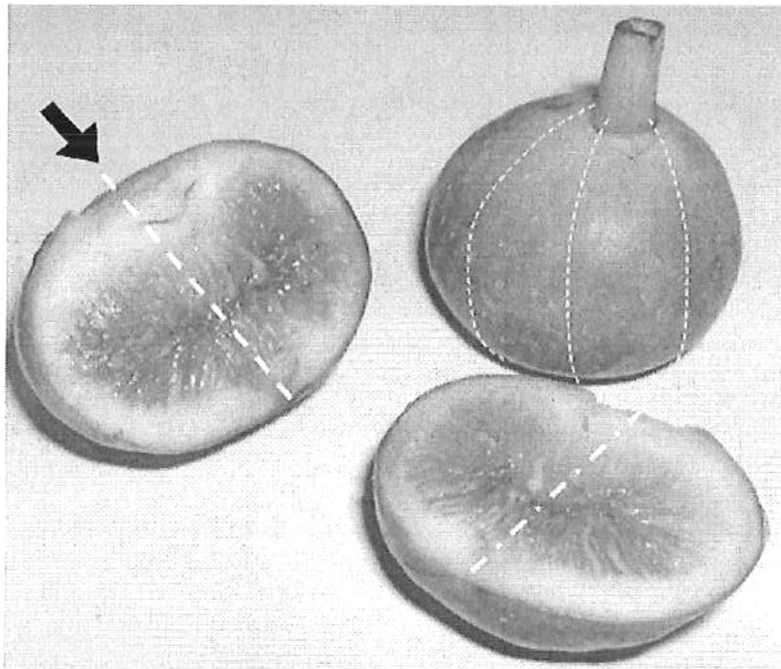


Figura 13. Reducción del tamaño de partícula de la materia prima: Experimental Final.

Cuadro 10. Modelo Experimental con los factores y niveles correspondientes: Experimental Preliminar

Tratamiento	L ₁₆ (8 ² *1 2 ² *6)							
	A Concentración y Tipo Aditivo (%)		B Temperatura de Escaldado (°C)	C Tiempo de Escaldado (min)	D Uniformidad del proceso inmersión (rpm)	E Tamaño de Partícula (cm)	F Temperatura de Secado (°C)	G Tiempo de Secado (h)
T ₁	Bisulfito de Sodio	0.15	80	5	15	1.346±0.2	50	24
T ₂	Bisulfito de Sodio	0.15	90	15	45	0.457±0.2	60	36
T ₃	Bisulfito de Sodio	0.30	80	5	15	1.346±0.2	60	36
T ₄	Bisulfito de Sodio	0.30	90	15	45	0.457±0.2	50	24
T ₅	Bisulfito de Sodio	0.45	80	5	45	0.457±0.2	50	24
T ₆	Bisulfito de Sodio	0.45	90	15	15	1.346±0.2	60	36
T ₇	Bisulfito de Sodio	0.75	80	5	45	0.457±0.2	60	36
T ₈	A.Ascórbico	0.75	90	15	15	1.346±0.2	50	24
T ₉	A.Ascórbico	0.15	80	15	15	1.346±0.3	50	36
T ₁₀	A.Ascórbico	0.15	90	5	45	1.347±0.2	60	24
T ₁₁	A.Ascórbico	0.30	80	15	15	2.108±0.2	60	24
T ₁₂	A.Ascórbico	0.30	90	5	45	1.347±0.2	55	36
T ₁₃	A.Ascórbico	0.45	80	15	45	1.347±0.2	55	36
T ₁₄	A.Ascórbico	0.45	90	5	15	2.108±0.2	60	24
T ₁₅	Control	0.00	80	15	45	1.347±0.2	60	24
T ₁₆	Control	0.00	90	5	15	2.108±0.2	55	36

6) Deshidratación con Aire Caliente

El higo fue deshidratado en un secador de gabinete (Enviro-Pak CHU150, Micro-pak NS MP500, air direction timer limite 225°F 40 psi, 4mxs, 1.5m/s, EUA), así como se observa en la Figura 14. La materia prima se colocó en charolas de secado, las cuales a su vez se dispusieron en un carro de riel. Concluido el tiempo de secado, los tratamientos fueron retirados de cada charola, para ser introducidos en bolsas plásticas. Los tratamientos se etiquetaron y se almacenaron temporalmente en un desecador (Desiccator Shields Bel Art H420 50 & H42051 NS 999320237) por 12 h. Después, se tomó una muestra de 100 gr de cada uno de los 16 tratamientos para realizar la caracterización del higo seco, el resto de la muestras se almacenó a temperatura ambiente ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$).

7) Reducción del tamaño de partícula

Para reducir el tamaño de partícula del higo deshidratado se utilizó un molino eléctrico (Braun Coffee Mill replacement grounds receptacle. Model/Type: 3045, KMM30). Debido a los inconvenientes que se presentaron durante la deshidratación de los tratamientos iniciales, sólo en los tratamientos 10,11, 12, 13, 14 ,15 y 16, fue posible reducir el tamaño de partícula del higo deshidratado para obtener polvo de higo.

8) Caracterización del higo Deshidratado

Se tomó una muestra de 100 grs, de los tratamientos en los cuales fue posible reducir el tamaño de partícula y se determinaron las propiedades fisicoquímicas y nutricionales del higo deshidratado, aplicando los métodos descritos en el inciso 3 de esta sección.

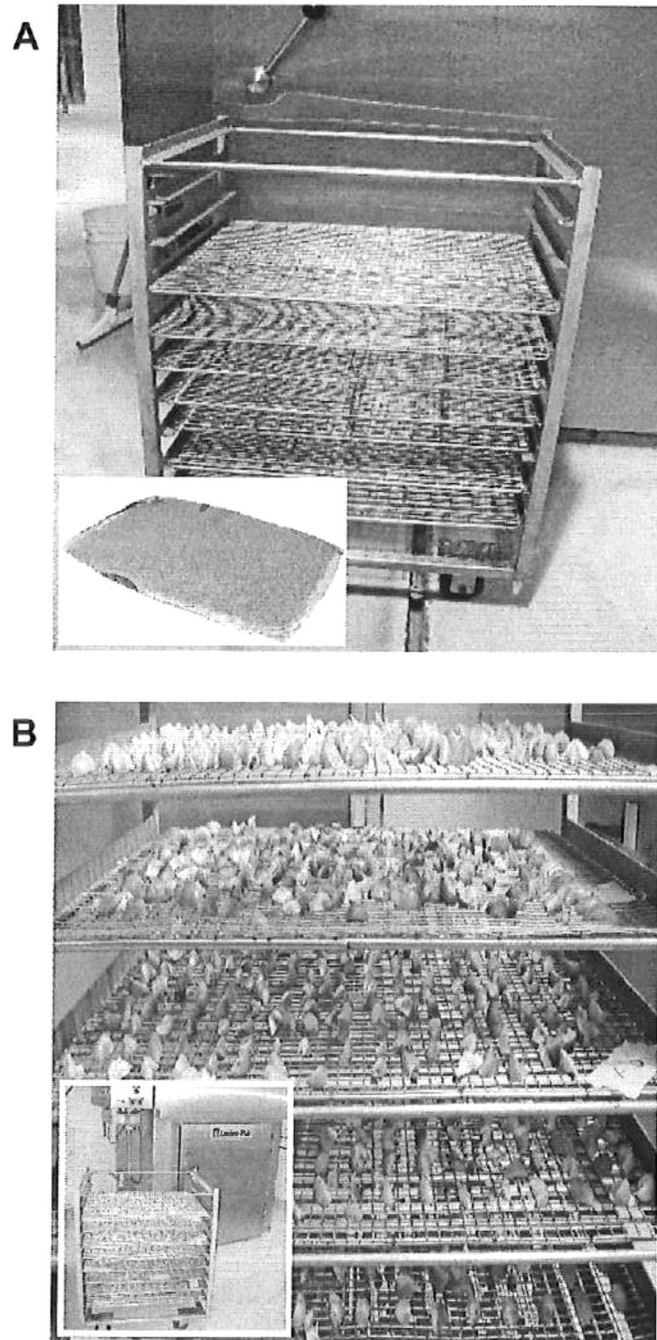


Figura 14. Distribución del higo en las charolas de secado y carro de riel: A) Utilizando un tamaño de partícula $0.457\pm0.2\text{ cm}$ y $1.320\pm0.2\text{ cm}$ y B) $1.347\pm0.2\text{ cm}$ y $2.108\pm0.2\text{ cm}$.

9) Empaque y Almacenamiento del higo deshidratado

El higo deshidratado, se almacenó en bolsas plásticas cerradas herméticamente y debidamente etiquetadas a temperatura ambiente ($24^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$), durante 9 meses.

3.2 Etapa II: Experimental Final para la Deshidratación del higo

En esta etapa las variables de respuesta del proceso de deshidratación y los factores de estudio se conservaron igual a los establecidos en la Etapa I. Sin embargo, se modificaron los valores de los niveles en los factores E (tamaño de partícula) y G (temperatura de secado. Asimismo, se cambió el EM utilizado por el EM1. El modelo experimental, las etapas del proceso de deshidratación y el análisis de datos, se desarrollaron igual a la Etapa I. A continuación se describen los materiales y métodos que se modificaron para el desarrollo de esta etapa.

3.2.1 Diseño del Modelo Experimental

El modelo experimental utilizado, se basó en las etapas del diagrama del Diseño Paramétrico expuesto en Figura 2, de la sección 2.1.4.1; y corresponde al descrito en la sección 3.1.1. A continuación se describen los ajustes realizados al modelo.

Paso 1. Determinación de las características de calidad a optimizar.

Se conservaron las mismas características de calidad definidas en la Etapa I, así como los criterios de evaluación. Las características definidas fueron:

- 1) Minimizar el CTC, utilizando la SN "Lo Menor es lo Mejor" como criterio de evaluación;
- 2) Lograr un contenido final de humedad del $6 \pm 1\%$, utilizando la SN "Lo Nominal es Lo Mejor".
- 3) Minimizar la pérdida de nutrientes durante el proceso de deshidratación, seleccionando la combinación óptima con el mayor contenido de calcio, potasio y fibra dietaria.

Paso 2. Identificación de los Factores de Ruido y sus condiciones de Operación.

En esta etapa no se estudió el efecto de factores de ruido, sólo se consideraron los efectos de los factores de ruido estudiados en la Etapa I, para la planeación del experimento.

Paso 3. Identificación de los Factores de Control y sus condiciones de Operación.

Se conservaron los 7 factores de control establecidos en la Etapa I. Respecto al valor de los niveles, se aumentaron los tamaños de partícula de 1.346 ± 0.2 a 1.346 ± 0.2 , y de 0.457 ± 0.2 a 2.108 ± 0.2 . También se aumentó el valor del nivel bajo en el factor F (temperatura de secado) de 50°C a 55°C . Finalmente, otro aspecto que se modificó fue la distribución de los aditivos y concentraciones en la columna 1, esto se realizó con el propósito de facilitar el análisis de los datos. El Cuadro 11, muestra las modificaciones realizadas.

Paso 4. Diseño de la Matriz Ortogonal.

Se utilizó el AO $L_{16} (2^{15-11})$ modificado a $L_{16} (8 \times 1 \quad 2 \times 6)$, que se definió en el experimental preliminar.

Paso 5. Desarrollo del Experimento

El experimental final se desarrolló en el LIAOV del CIAD, en Hermosillo, Sonora. Todos los tratamientos se desarrollaron de forma consecutiva del 17 al 23 de Diciembre del 2007.

Paso 6. Análisis de Datos

Se desarrollaron los mismos criterios y pasos descritos en el paso 6 del experimental preliminar.

Cuadro 11. Modelo Experimental con los factores y niveles correspondientes: Experimental Final

Tratamiento	L ₁₆ (8 ³ 1 2 ³ 6)						
	Concentración de Aditivo Bisulfito/A.Ascórbico (%)	Temperatura de Escaldado (°C)	Tiempo de Escaldado (Min)	Uniformidad proceso inmersión (RPM)	Tamaño de Partícula (pulg)	Temperatura de Secado (°C)	Tiempo de Secado (Hr)
T ₁	S/Aditivo 0.00	80	5	15	1.347±0.2	55	24
T ₂	Bisulfito 0.15	90	15	45	2.106±0.2	60	36
T ₃	Bisulfito 0.30	80	5	15	1.347±0.2	60	36
T ₄	Bisulfito 0.30	90	15	45	2.106±0.2	55	24
T ₅	Bisulfito 0.45	80	5	45	2.106±0.2	55	24
T ₆	Bisulfito 0.45	90	15	15	1.347±0.2	60	36
T ₇	Bisulfito 0.75	80	5	45	2.106±0.2	60	36
T ₈	Bisulfito 0.75	90	15	15	1.347±0.2	55	24
T ₉	S/Aditivo 0.00	80	15	15	2.106±0.2	55	36
T ₁₀	A.Ascórbico 0.15	90	5	45	1.347±0.2	60	24
T ₁₁	A.Ascórbico 0.30	80	15	15	2.106±0.2	60	24
T ₁₂	A.Ascórbico 0.30	90	5	45	1.347±0.2	55	36
T ₁₃	A.Ascórbico 0.45	80	15	45	1.347±0.2	55	36
T ₁₄	A.Ascórbico 0.45	90	5	15	2.106±0.2	60	24
T ₁₅	A.Ascórbico 0.75	80	15	45	1.347±0.2	60	24
T ₁₆	A.Ascórbico 0.75	90	5	15	2.106±0.2	55	36

3.2.2 Materia Prima

El higo, variedad kadota, utilizado en el experimental final, fue cultivado en "Estación Enchilladas", Distrito Rural del Caborca, Sonora, en la cosecha realizada de Noviembre del 2007. La Figura 15, muestra parte de la materia prima cosechada.

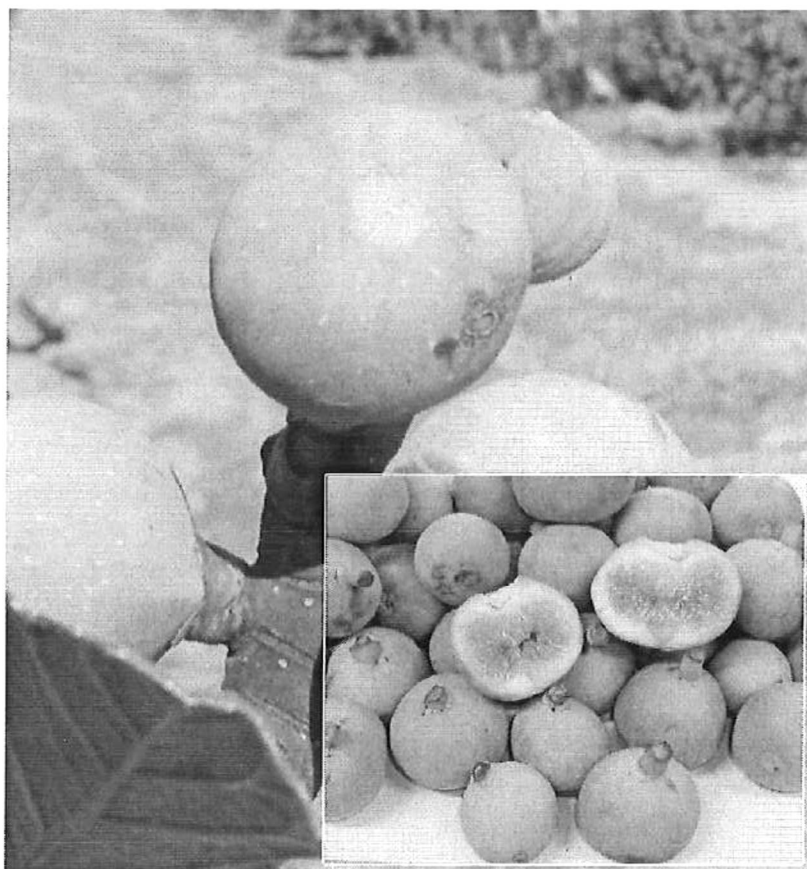


Figura 15. Higo Kadota, cultivado en "Estación Enchilladas", Caborca, Sonora: Experimental Final.

3.2.3 Proceso de Deshidratación

El desarrollo del proceso de deshidratación se realizó según las etapas descritas en el Diagrama 2, de la sección 3.1.2. En esta etapa el proceso de deshidratación se distinguen del estudio preliminar por los siguientes cambios:

- 1) se estableció un orden de asignación distinto en las concentraciones del

factor A y se agregó la concentración de 0.75% de ácido ascórbico; 2) se aumentó el tamaño de partícula y se aumentó el valor del nivel 1(50°C) del factor F(Temperatura de secado) a 55°C. Estos cambios se realizaron con base en los resultados obtenidos en el estudio preliminar.

1) Recolección de la Materia Prima

La recolección del higo se realizó manualmente, observando que los higos no presentaran daño superficial (ruptura de la piel), contaminación. En esta etapa de investigación, se recolectaron muestras que correspondieran al EM1, es decir con mayor firmeza en la piel y de color verde. Los higos recolectados se colocaron en contenedores (Hielera Coleman 5298-718 100QT/95LT), donde se almacenaron provisionalmente a temperatura ambiente (20-26°C) para ser transportados inmediatamente a la planta piloto, donde se almacenaron en ambiente controlado (0°C), hasta iniciar el análisis.

2) Limpieza de la Materia Prima

La materia prima se sumergió en un baño de agua clorada (por tratarse de una cantidad menor de materia prima se utilizó una solución de 50 ppm) por 5 min, para disminuir la contaminación por microorganismos y con ello prolongar la calidad y vida útil de la materia prima. Después la materia prima se cambió a un baño de agua con flujo corriente, y finalmente se colocó en contenedores ventilados.

3) Clasificación y Caracterización de la Materia Prima

Se determinó el tamaño total del lote cosechado, pesando el higo en una balanza digital (Sartorius GMBH Gottingen, Type 3826, MP8-1, Fabr 36040037, 220V~50/60hz). Se determinó el diámetro promedio de los higos, utilizando un vernier (Electronic digital caliper, Mod. 62379-531, NS 9070563, EUA) tomando una muestra de 10 higo enteros. Para determinar la calidad inicial de la materia prima se utilizó una muestra de 500 gr de higo, y se determinaron las

características fisicoquímicas y nutricionales correspondientes. En esta etapa sólo se utilizó higo correspondiente al EM1.

a) Propiedades Fisicoquímicas

Las características analizadas en el estudio final fueron: color, pH y Acidez, Sólidos Solubles Totales.

Color; Para medir el color se utilizó un colorímetro Minolta (CR 400/NS3000765, AC120V~50-60Hz 0.4A N. América & Japan) ajustado a CR-D65. El color es representado en valores de L^* , a^* , b^* , C y $^{\circ}h$. Se utilizaron 10 higos por cada Estado de Madurez, a los cuales se le realizaron 4 mediciones. Los higos utilizados en la medición de color se regresaron al lote experimental para ser empleados en la deshidratación.

pH y Acidez; Se utilizó una muestra de 10 gr de higo fresco, para determinar el pH y Acidez, contenidos en la materia prima. El pH fue medido a 20°C, según el método A.O.A.C. (2000), para ello se utilizó un potenciómetro digital (PH Meter 445, Corning, NS 002361, U.K.) y un Titulador automático (Mettler DL21 Titrator, SNRM 16127, Hightstown, N.J.). Todas las mediciones se realizaron por duplicado.

Sólidos Solubles Totales; Para determinar la cantidad de sólidos solubles contenidos en la materia prima, se tomaron 10 gr de higo fresco. La medición se realizó según el Método A.O.A.C. (2000), para ello se utilizó un refractómetro digital (Modelo PR-32 α , RE-243041, 10% sol. sucrosa).

b) Propiedades Nutricionales

Contenido de Humedad; Para determinar el contenido de humedad de la materia prima, se utilizó una estufa de vacío (VWR Scientific Inc, Mod 1430 Sheldon Manufacturing; Oregon, EUA) con una presión no mayor a 100 mm Hg, donde se introdujo la muestra por triplicado de la materia prima (6 grs de higo fresco)

durante 6 horas a $70^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Posteriormente las muestras se colocaron en un desecador (Desiccator shields H42050 y H42051, No. Serie 9993202237) donde se almacenaron por 6 hrs. Una vez transcurrido el tiempo de enfriamiento de las muestras, se realizó el análisis de humedad correspondiente según el método establecido por la A.O.A.C. (1980), para higos deshidratados.

Fibra; El contenido total de fibra de la materia prima se determino según el método 960.52 de la A.O.A.C. (2000).

4) Escaldado

Se dividió la materia prima en 16 muestras iguales de 500 grs, y se utilizó una marmita (Marmita polinox, doble fondo, cap. $2\text{k}/\text{cm}^2$, 60lb psi, NS 1339400001. Se utilizaron las condiciones establecidas en el experimental preliminar. Concluida la operación, las muestras se colocaron en contenedores ventilados a temperatura ambiente (25°C) hasta enfriarse

5) Reducción del Tamaño de Partícula

La reducción del tamaño de partícula se realizó manualmente. Se dividió el higo en cuatro y ocho rebanadas, tomando como origen el centro polar del higo, tal y como se mostró en la Figura 13. Los $1.347 \pm 0.2\text{ cm}$ y $2.108 \pm 0.2\text{ cm}$ representan el grosor de cada rebanada.

6) Deshidratado con Aire Caliente

El proceso de deshidratación se realizó en un secador de gabinete (Enviro Pak CHU150, Micro-pak NS MP500, air direction timer limite 225°F 40 psi, 4mxs, 1.5 m per sec, EUA). La materia prima se colocó en charolas de secado, las cuales a su vez se dispusieron en un carro de riel. Después de concluir la operación, los tratamientos fueron retirados de cada charola, para ser introducidos en bolsas plásticas. Los tratamientos se etiquetaron y se almacenaron temporalmente en un desecador (Desiccator Shields Bel Art H42050 & H42051 NS 9993202237) por 12 horas, para posteriormente tomar una

muestra de 100 gramos y realizar la caracterización del higo seco. El resto de la muestra se almacenó a temperatura ambiente ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$).

7) Caracterización del higo Deshidratado

Se redujo el tamaño de partícula del higo deshidratado, en todos los tratamientos hasta obtener higo en polvo. Para ello se utilizó un molino eléctrico (Braun Coffee Mill replacement grounds receptacle. Model/Type: 3045, KMM30); después se tomó una muestra de 100 *grs*, de cada tratamiento, y se procedió a la determinación de las propiedades fisicoquímicas y nutricionales del higo deshidratado, aplicando los métodos utilizados en la caracterización de la materia prima.

8) Empaque y Almacenamiento del higo deshidratado

El higo deshidratado, se almacenó en bolsas plásticas cerradas herméticamente y debidamente etiquetadas; y se colocaron a temperatura ambiente ($24^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) durante 5 meses.

3.3 Etapa III: Optimización del proceso

Se aplicaron los criterios descritos en la Sección 2.1.4. Una vez identificados los niveles de los tratamientos con mayor SN y menor variabilidad, se realizó el análisis correspondiente para determinar la clase de factores significativos según lo expuesto en la Sección 2.1.2. Finalmente se estableció el modelo de predicción.

3.4 Etapa IV: Estudio de Comprobación del Modelo de Predicción.

El estudio de comprobación se realizó en el LIAOV del CIAD en Hermosillo, Sonora. Los materiales y métodos utilizados se describen a continuación.

3.4.1 Diseño Experimental

El Cuadro 12, muestra las tres combinaciones que fueron establecidas en esta etapa. El experimento 1, corresponde a la combinación óptima, mientras que los

experimentos 2 y 3 son los que presentaron los segundos y terceros mejores resultados, según el modelo utilizado. Las letras A, B, C, D, E, F y G representan a cada uno de los factores, y los subíndices al nivel de cada factor con excepción del factor A en los renglones 2 y 3 donde el subíndice sólo se fijó para diferenciar las concentraciones de aditivos.

Cuadro 12. Tratamientos desarrollados en el estudio de Comprobación

Exp. No.	ADITIVO	FACTORES
1	Na ₂ S ₂ O ₅ 0.45%	A ₃ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁ F ₁ G ₁
2	Sin Aditivo	A ₄ B _a C ₁ D ₁ E ₁ F ₁ G ₁
3	Na ₂ S ₂ O ₅ 0.30%	A ₅ B _b C ₁ D ₁ E ₁ F ₁ G ₁

3.4.2 Materia Prima

Los higos utilizados en el estudio de comprobación corresponden a la cosecha de Diciembre del 2007. El EM utilizado corresponde al EM1, los parámetros de color del higo fueron $L^*=71.58\pm2.1$, $a^*=-17.51\pm1.7$ y $b^*=63.33\pm1.3$

3.4.3 Proceso de Deshidratación.

Se desarrollaron las mismas condiciones descritas en la Etapa 1 y Etapa 2. Además de determinar las propiedades fisicoquímicas y nutricionales del higo en polvo, se determinó el contenido residual de bisulfito de sodio, es decir, se precisó la concentración (en ppm) de bisulfito de sodio que prevaleció al proceso de deshidratación. Para determinar la cantidad residual de bisulfito de sodio, se utilizó 10 ± 0.2 g de muestra seca de los experimentos 1 y 2 del Cuadro 12. Las muestras se analizaron en un espectrofotómetro (CARY 50BIO UV-Visible. VARIAN NS 04003440, Type SPV, Italy) según el método 963.2 de la A.O.A.C (2000). Las lecturas se realizaron por triplicado y se compararon con un tratamiento control.

3.5 Etapa V: Determinación de la vida en anaquel del higo deshidratado

Para determinar la calidad del higo deshidratado y almacenado, se determinaron las propiedades fisicoquímicas y nutricionales descritas en la sección 3.1.3. En el caso del experimental preliminar las muestras analizadas tenían un periodo de vida en anaquel de 9 meses y las muestras del estudio final 5 meses.

3.6 Estudio preliminar para analizar la factibilidad de la elaboración de una botana con el higo deshidratado

Se utilizó el higo deshidratado en rodajas (correspondiente al modelo optimizado) para elaborar una botana.

3.6.1 Materia Prima

Para la elaboración de la botana se utilizaron 20 *gr* de higo deshidratado en forma de hojuelas y un jarabe. El jarabe se formuló en 2 litros de agua, a los cuales se agregó: 10 *gr* de Ácido Cítrico, 1000 *gr* azúcar estándar. Los ingredientes, para obtener el jarabe, se mezclaron en una marmita (Marmita polinox, doble fondo, cap.2k/cm², 60lb psi, NS 1339400001), a 100°C durante 5 min. Posteriormente, se agregó el higo deshidratado (en hojuelas), por 15 min a 100°C. Cuando el higo alcanzó la consistencia deseada, se retiró de la marmita y se esparció sobre una superficie seca, donde por último se espolvoreó 100 *gr* de chile molido. La botana se almacenó en bolsas plásticas a temperatura ambiente (24°C ± 2°C).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Etapa I: Estudio preliminar para la deshidratación del higo

A continuación se describen los resultados obtenidos en la caracterización de la materia prima, en el proceso de deshidratación y en el análisis de las características de calidad.

1) Materia Prima

El Cuadro 13, muestra los resultados obtenidos en la caracterización del higo fresco, en términos de: color, pH, Acidez Titulable y Sólidos Solubles Totales (SST), para cada uno de los EM analizados. Adicionalmente, se muestran los resultados de los parámetros de color L^* , a^* , b^* , C y $^{\circ}h$ obtenidos por Solomon *et al.* (2006), en la caracterización de higo de ésta misma variedad cultivado en Israel.

a) Color

Para determinar el grado de madurez de la fruta en fresco, se determinaron los parámetros L^* , a^* , b^* , C y $^{\circ}h$. Como se puede observar en el Cuadro 13, en general, la fruta inmadura presentó una luminosidad mayor a la fruta con sobremadurez, así lo reflejó el descenso en los valores de L^* ; por ejemplo, en el EM1 el valor para L^* fue de 68.41 ± 3.58 , mientras que en el EM5 fué de 63.04 ± 5.22 . La tendencia de estos resultados coincide con lo reportado por Solomon *et al.* (2006), en la caracterización de la misma variedad en dos EM: inmaduro y de madurez comercial; quien reporta valores para L^* de 67.60 ± 7.20 en fruto inmaduro y valores de 66.90 ± 7.40 para el fruto maduro. Por otra parte, se observó que no existe una variación importante en los valores de L^* para los EM2, EM3 y EM4 (la diferencia promedio entre los tres EM fué 1.28 ± 0.80).

En relación al parámetro a^* , los valores del EM1 (-21.66 ± 9.56) reflejaron un color amarillo-verdoso, el cual decreció con la maduración del fruto y al llegar al EM5 se obtuvieron valores de -0.83 ± 5.36 ; por su parte Solomon *et al.* (2006), reporta

Cuadro 13. Resultados de la Caracterización de la Materia Prima: propiedades Fisicoquímicas (Media $\pm$ Desviación estándar).

Experimental Preliminar									
Estado de Madurez (EM)	L^*	a^*	Color b^*	C^*	$^{\circ}h$	Sólidos Solubles Totales ($^{\circ}$ Brix)	pH	Acidez Titulable	
EM ₁	68.41 ± 3.58	-21.66 ± 9.56	53.56 ± 7.41	56.98 ± 6.31	113.24 ± 2.55	14.44 ± 0.06	5.74 ± 0.025	0.1937 ± 0.112	
EM ₂	68.51 ± 6.59	-17.33 ± 5.43	58.11 ± 4.03	60.97 ± 3.78	107.40 ± 3.39	19.16 ± 0.12	6.08 ± 0.007	0.1135 ± 0.004	
EM ₃	68.12 ± 3.56	-14.36 ± 2.42	58.61 ± 3.82	60.47 ± 3.72	104.01 ± 2.51	21.16 ± 0.12	6.07 ± 0.014	0.1270 ± 0.004	
EM ₄	70.05 ± 4.20	-12.93 ± 3.05	58.12 ± 5.11	59.54 ± 4.89	102.00 ± 2.85	25.96 ± 0.12	6.03 ± 0.032	0.1678 ± 0.007	
EM ₅	63.04 ± 5.22	-0.83 ± 5.36	41.42 ± 9.01	41.67 ± 9.17	88.98 ± 6.92	45.36 ± 0.23	5.60 ± 0.009	0.3039 ± 0.001	
Solomon et al. (2006)									
Kadota Inmaduro	67.60 ± 7.20	-10.10 ± 1.70	45.20 ± 5.30	46.10 ± 2.20	103.00 ± 2.70				
Kadota Maduro	66.90 ± 7.40	-3.80 ± 0.60	49.40 ± 5.70	49.50 ± 3.40	94.30 ± 4.70				

valores de $a^* = -10.1 \pm 1.7$ en el fruto inmaduro y -3.8 ± 0.6 en el maduro, es decir, existe similitud en la tendencia de los datos en ambos estudios. Los valores de a^* en los EM3 y EM4 presentaron menor diferencia en comparación a los del EM2, sin embargo se puede observar que la mayor diferencia se presenta entre el EM1 y el EM5.

Los valores del parámetro b^* en los cinco EM, mostraron una transición de color del amarillo-ámbar en el EM1, al amarillo-cobrizo en los EM2, EM3 y EM4 hasta obtener un color cobrizo oscuro en el EM5. Asimismo se observa que no existe una diferencia importante en los valores de este parámetro en los EM2, EM3 y EM4. El estudio de Solomon *et al.* (2006), muestra valores para b^* en el mismo rango en ambas etapas de madurez, permaneciendo menores en el fruto inmaduro.

En relación a la concentración del color (C^*), se observó que ésta fue mayor en los EM1, EM2, EM3, EM4 y menor en el EM5, donde la tendencia fue de 56.98 ± 6.31 en el EM1 hasta 41.67 ± 9.17 en el EM5. Inicialmente se presentó un aumento en progresivo en los valores de los EM1, EM2 y EM3, el cual declinó al llegar al EM4 y EM5. Solomon *et al.* (2006), reporta un ligero aumento en los valores del parámetro del fruto maduro respecto al fruto inmaduro. Finalmente, se observó que la materia prima analizada se caracteriza por tener un todo amarillo-verdoso el cual se torna amarillo-cobrizo al avanzar en su madurez; así lo refleja el descenso en los valores en h^* . Por ejemplo en el EM1 se obtuvieron valores de $h^* = 113.24 \pm 2.55$ mientras que los del EM5 fueron 88.98 ± 6.92 ; estos resultados son similares a los de Solomon *et al.* (2006), quien obtuvo valores de 103.00 ± 2.7 en el fruto inmaduro y 94.30 ± 4.70 en el maduro.

La Figura 16, muestra la comparación entre la caracterización realizada por Solomon *et al.* (2006) y la desarrollada en esta investigación. La clasificación de Solomon establece dos estados de madurez: inmaduro (I) y maduro (M); como se observa en la figura, el fruto se caracteriza por tener un color

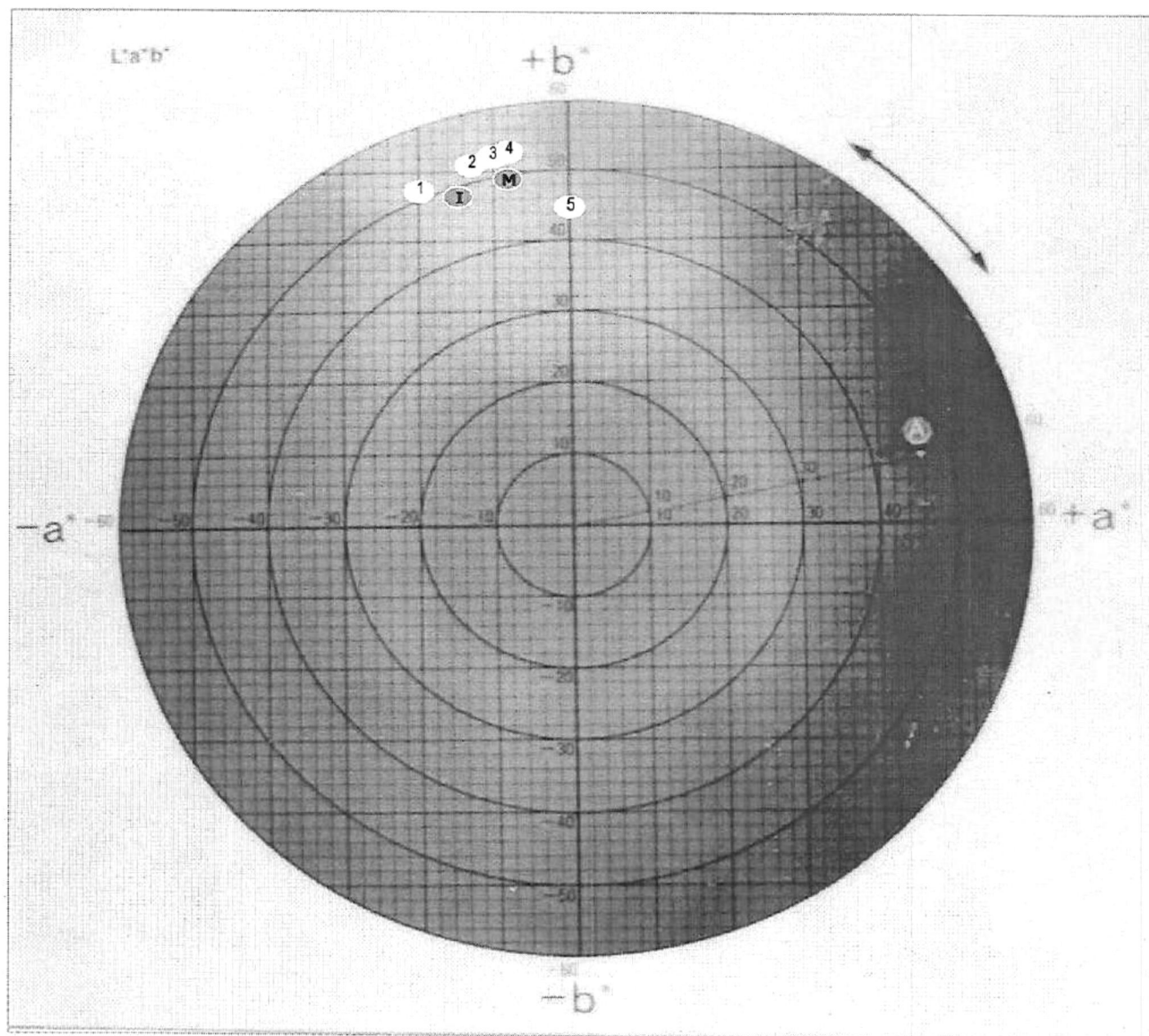


Figura 16. Representación de L^* , a^* , b^* , C y h en la esfera del color de los cinco EM (1=EM₁; 2=EM₂; 3=EM₃; 4=EM₄ 5=EM₅) y, del higo inmaduro (I) y maduro (M) reportado por Solomon *et al.* (2006).

amarillo-verdoso en el fruto inmaduro, el cual se torna amarillo-ámbar al madurar (M). Al observar la figura se puede observar que los valores en el EM1 se encuentran muy cercanos a los valores del fruto inmaduro (I), lo mismo sucede con los EM2, EM3, EM4, los cuales se encuentran muy próximos a los valores del fruto maduro (M). Respecto al EM5, el cual representa al fruto sobremaduro, se observa que se encuentra fuera del rango estimado por Solomon *et al.* (2006). De lo anterior se infiere, que el higo kadota cultivado en Caborca, presenta tres estados de madurez: inmaduro (EM1), madurez comercial (EM2, EM3, EM4) y sobremaduro (EM5). Respecto a la variación con los resultados de Solomon, ésta es atribuible a las diferencias en las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrollaron los cultivos, tipo de tratamiento poscosecha, cosecha, entre otros (Salunke *et al.*, 1995; Chessa, 1997). Por otra parte, se puede observar que la variedad analizada en este estudio muestra claramente tres cambios de tonalidad que va de verde a amarillo-dorado hasta llegar a amarillo-cobrizo.

El análisis de los parámetros de color de la materia prima permitió reclasificar las categorías de los EM, reduciendo el número de 5 a 3; donde: el fruto inmaduro corresponde al EM1 y se caracteriza por tener un color verde y piel firme, el EM2 corresponde al fruto con madurez comercial, el cual presenta un color amarillo-dorado y presenta menor firmeza en la piel que el EM1 y; al EM3 corresponde el fruto con sobremadurez, piel colapsada y de color amarillo-cobrizo.

b) Sólidos Solubles Totales (SST)

La concentración de SST aumentó en función al EM, por ejemplo el EM1 presentó una concentración de 14.44 ± 0.06 mientras que en el EM5 se obtuvo 45.36 ± 0.23 ; tal y como se observa en el Cuadro 12. Por otra parte, se ha reportado que los higos frescos con madurez comercial contienen del 19% al 25% de SST (Desai y Kotecha, 1995; Salunke y Kadam, 1995), por tanto se puede inferir que la concentración de SST en los EM2, EM3 y EM4 corresponde a la fase de madurez comercial. Por su parte, Chessa (1997), revela que durante

la fase final de maduración del higo la concentración de azúcares en el higo alcanza el 90%; en este estudio el EM5 presentó la mayor concentración de SST, sin embargo la diferencia entre el EM1 y el EM5 se mantuvo alrededor del 30 a 35%.

c) pH y Acidez Títulable

Los resultados del análisis del pH en cada EM, mostraron valores muy cercanos al neutro (7.0). Se considera que el rango de acidez higos frescos con madurez comercial, varía del 16% al 27% (Salunke y Dessai, 1997), por lo que se infiere que los EM2, EM3 y EM4 se encuentran en estado de madurez comercial. El EM1 presentó valores menores al 16% y el EM5 superiores al 27%, se trata de fruto inmaduro y sobremaduro respectivamente.

d) Contenido de Humedad y Fibra Dietaria

El higo fresco presentó un contenido inicial de humedad del $78.52 \pm 2.2\%/100\text{ g}$ (en base húmeda: *w/m*), este resultado se encuentra dentro del rango reportado por Souci *et al.* (1989/90) quien determinó un contenido de humedad inicial del 78% al 83.5% en higos; de igual forma coincide con lo reportado por Desai y Kotecha (1995), quienes reportaron un contenido de humedad inicial del 66.8% al 79.6% en la variedad Mission, Calimyrna y Kadota. Así mismo, el resultado de este estudio es muy próximo al reportado por Vinson (1999) y Vinson *et al.* (2005), quienes reportan un contenido de humedad del $83 \pm 1\%$ en las variedades Calimyrna y Mission, cosechadas en California, Estados Unidos.

En el análisis del contenido de fibra del higo fresco del EM1, se obtuvo un 3.047% de fibra dietaria total (FDT), de cual 2.96% era del tipo insoluble (FDI) y 0.087% del tipo soluble (FDS). Respecto al EM4, se obtuvo 9.44% de FDT del cual 5.19% FDI y 4.25% FDS, estos contenidos son mayores a los reportados por Vinson *et al.* (2005), quienes obtuvieron un contenido de FDT del 2.9% en higos frescos maduros. Esta diferencia podría atribuirse a la diferencia de condiciones bajo las cuales se desarrolló el cultivo. Por otra parte, como se

puede observar el contenido el contenido de FDI es mayor al contenido de FDS tanto en el fruto inmaduro como en maduro, esta característica favorece a la conservación del nutriente durante el proceso de deshidratación, puesto que al eliminar el agua de la fruta la FDS también es eliminada, debido a su solubilidad con el agua.

2) Proceso de deshidratación

A continuación, se describe el efecto de los factores en cada una de las operaciones del proceso de deshidratación del higo.

a) Escaldado

En la Figura 17, se puede apreciar la apariencia que adquirió el higo, después de concluida la operación de escaldado. Como se puede apreciar, el fruto escaldado con bisulfito (A), conservó un poco mejor el color verde, en comparación con el fruto escaldado con ácido ascórbico (B) el cual presentó un color predominante amarillo-dorado (los parámetros L^* , a^* , b^* , C y $^{\circ}h$ no fueron determinados en esta operación). La pérdida de color verde en los frutos tratados con ácido ascórbico podría estar relacionado con la pérdida de este aditivo durante el proceso, puesto que se han reportado pérdidas del 40% al 45% durante los primeros minutos de la operación al utilizar combinación de periodos prolongados de tiempo (mayores a 3 min) y temperaturas altas iguales o superiores a 80°C (Castro *et al.* 2008).

El análisis de los datos, relacionados con la desviación de la temperatura durante la inmersión del higo en el agua caliente, mostró que existe un descenso de la temperatura de $2 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$. Por tanto, para contrarrestar el posible efecto de esta desviación en el tiempo total de la operación del experimental final, se determinó aumentar la temperatura en $1 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ y así lograr la estabilidad de las condiciones de la operación.

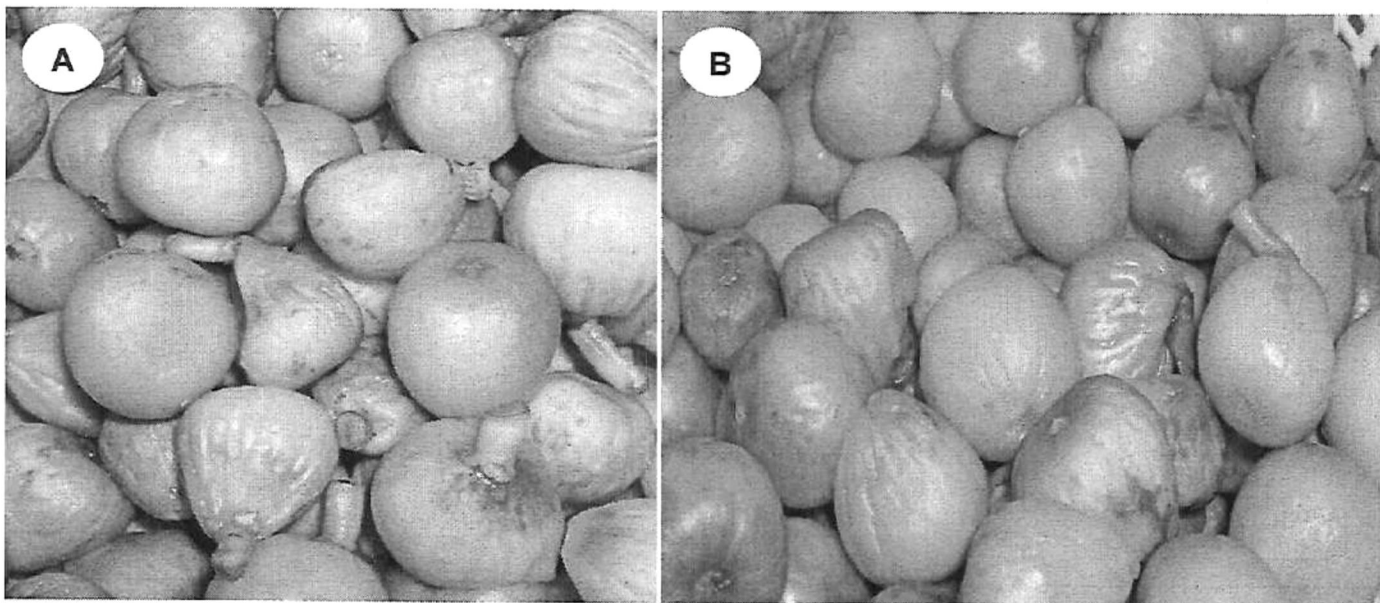


Figura 17. Efecto del Bisulfito de Sodio(A) y del ácido Ascórbico (B) en el higo escaldado

b) Reducción del Tamaño de Partícula

Los tamaños de partícula seleccionados ($0.457\pm0.2\text{ cm}$ y $1.320\pm0.2\text{ cm}$) ocasionaron en los 8 tratamientos iniciales, que el higo deshidratado se compactara en forma de pasta, adquiriendo una textura pegajosa y un color predominantemente café oscuro, como se puede observar en la Figura 18 inciso A. La textura pegajosa en el higo deshidratado podría estar relacionada con la concentración de azúcar (EM utilizado presentó una concentración de $45.36\pm0.23\%$) puesto que se ha reportado aumentos de hasta el 90% en higos maduros (Crane, 1986); este efecto en combinación con el tamaño de partícula seleccionado, ocasionaron una fuerte adhesión entre las partículas del fruto y a su vez con la charola de secado, lo cual no permitió llevar a cabo la segunda reducción del tamaño de partícula para obtener el polvo de higo. En relación al tamaño de partícula de frutas con estado de madurez avanzado, Montoya-Ballesteros (1991), recomienda utilizar tamaños grandes de partícula durante el procesamiento, con el propósito de facilitar su manejo, disminuir el endurecimiento superficial, conservar el color, entre otros. Por lo tanto se aumentó el tamaño de partícula a $1.347\pm0.2\text{ cm}$ y $2.108\pm0.2\text{ cm}$ respectivamente, y se continuó con el desarrollo de los 8 tratamientos restantes.

Como se puede observar en la Figura 18, inciso B, el uso de los tamaños modificados generó mejores resultados. La eliminación del contenido de humedad fue más rápida y se logró conservar mejor el color, estos resultados son consistentes con los obtenidos en otros estudios de deshidratación en rebanadas delgadas de frutas como: damascos (Pala *et al.* 1996), plátanos (Dandamrongrak *et al.* 2003), duraznos (Kingsly *et al.* 2007) entre otras.

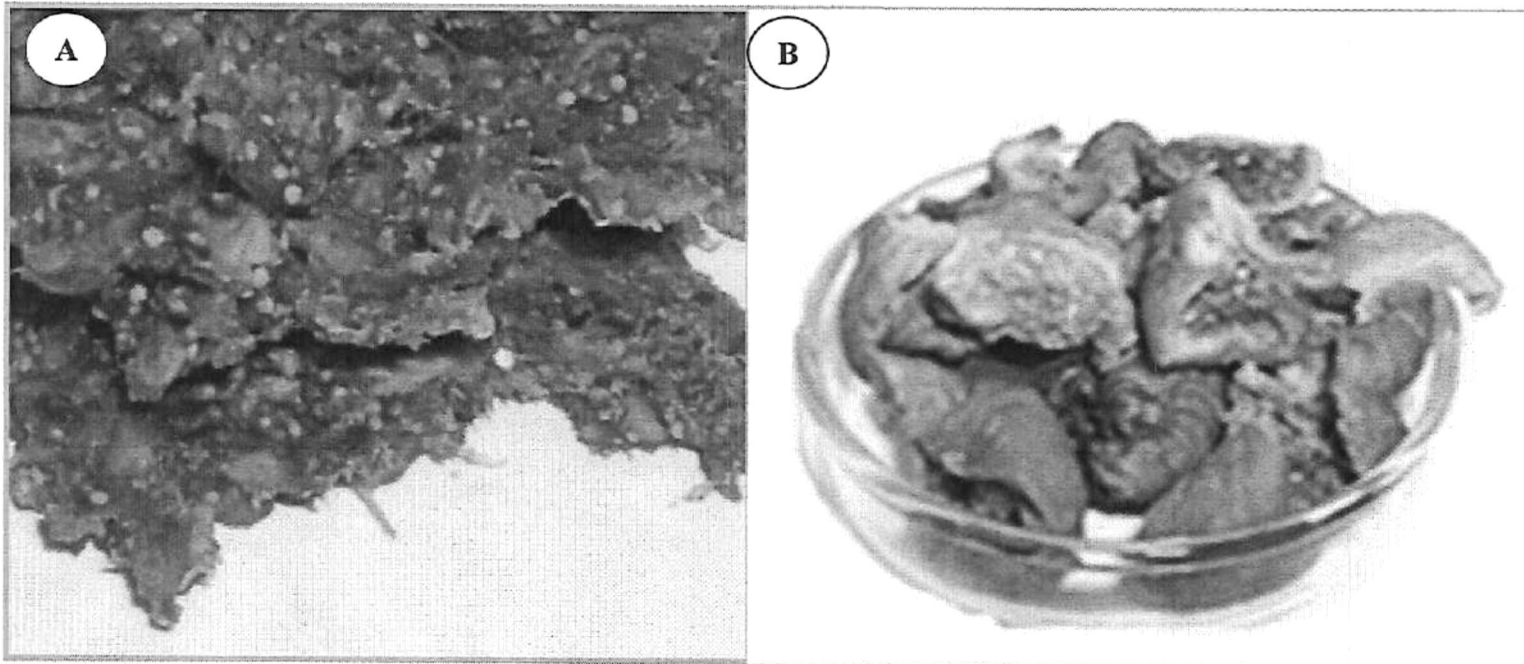


Figura 18: Higo deshidratado utilizando un tamaño de partícula de: A) $0.457\pm0.2\text{ cm}$ y $1.320\pm0.2\text{ cm}$ y B) $1.347\pm0.2\text{ cm}$ y $2.108\pm0.2\text{ cm}$.

c) Deshidratación con Aire Caliente

A continuación se describe el efecto de las operaciones del proceso de deshidratación sobre las características de calidad.

CTC.- El cuadro 14, muestra el efecto de los factores de control sobre los parámetros de color L^* , a^* , b^* , C^* y $^{\circ}h$ y la variable de respuesta de CTC; en la parte inferior del cuadro se muestra una comparación de promedios generales entre los efectos de los tratamientos desarrollados con bisulfito de sodio, ácido ascórbico, los desarrollados, en relación a los valores de los parámetros de la materia prima (EM5).

Los valores de L^* (claridad o luminosidad) del higo deshidratado, que se conservaron más cercanos a los valores del fruto fresco, fueron los obtenidos en los tratamientos escaldados sin aditivo donde se obtuvo un promedio general del 64.66 ± 4.75 a diferencia de los tratamientos escaldados con ácido ascórbico en los cuales la claridad disminuyó a 52.64 ± 16.66 . El parámetro L^* es considerado como buen indicador de la degradación del color en los procesos térmicos (Rodrigo *et al.* 1991), por lo tanto se puede inferir que las condiciones definidas en los factores B, C, D, E, F y G del proceso favorecen a la calidad del higo deshidratado.

Los valores del parámetro a^* del higo, se conservaron mejor en los tratamientos escaldados sin aditivo (2.13 ± 2.35) y en los escaldados con bisulfito de sodio (3.47 ± 2.58) en comparación con los resultados obtenidos en los escaldados con ácido ascórbico se obtuvo un (3.53 ± 3.07). Se ha demostrado que el incremento en de los valores del parámetro de color a^* , en las frutas y vegetales deshidratados, está relacionado con el aumento del ácido ascórbico durante el desarrollo del proceso, esto ocurre al unirse el ácido ascórbico contenido de forma natural con el agregado (Esparza-Rivera *et al.* 2006). Por tanto se infiere, que el aumento en los valores del parámetro a^* , en el color del higo deshidratado es atribuible a la reacción derivada de la adición del ácido ascórbico contenido

Cuadro 14. Resultados del AO L₁₀ del efecto de los factores controlables en los parámetros de color L*, a*, b*, C*, h* y el Cambio Total de Color (CTC) del higo deshidratado (Media ± Desviación estándar).

Exp. No	Concentración y tipo de Aditivo (%)	Temperatura de Escaldado °C	Tiempo de Escaldado (min)	Uniformidad del proceso inmersión (rpm)	Tamaño de partícula (cm)	Temperatura de Secado (°C)	Tiempo de Secado (h)	L*	a*	b*	C*	h*	CTC
1	Bisulfito de Sodio 0.15	80	5	15	1.346±0.2	50	24	41.72 ± 2.42	5.60 ± 0.51	38.76 ± 0.90	39.16 ± 0.95	81.87 ± 0.57	22.42
2	Bisulfito de Sodio 0.15	90	15	45	0.457±0.2	60	36	59.36 ± 0.17	4.39 ± 0.27	27.23 ± 0.28	27.58 ± 0.31	80.90 ± 0.46	15.56
3	Bisulfito de Sodio 0.30	80	5	15	1.346±0.2	60	36	68.56 ± 0.08	1.46 ± 0.17	33.05 ± 0.43	33.08 ± 0.42	87.53 ± 0.32	10.28
4	Bisulfito de Sodio 0.30	90	15	45	0.457±0.2	50	24	41.19 ± 2.54	5.88 ± 0.77	38.28 ± 2.65	38.73 ± 2.68	81.33 ± 0.90	23.07
5	Bisulfito de Sodio 0.45	80	5	45	0.457±0.2	50	24	41.68 ± 1.40	5.98 ± 0.66	37.62 ± 2.70	38.09 ± 2.61	81.00 ± 1.47	22.83
6	Bisulfito de Sodio 0.45	90	15	15	1.346±0.2	60	36	71.15 ± 0.85	-0.11 ± 0.45	32.52 ± 0.68	32.52 ± 0.68	90.20 ± 0.70	12.06
7	Bisulfito de Sodio 0.75	80	5	45	0.457±0.2	60	36	69.91 ± 0.37	1.09 ± 0.07	32.17 ± 0.24	32.18 ± 0.25	88.13 ± 0.12	11.68
8	A. Ascórbico 0.75	90	15	15	1.346±0.2	50	24	41.18 ± 3.14	5.23 ± 0.22	35.05 ± 1.65	35.43 ± 1.61	81.57 ± 0.72	23.56
9	A. Ascórbico 0.15	80	15	15	1.346±0.3	50	36	40.14 ± 1.82	5.66 ± 0.60	32.97 ± 2.04	33.45 ± 2.10	80.33 ± 0.50	25.26
10	A. Ascórbico 0.15	90	5	45	1.347±0.2	60	24	69.81 ± 1.35	0.55 ± 0.45	29.71 ± 0.37	29.71 ± 0.37	89.00 ± 0.85	13.60
11	A. Ascórbico 0.30	80	15	15	2.108±0.2	60	24	69.83 ± 0.96	0.05 ± 0.62	30.43 ± 0.29	30.43 ± 0.29	89.93 ± 1.05	12.95
12	A. Ascórbico 0.30	90	5	45	1.347±0.2	55	36	37.76 ± 0.91	6.44 ± 0.32	32.39 ± 1.55	33.03 ± 1.47	78.83 ± 1.00	27.81
13	A. Ascórbico 0.45	80	15	45	1.347±0.2	55	36	38.20 ± 5.69	6.51 ± 0.70	33.54 ± 2.70	34.17 ± 2.60	79.00 ± 1.73	27.07
14	A. Ascórbico 0.45	90	5	15	2.108±0.2	60	24	71.55 ± 2.09	0.26 ± 0.48	31.71 ± 0.82	31.71 ± 0.82	89.57 ± 0.80	12.96
15	Control 0.00	80	15	45	1.347±0.2	60	24	61.30 ± 0.68	3.79 ± 0.25	27.80 ± 1.10	28.05 ± 1.12	82.33 ± 0.25	14.49
16	Control 0.00	90	5	15	2.108±0.2	55	36	68.02 ± 1.27	0.47 ± 0.39	27.73 ± 0.75	27.73 ± 0.75	89.07 ± 0.75	14.63
Materia Prima								63.04 ± 5.22	-0.83 ± 5.36	41.42 ± 9.01	41.67 ± 9.17	88.98 ± 6.92	—
Bisulfito de Sodio (Na ₂ S ₂ O ₃)								55.21 ± 14.28	3.47 ± 2.58	34.23 ± 4.20	34.48 ± 4.31	84.42 ± 4.02	16.84
A. Ascórbico (C ₆ H ₈ O ₆)								52.64 ± 16.66	3.53 ± 3.07	32.26 ± 1.83	32.56 ± 2.05	84.03 ± 5.20	20.46
Sin Aditivo								64.66 ± 4.75	2.13 ± 2.35	27.76 ± 0.05	27.89 ± 0.23	85.70 ± 4.76	14.56

en la fruta de forma natural (según Souci *et al.* 1990, el higo fresco contiene alrededor de 8.8 mg) y la concentración utilizada como aditivo. El color amarillo-dorado del higo, representado por los valores de b^* (amarillo-azul), obtuvo valores más cercanos al fruto en fresco, en los tratamientos escaldados con bisulfito de sodio $b^*=34.23\pm4.20$; mientras que los escaldados sin aditivo presentaron mayor degradación $b^*=27.76\pm0.05$. Lo anterior es consistente con lo reportado por Kim y Cho (1998), quienes reportan mayor efectividad en la conservación de los valores de b^* , en comparación con los resultados obtenidos al no agregar aditivos e incluso al utilizar ácido ascórbico.

La saturación del color (en este caso adquirió un amarillo-cobrizo) representada por los valores de C^* , fue mayor en los tratamientos escaldados con bisulfito de sodio $C^*=34.48\pm4.31$, y menor en los tratamientos escaldados sin aditivo $C^*=27.89\pm0.23$. Por otra parte, los valores del ángulo de color (h^*), muestran que los tratamientos escaldados si aditivo $h^*=85.70\pm4.76$ son más próximos a los valores en la materia prima $h^*=88.98\pm6.92$, mientras que los escaldados con ácido ascórbico y bisulfito de sodio presentan valores similares entre si, pero menores a los de la materia prima. Las causas de las reacciones en C^* y h^* no fueron determinadas en esta investigación.

Finalmente, el menor CTC se obtuvo en los tratamientos escaldados sin aditivo y en los tratamientos escaldados con bisulfito de sodio, donde se obtuvieron promedios generales de 14.56 y 16.84 respectivamente. Los tratamientos escaldados con ácido ascórbico presentaron mayor CTC con un promedio general de 20.46.

El Cuadro 15, muestra la comparación del efecto en los parámetros L^* , a^* , b^* , C^* y h^* en la piel del higo deshidratado en esta investigación, con los resultados obtenidos por Piga *et al.* (2004) en la deshidratación con aire caliente de higo entero cultivado en Turquía.

Cuadro 15. Evolución del color en los parámetros L^* , a^* , b^* , C^* , h^* y cambio total de color (CTC) en la piel del higo durante el proceso de deshidratación (media $\pm$ desviación estándar)

	L^*	a^*	b^*	C^*	h^*	CTC
Materia Prima	63.04 $\pm$ 5.22	-0.83 $\pm$ 5.36	41.42 $\pm$ 9.01	41.67 $\pm$ 9.17	88.98 $\pm$ 6.92	—
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.15% - 24h	41.72 $\pm$ 2.42	5.60 $\pm$ 0.51	38.76 $\pm$ 0.90	39.16 $\pm$ 0.95	81.87 $\pm$ 0.57	22.42
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.30% - 24h	41.19 $\pm$ 2.54	5.88 $\pm$ 0.77	38.28 $\pm$ 2.65	38.73 $\pm$ 2.68	81.33 $\pm$ 0.90	23.07
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.45% - 24h	41.58 $\pm$ 1.40	5.98 $\pm$ 0.66	37.62 $\pm$ 2.70	38.09 $\pm$ 2.61	81.00 $\pm$ 1.47	22.83
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.75% - 24h	41.18 $\pm$ 3.14	5.23 $\pm$ 0.22	35.05 $\pm$ 1.66	35.43 $\pm$ 1.61	81.57 $\pm$ 0.72	23.56
Sin Aditivo 24h	61.30 $\pm$ 0.68	3.79 $\pm$ 0.25	27.80 $\pm$ 1.10	28.05 $\pm$ 1.12	82.33 $\pm$ 0.25	14.49
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.15% - 36h	59.36 $\pm$ 0.17	4.39 $\pm$ 0.27	27.23 $\pm$ 0.28	27.58 $\pm$ 0.31	80.90 $\pm$ 0.46	15.56
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.30% - 36h	68.56 $\pm$ 0.08	1.46 $\pm$ 0.17	33.05 $\pm$ 0.43	33.08 $\pm$ 0.42	87.53 $\pm$ 0.32	10.28
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.45% - 36h	71.15 $\pm$ 0.85	-0.11 $\pm$ 0.45	32.52 $\pm$ 0.68	32.52 $\pm$ 0.68	90.20 $\pm$ 0.70	12.06
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.75% - 36h	69.91 $\pm$ 0.37	1.09 $\pm$ 0.07	32.17 $\pm$ 0.24	32.18 $\pm$ 0.25	88.13 $\pm$ 0.12	11.68
Sin Aditivo 36h	68.02 $\pm$ 1.27	0.47 $\pm$ 0.39	27.73 $\pm$ 0.75	27.73 $\pm$ 0.76	89.07 $\pm$ 0.75	14.63
Piga et al. (2004)						
	L^*	a^*	b^*	h^*	CTC	
Materia Prima	62.15	-21.76	49.85	113.68	—	
Bisulfito de Sodio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 3% a 23h	55.55	-4.83	54.76	94.95	18.82	
Sin Aditivo 23h	52.33	-15.53	43.18	109.68	13.41	
Bisulfito de Sodio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 3% a 30h	52.70	-3.08	49.57	93.26	20.94	
Sin Aditivo 30h	49.20	-12.41	39.89	107.11	18.82	

Los valores de L^* del higo deshidratado en este estudio tienden a decrecer en los tratamientos escaldados con bisulfito, y permanecen más cercanos al los del fruto fresco en los escaldados sin aditivos; estos resultados no coinciden con los reportados Piga *et al.* (2004), lo cual podría estar relacionado con las diferencias en los tamaños de partícula utilizados en ambas investigaciones.

La tendencia en los valores de a^* , generados en este estudio es similar al reportado por Piga *et al.* (2004). Los tratamientos escaldados sin aditivo, presentaron valores más cercanos a los del fruto en fresco, mientras que los escaldados con bisulfito fueron menores. Lo anterior indica la eficiencia de los tratamientos escaldados sin aditivo en la disminución de la degradación de éste parámetro, en ambos estudios.

Los valores de b^* obtenidos en los tratamientos escaldados con bisulfito de sodio son consistentes en ambos estudios, es decir, la degradación del parámetro es menor al utilizar bisulfito durante el escaldado.

En relación al ángulo h^* , se observó que un aumento en la concentración del aditivo ocasiona una disminución en el valor de h^* ; reacción que no se presenta en los tratamientos escaldados sin aditivo. Este resultado es consistente con lo reportado por Latapi y Barrett (2006).

Respecto al CTC, se observó que los tratamientos escaldados sin aditivo con 24 h de secado se obtuvo menor CTC; lo cual coincide con lo reportado por Piga *et al.* (2004). Por otra parte, los tratamientos escaldados con bisulfito y 36 h de secado presentaron menor CTC que los escaldados sin aditivo, lo cual podría estar relacionado con el incremento del tiempo de secado y por consiguiente de la exposición de la fruta al calor.

Contenido Final de Humedad.- Las condiciones de los tratamientos 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16 permitieron una reducción considerable del contenido de humedad del fruto, de $78.52 \pm 2.2\%$ hasta un $6.26 \pm 1.13\%$ (promedio general), como se puede observar en el Cuadro 16. Asimismo, se presentó poca diferencia del contenido final de humedad entre los tratamientos con 24 h de secado y los de 36 h. Estos resultados son menores a los obtenidos en estudios similares; por ejemplo, Papoff *et al.* (1998) obtuvo 12% en higos deshidratados en un tiempo de 17 h, sin embargo en este estudio se emplearon higos enteros y de una variedad distinta ("neyda longa"). Piga *et al.* (2004), reporta un contenido final de humedad en higos enteros de 2.51% en un proceso de 57 h asimismo, Xanthopoulos *et al.* (2007) reporta un contenido de humedad en higo enteros (variedad "tsapela") menor al 30% en un tiempo de secado de 23 a 53.3 h. Por lo tanto, la eliminación del contenido de humedad en higos enteros es menor a la eliminación en higos con tamaño de partícula menor, lo cual es consistente con lo expuesto por Fellows (2000), quien establece que a menor tamaño de partícula mayor eliminación de humedad.

3) Análisis de Datos

El análisis del efecto de los factores de control se realizó considerando los resultados de las mediciones del CTC. El Cuadro 17, muestra los resultados del análisis de SN de las mediciones del CTC del higo deshidratado (generadas por el programa "MINITAB 14") donde el criterio de optimización utilizado fue "Lo menor es lo mejor", puesto que se desea obtener el menor CTC en el producto final. Como se puede observar, la combinación de factores del experimento 3 produjo la mayor SN (-19.86) y por consiguiente el menor CTC (9.83 ± 0.38); mientras que la combinación de factores del experimento 12 produjo la menor SN (-28.85) y el mayor CTC (27.70 ± 0.72).

Cuadro16. Resultados del efecto de los factores controlables en el contenido final de humedad de los tratamientos 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16. (media $\pm$ desviación estándar)

Exp. No.	Concentración y tipo de Aditivo (%)		Temperatura de Escaldado $^{\circ}\text{C}$	Tiempo de Escaldado (min)	Uniformidad del proceso inmersión (rpm)	Tamaño de partícula (cm)	Temperatura de Secado $^{\circ}\text{C}$	Tiempo de Secado(h)	% Contenido Final de Humedad (base húmeda)	% Contenido de humedad Promedio (media general)
10	A.Ascórbico	0.15	90	5	45	1.347 ± 0.2	60	24	5.46 ± 2.74	6.26 ± 1.13
11	A.Ascórbico	0.30	80	15	15	2.108 ± 0.2	60	24	7.84 ± 1.66	
12	A.Ascórbico	0.30	90	5	45	1.347 ± 0.2	55	36	4.74 ± 1.20	
13	A.Ascórbico	0.45	80	15	45	1.347 ± 0.2	55	36	6.21 ± 0.67	
14	A.Ascórbico	0.45	90	5	15	2.108 ± 0.2	60	24	7.63 ± 4.63	
15	Control	0.00	80	15	45	1.347 ± 0.2	60	24	6.22 ± 1.75	
16	Control	0.00	90	5	15	2.108 ± 0.2	55	36	5.73 ± 0.31	

Cuadro17. Resultados del AO $L_{16}(8 \times 1 \times 2 \times 6)$ del efecto sobre el CTC en el higo deshidratado y la SN_S generada.

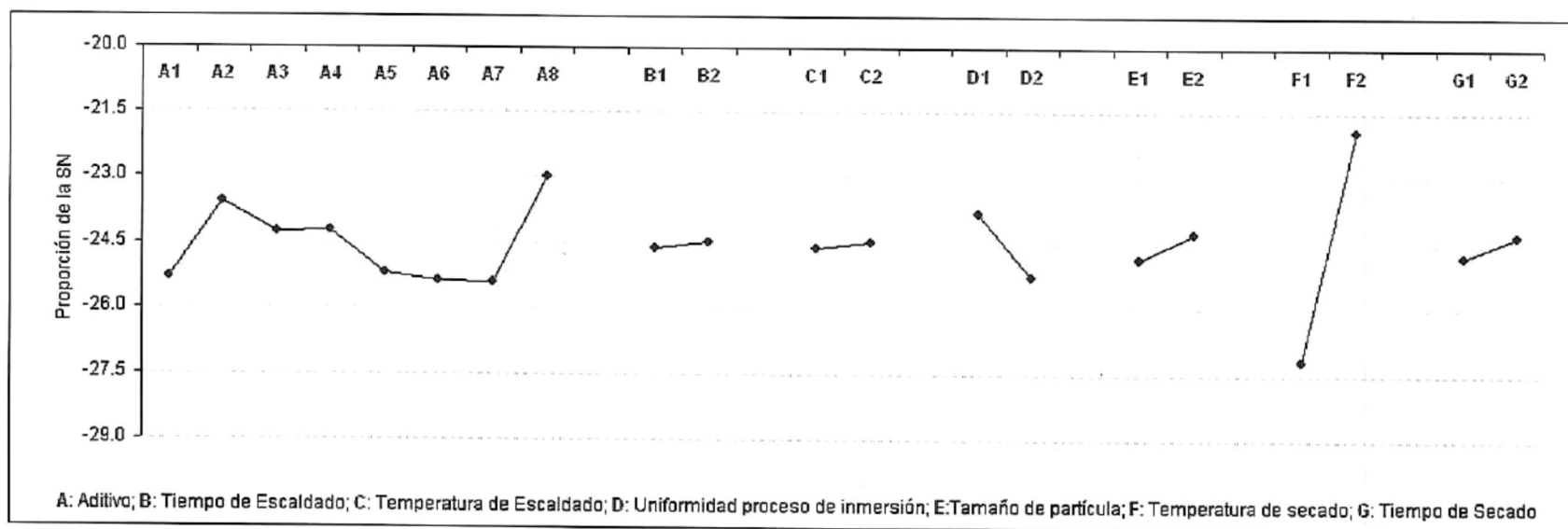
Exp. No.	FACTORES	CTC			Media	Desv. Estándar	SN_S ("Lo Menor es lo mejor")
		R1	R2	R3			
1	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁ F ₁ G ₁	20.42	24.89	21.94	22.42	2.27	-27.04
2	A ₁ B ₂ C ₂ D ₂ E ₂ F ₂ G ₂	15.21	14.91	15.13	15.08	0.16	-23.57
3	A ₂ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁ F ₂ G ₂	10.04	10.06	9.39	9.83	0.38	-19.86
4	A ₂ B ₂ C ₂ D ₂ E ₂ F ₁ G ₁	25.64	22.82	21.00	23.15	2.34	-27.32
5	A ₃ B ₁ C ₁ D ₂ E ₂ F ₁ G ₁	24.78	22.73	21.08	22.86	1.85	-27.20
6	A ₃ B ₂ C ₂ D ₁ E ₁ F ₂ G ₂	12.66	11.68	10.64	11.66	1.01	-21.36
7	A ₄ B ₁ C ₁ D ₂ E ₂ F ₂ G ₂	11.63	11.23	10.86	11.24	0.39	-21.02
8	A ₄ B ₂ C ₂ D ₁ E ₁ F ₁ G ₁	25.86	19.63	24.91	23.47	3.36	-27.47
9	A ₅ B ₁ C ₂ D ₁ E ₂ F ₁ G ₂	26.48	25.00	24.11	25.20	1.20	-28.03
10	A ₅ B ₂ C ₁ D ₂ E ₁ F ₂ G ₁	12.46	12.89	14.17	13.17	0.89	-22.41
11	A ₅ B ₁ C ₂ D ₁ E ₂ F ₂ G ₁	12.83	12.33	12.40	12.52	0.27	-21.95
12	A ₅ B ₂ C ₁ D ₂ E ₁ F ₁ G ₂	26.98	28.42	27.71	27.70	0.72	-28.85
13	A ₇ B ₁ C ₂ D ₂ E ₁ F ₁ G ₂	24.68	22.46	33.84	26.99	6.03	-28.77
14	A ₇ B ₂ C ₁ D ₁ E ₂ F ₂ G ₁	13.20	14.12	10.44	12.59	1.92	-22.06
15	A ₈ B ₁ C ₂ D ₂ E ₁ F ₂ G ₁	14.84	12.97	14.66	14.16	1.03	-23.03
16	A ₈ B ₂ C ₁ D ₁ E ₂ F ₁ G ₂	14.05	13.04	14.93	14.01	0.95	-22.94

R1, R2 y R3 representan los resultados de las mediciones repetidas realizadas en el CTC

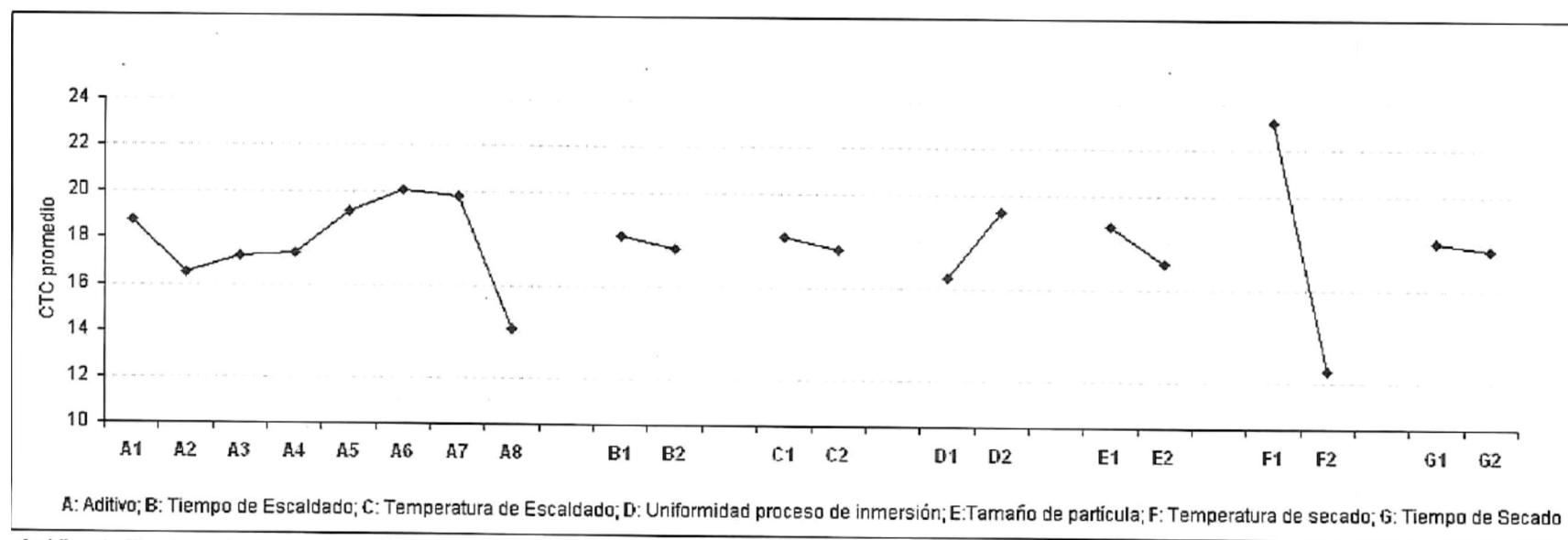
a) Gráfica de efectos principales. La Gráfica 1, muestra los efectos de los factores de estudio sobre la SN, adicionalmente la Gráfica 2, muestra el efecto de los factores sobre el CTC promedio (gráfica de medias). Los resultados muestran que la temperatura de secado (F) fue el factor de mayor influencia sobre la SN y por consiguiente sobre el CTC, seguido del tipo de aditivo (A) y la uniformidad en el proceso de inmersión (D). La gráfica muestra que la combinación óptima para obtener la mayor SN está dada por el nivel 2(60°C) del factor F (temperatura de secado), el nivel 8(escaldado sin aditivo) del factor A, el nivel 1(5 min) del factor D y, el nivel más económico del resto de los factores, debido a que estos factores no tienen un efecto significativo en la media y la variabilidad de la respuesta. Como se puede observar en la gráfica 2, los niveles de los factores seleccionados presentan el menor CTC.

b) Análisis Pareto-ANOVA. El análisis de Pareto es una herramienta estadística muy utilizada en el control de calidad en los procesos, su objetivo es identificar y diferenciar las verdaderas causas o factores que afectan un determinado problema, mediante la representación gráfica o tabular de los datos relacionados con dichos efectos, logrando establecer con ellos la contribución o incidencia en el problema global. Considerando estos principios, el análisis Pareto-ANOVA es un método sencillo y rápido que se utiliza para analizar los resultados del diseño paramétrico el cual no requiere desarrollar la tabla ANOVA completa, por lo tanto no utiliza la prueba del estadístico *F*. Este método proporciona el nivel de significancia de los factores y proporciona información suficiente para determinar la combinación óptima de niveles en los factores analizados (Park, 1996, Tasirin *et al.* 2007).

Para determinar la significancia de los factores sobre la variable de respuesta o característica de calidad, el análisis se realiza considerando los resultados de la SN. Primero se obtiene el efecto sobre la SN por cada nivel en los factores, posteriormente se estima la suma de la diferencia de cuadrados y finalmente se



Gráfica 1. Efectos principales de la SN ("Lo Menor es lo mejor") en cada uno de los factores del proceso de deshidratación del higo



Gráfica 2. Efectos principales de cada factor sobre CTC del higo deshidratado (medias).

obtiene la contribución porcentual de cada factor al dividir la diferencia de cuadrados entre los grados de libertad en cada uno de los factores (Park, 1996).

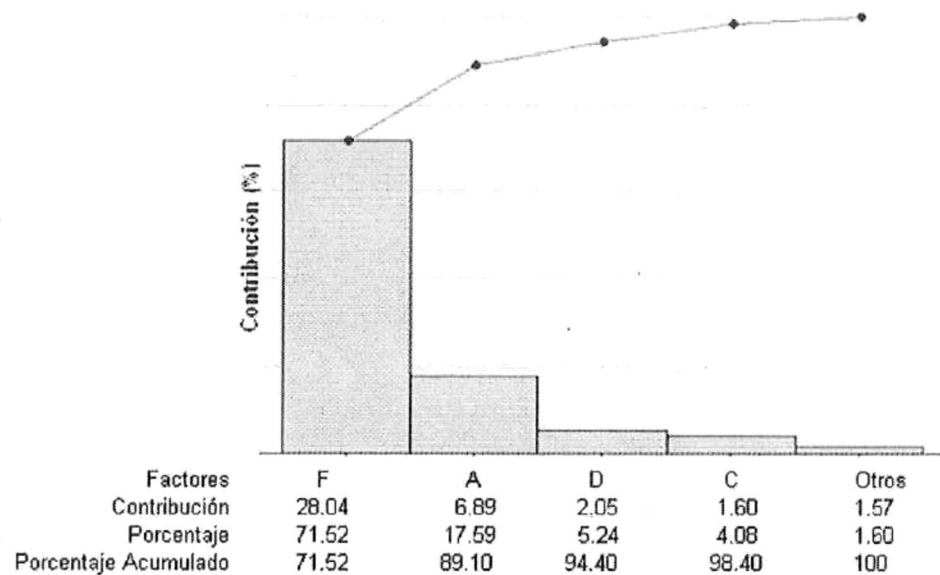
Con el propósito de comprobar los resultados obtenidos en el análisis de la SN de los factores estudiados en el proceso de deshidratación, se realizó el análisis Pareto-ANOVA, el Cuadro 18 muestra los resultados obtenidos. Como se puede observar el factor F es el que mayor efecto tiene sobre el CTC es F con un 71.52%, seguido del factor A con 17.59%, D con 5.24%, C con 4.08 y, el resto de los factores contribuyen con el 1.6%. Por lo tanto, la combinación óptima de factores generada por el análisis Pareto-ANOVA fue $A_8B_5C_5D_1E_5F_2G_5$; esta combinación coincide con la obtenida en el análisis de la SN.

c) Análisis de Varianza. El propósito del análisis de varianza (ANOVA) es investigar cual(es) de los factores estudiados afectan a la característica de calidad, la idea general es separar la contribución de cada fuente de variación (factores estudiados) en la variación total observada. Cuando la variabilidad de los tratamientos predomina sobre la variabilidad del error, se concluye que los factores tienen efecto (Gutiérrez y De la Vara, 2005).

Con el propósito de identificar cuales de los factores estudiados durante el proceso de deshidratación afectan la calidad del CTC, y verificar con ello los resultados obtenidos en el análisis de la SN y en el análisis Pareto-ANOVA, se realizó un ANOVA. La tabla ANOVA se generó utilizando el programa "MINITAB", con base en los resultados de las mediciones del CTC para un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, el Cuadro 19 muestra los resultados obtenidos. Como se puede observar, el valor de *p-value* del factor F (0.023) es menor que el nivel de significancia, por lo tanto se infiere que este factor presenta un efecto significativo sobre el CTC del higo deshidratado, esto coincide con el análisis de la SN. Respecto a los factores A, D y C, se puede observar que la suma de cuadrados es mayor al resto de los factores, esto indica que posiblemente la variación entre tratamientos y/o la variación dentro de los tratamientos es grande

Cuadro 18. Análisis Pareto-ANOVA para el Cambio Total de Color del higo deshidratado

FACTORES		A	B	C	D	E	F	G
Suma a nivel de factores	1	-25.31	-24.61	-23.92	-23.84	-24.85	-27.20	-24.81
	2	-23.59	-24.50	-25.19	-25.27	-24.26	-21.91	-24.30
	3	-24.28						
	4	-24.24						
	5	-25.22						
	6	-25.40						
	7	-25.42						
	8	-22.99						
Suma de la Diferencia de Cuadrados (S)		48.27	0.01	1.60	2.05	0.34	28.04	0.26
Grados de Libertad (D)		7	1	1	1	1	1	1
Contribución (S/D)		6.89564	0.0134	1.60115	2.053	0.3419	28.0447	0.26252
Contribución $S_{ij}/S_T(\%)$		17.59	0.03	4.08	5.24	0.87	71.52	0.67



Combinación óptima $A_1B_3C_3D_1E_3F_2G_3$

Factores: A: Aditivo; C: Temperatura de Escaldado; D: Uniformidad proceso de inmersión; F: Temperatura de secado

Cuadro 19. Resultados del ANOVA para el Cambio Total de Color ($\alpha=0.05$)

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados <i>Ajustados</i>	Cuadrados Medios <i>Ajustados</i>	F	P-value	Significancia
A	7	56.15	8.02	0.73	0.685	—
B	1	1.20	1.20	0.11	0.772	—
C	1	21.28	21.28	1.93	0.299	—
D	1	32.06	32.06	2.92	0.230	—
E	1	10.16	10.16	0.93	0.438	—
F	1	457.43	457.43	41.67	0.023	*
G	1	0.43	0.43	0.04	0.861	—
Error	2	21.95	10.98			
Total	15	600.57				

* $P < 0.05$

por lo tanto se considero oportuno considerar el efecto de dichos factores como significantes.

4) Modelo de Predicción

Para obtener el modelo de predicción que minimice el CTC del higo deshidratado, se seleccionó la siguiente combinación óptima de niveles: A₈ B₁ C₁ D₁ E₂ F₂ E₁. La combinación seleccionada no coincide con ninguna de las 16 combinaciones desarrolladas en el estudio preliminar.

Para establecer el modelo de predicción, se utiliza la siguiente formula (Phadke, 1989):

$$Y_{opt} = m + (m_{Ai} - m) + (m_{Bj} - m) +(m_{Nn} - m)$$

$$m = \frac{T}{n}$$

Donde:

m= Representa el promedio total del CTC de todas las observaciones

T= Representa el gran total de la suma del CTC

n= Representa el número de experimentos

m_{Ai...n}= Representa el nivel óptimo seleccionado en cada factor.

Al realizar la sustitución se obtuvo:

$$Y_{opt} = 17.88 + (14.08 - 17.88) + (18.15 - 17.88) + (16.73 - 17.88) + (16.46 - 17.88) \\ + (17.08 - 17.88) + (12.53 - 17.88) + (18.04 - 17.88)$$

$$Y_{opt} = 5.81$$

La SN correspondiente se obtuvo aplicando la misma formula, el resultado fue SN_S= -19.01.

Los resultados del experimental preliminar muestran que se puede minimizar el CTC en el proceso de deshidratación del higo con EM5, escaldando el higo sin aditivo a 5 rpm por 15 min, utilizando un tamaño de partícula de 2.08±0.2 cm, y secándolo a 60°C por 24 hr.

4.2 Etapa II: Experimental final para la deshidratación del higo

A continuación se describen los resultados obtenidos en la caracterización de la materia prima, en el proceso de deshidratación y en el análisis de las características de calidad, generados en el experimental final.

1) Materia Prima

a) Color

El Cuadro 20, muestra los resultados de la caracterización del higo utilizado en el estudio final (EM₁), asimismo presenta una comparación con el EM1 utilizado en el estudio preliminar (EM_{1P}) y con el higo inmaduro clasificado por Solomon *et al.* (2006). La Figura 18 muestra la representación grafica de los parámetros L^* , a^* , b^* , C^* y h de los tres grupos de datos en la esfera del color, con el propósito de facilitar el análisis visual de los mismos. En general, el fruto utilizado en el experimental preliminar se caracterizo por tener un color amarillo verdoso, mientras que el utilizado en el estudio final y el caracterizado por Solomon tienden más al color amarillo-ámbar. Esto puede ser atribuible al efecto del periodo de cosecha, puesto que la materia prima del experimental preliminar fue cosechada durante el verano cuando la intensidad de la luz solar es mayor y por consiguiente la producción de clorofila también se incrementa. Mientras que los frutos utilizados en el experimental final fueron cosechados en otoño, cuando la clorofila de las plantas se descompone y es ocupada por otros pigmentos, esta relación se ha descrito en estudios anteriores (Canjura *et al.*, 1991) para explicar la degradación del color verde en vegetales y frutas.

b) pH y Acidez Títulable, Sólidos Solubles Totales (SST)

La materia prima presentó un $\text{pH} = 5.74 \pm 0.025$ y una acidez Títulable = 0.1937 ± 0.112 . El pH obtenido es muy similar al reportado en el experimental preliminar, además la concentración de SST es menor a 16% (Salunke y Dessai, 1997), por lo que se infiere que el higo utilizado en el experimental final, está dentro de la clasificación del EM1.

Cuadro 20. Resultados de la Caracterización de la Materia Prima: propiedades Fisicoquímicas (Media $\pm$ Desviación estándar).

Experimental Final								
Estado de Madurez (EM)	L^*	a^*	Color b^*	C^*	η	Sólidos Solubles Totales (°Brix)	pH	Acidez Titulable
EM _I	62.21 $\pm$ 4.41	-16.16 $\pm$ 3.94	50.00 $\pm$ 5.70	52.71 $\pm$ 5.45	107.90 $\pm$ 5.01	15.46 $\pm$ 0.01	5.30 $\pm$ 0.020	0.3890 $\pm$ 0.247
Experimental preliminar								
EM _{IP}	68.41 $\pm$ 3.58	-21.66 $\pm$ 9.56	53.56 $\pm$ 7.41	56.98 $\pm$ 6.31	113.24 $\pm$ 2.55	14.44 $\pm$ 0.06	5.74 $\pm$ 0.025	0.1937 $\pm$ 0.112
Solomon <i>et al.</i> (2006)								
Kadota Inmaduro (I)	67.60 $\pm$ 7.20	-10.10 $\pm$ 1.70	45.20 $\pm$ 5.30	46.10 $\pm$ 2.20	103.00 $\pm$ 2.70			

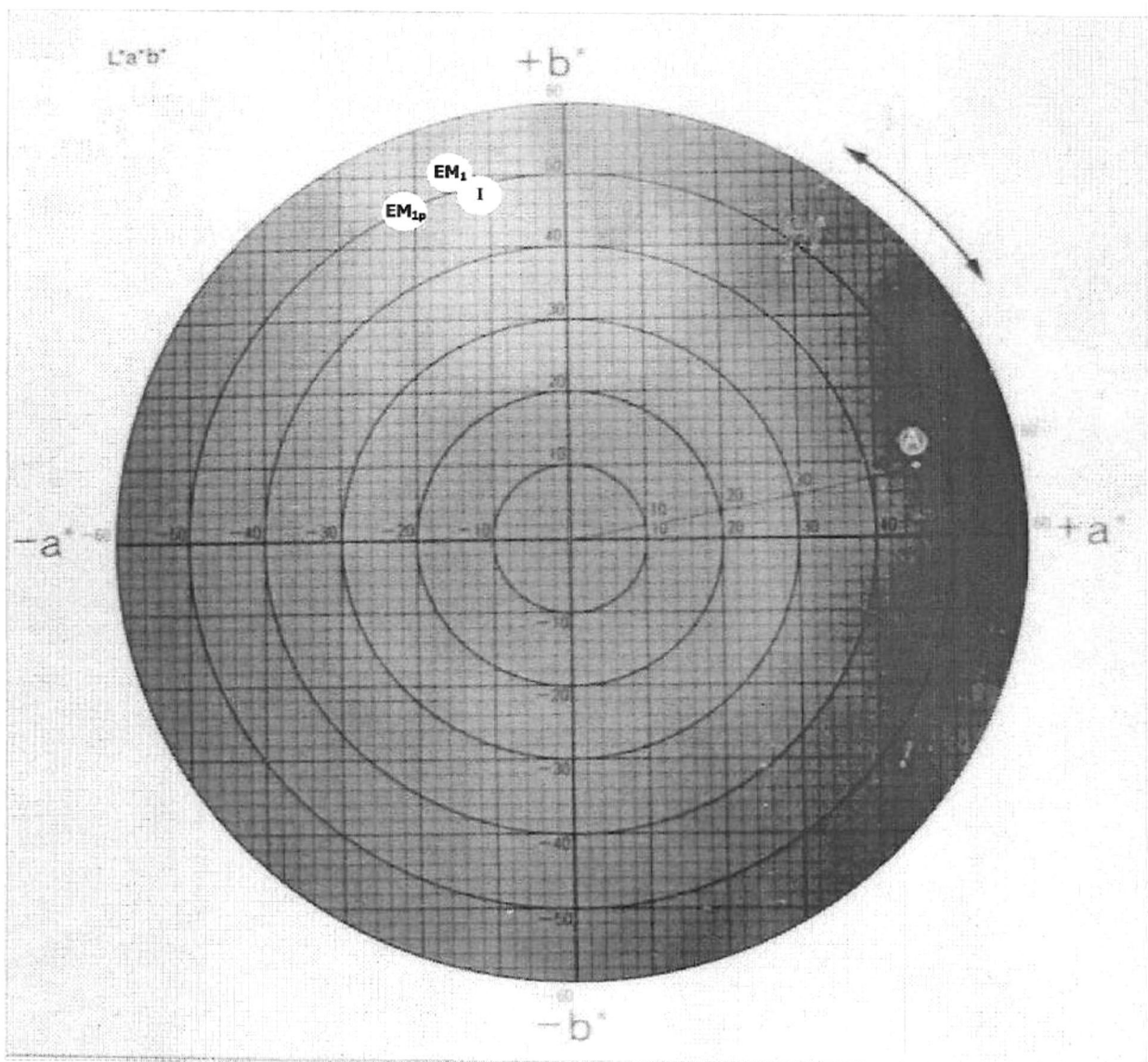


Figura 19. Representación gráfica del color de los parámetros L^* , a^* , b^* , C^* y h^* de la materia prima utilizada en el experimental final (EM_1), la utilizada en el experimental preliminar (EM_{1p}) y el higo inmaduro (I) clasificado por Solomon *et al.* (2006).

c) Contenido de Humedad y Fibra Dietaria

El fruto en fresco presentó un contenido de humedad del $59.80 \pm 3.60\%$ (wm), este porcentaje es inferior al reportado en el experimental preliminar pero se encuentra muy cercano a los valores reportados por Desai y Kotecha (1995), quienes establecen un contenido de humedad inicial del 66.8% al 79.6% en la variedad Mission, Calimyrna y Kadota. La diferencia del contenido de humedad entre la materia prima del estudio preliminar y el final, puede estar relacionado con las condiciones climatológicas (Grassi, 1991; Chessa, 1997), puesto que se durante la temporada de Agosto a Diciembre 2007 prevalecieron temperaturas extremas con máximas de 49°C y mínimas de -9°C, factor que dificultó el desarrollo del fruto, este efecto ya se ha reportado con anterioridad

En relación al contenido de fibra dietaria, los resultados coinciden con los reportados en el estudio preliminar, es decir se encontró un 2.96% de fibra dietaria insoluble (FDI) y 0.087% de fibra dietaria soluble (FDS) en el EM1.

2) Proceso de deshidratación

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el proceso de deshidratación.

a) Escaldado

Los higos escaldados con bisulfito de sodio, conservaron mejor el color verde característico de la variedad en comparación a los tratados con ácido ascórbico los cuales ocasionaron un color de piel amarillo dorado, tal y como se puede apreciar en la Figura 20. Este efecto coincide con el reportado en el experimental preliminar y es consistente con lo reportado por Esparza-Rivera *et al.* (2006).

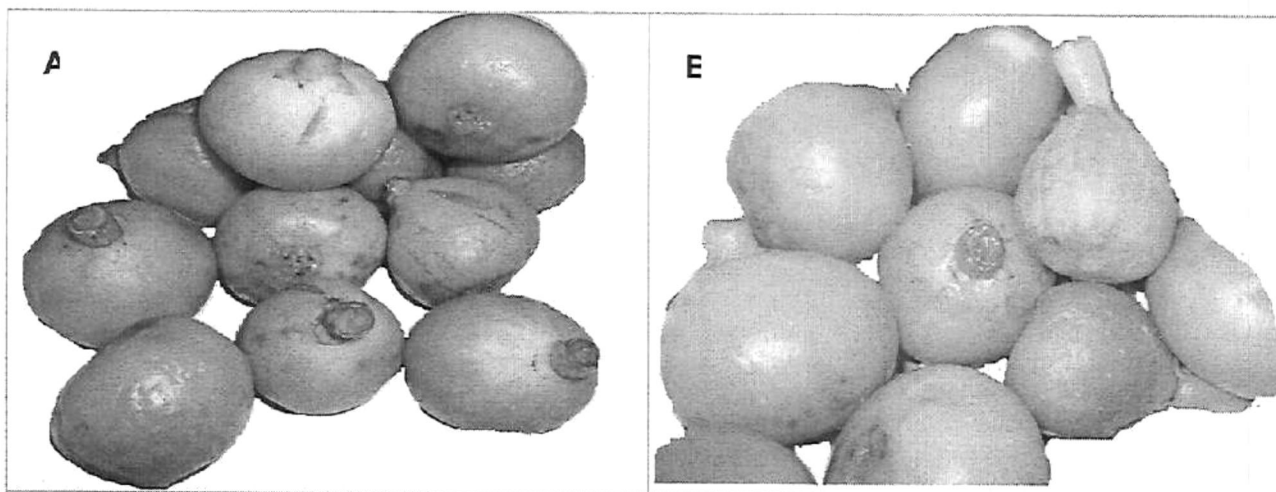


Figura 20. Efecto del Ácido Ascórbico (A) y el Bisulfito de Sodio (B) en el higo escaldado: estudio Final

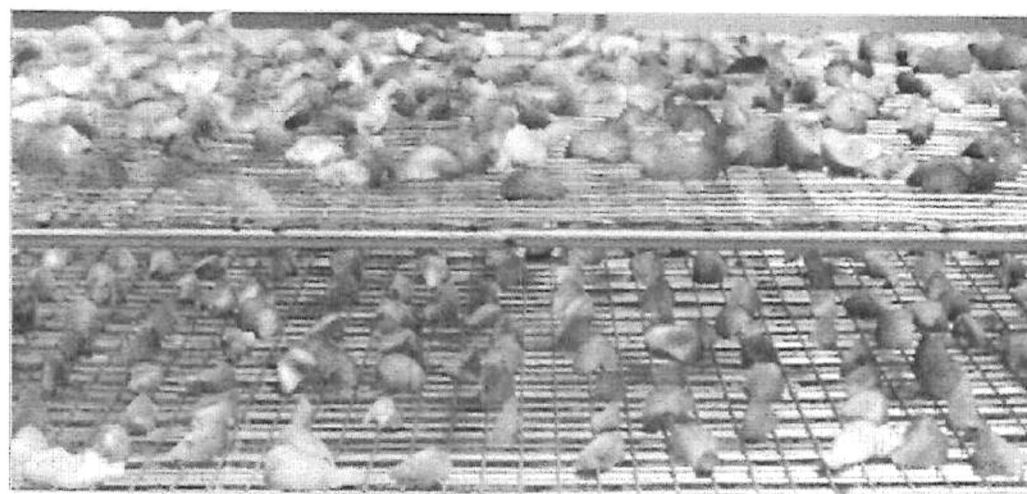


Figura 21. Distribución del higo en las charolas de secado.

b) Reducción del Tamaño de Partícula

Al reducir el tamaño de la materia prima el proceso de oxidación se acelera, debido a que ésta es expuesta de forma más directa al medio, lo anterior ocasiona un rápido oscurecimiento en la superficie de la fruta (Montoya-Ballesteros 1991; Fellows, 2000; Heldman y Lud, 2007). Como se puede observar en la Figura 21, no se presentó un oscurecimiento importante en la materia prima al reducir el tamaño de partícula. El rendimiento de la materia prima fue mayor al obtenido en la reducción de partícula del experimental preliminar.

c) Deshidratado con Aire Caliente

El Cuadro 21, muestra el efecto de los factores sobre los parámetros de color L^* , a^* , b^* , C^* y $^{\circ}h$, y sobre la variable de respuesta CTC. En la parte inferior del cuadro se muestran las media general (correspondiente a seis mediciones repetidas) de los tratamientos escaldados con bisulfito de sodio, ácido ascórbico, sin aditivo así como los valores de los parámetros del fruto en fresco. En los resultados generados se puede observar que existe muy poca variación en los valores de los parámetros, lo cual se refleja en un CTC muy semejante en los distintos tratamientos. La relación L^*/a^* indica una degradación importante durante el proceso, esto ocasionó un cambio de color en la piel del higo de amarillo-verdoso a verde olivo. El efecto anterior, es atribuible a la degradación de la clorofila, puesto que se reportado que durante la exposición de algunas frutas al calor por periodos prolongados la producción de clorofila disminuye, lo cual ocasiona cambios en el color verde principalmente (Rocha *et al.* 1993; Whitaker 1994; Steet y Tong *et al.* 1996).

Cuadro 21. Resultados del AO L₁₆ del efecto de los factores controlables en los parámetros de color L*, a*, b*, C*, h* y el Cambio Total de Color(CTC) del higo deshidratado (Media ± Desviación estándar).

Exp. No	Concentración y tipo de Aditivo (%)	Temperatura de Escaldado °C	Tiempo de Escaldado (min)	Uniformidad del proceso inmersión (rpm)	Tamaño de partícula (cm)	Temperatura de Secado (°C)	Tiempo de Secado(h)	L*	a*	b*	C*	h*	CTC
1	S/Aditivo 0.00	80	5	15	1.347±0.2	55	24	69.34 ± 2.22	-3.23 ± 0.40	27.07 ± 0.55	27.26 ± 0.57	96.73 ± 0.75	27.27
2	Bisulfito 0.15	90	15	45	2.108±0.2	60	36	69.07 ± 1.91	-4.20 ± 0.56	31.06 ± 1.01	31.35 ± 1.03	97.62 ± 0.95	23.43
3	Bisulfito 0.30	80	5	15	1.347±0.2	60	36	68.75 ± 2.54	-2.89 ± 0.49	28.31 ± 1.76	28.44 ± 1.73	95.80 ± 1.15	26.26
4	Bisulfito 0.30	90	15	45	2.108±0.2	55	24	69.67 ± 2.10	-3.44 ± 0.14	26.57 ± 1.18	26.79 ± 1.19	97.30 ± 0.19	27.68
5	Bisulfito 0.45	80	5	45	2.108±0.2	55	24	70.94 ± 2.07	-4.81 ± 0.43	30.28 ± 1.27	30.65 ± 1.29	98.83 ± 0.50	24.37
6	Bisulfito 0.45	90	15	15	1.347±0.2	60	36	72.60 ± 2.38	-4.53 ± 0.29	30.02 ± 1.68	30.36 ± 1.65	98.55 ± 0.75	25.35
7	Bisulfito 0.75	80	5	45	2.108±0.2	60	36	69.75 ± 1.69	-2.59 ± 0.45	29.75 ± 2.11	29.86 ± 2.09	94.95 ± 1.04	25.52
8	Bisulfito 0.75	90	15	15	1.347±0.2	55	24	68.96 ± 2.09	-0.65 ± 0.53	30.33 ± 0.56	30.33 ± 0.56	91.08 ± 1.05	25.95
9	S/Aditivo 0.00	80	15	15	2.108±0.2	55	36	71.10 ± 2.76	-3.58 ± 0.32	28.35 ± 1.46	28.57 ± 1.41	97.17 ± 0.96	26.57
10	A.Ascórbico 0.15	90	5	45	1.347±0.2	60	24	69.16 ± 2.55	-1.66 ± 0.66	28.05 ± 0.82	28.10 ± 0.80	93.37 ± 1.39	27.21
11	A.Ascórbico 0.30	80	15	15	2.108±0.2	60	24	70.84 ± 2.40	-2.24 ± 0.51	27.53 ± 0.34	27.62 ± 0.35	94.60 ± 1.04	27.80
12	A.Ascórbico 0.30	90	5	45	1.347±0.2	55	36	71.12 ± 1.72	-4.25 ± 0.35	27.45 ± 0.22	27.78 ± 0.23	98.72 ± 0.69	27.01
13	A.Ascórbico 0.45	80	15	45	1.347±0.2	55	36	70.59 ± 3.56	-3.81 ± 0.33	28.85 ± 1.05	29.10 ± 1.01	97.45 ± 0.89	25.89
14	A.Ascórbico 0.45	90	5	15	2.108±0.2	60	24	68.51 ± 2.35	-2.40 ± 0.17	27.90 ± 0.56	27.99 ± 0.56	94.83 ± 0.29	26.79
15	A.Ascórbico 0.75	80	15	45	1.347±0.2	60	24	67.00 ± 2.13	-0.63 ± 0.57	29.75 ± 1.12	29.75 ± 1.12	91.15 ± 1.09	25.97
16	A.Ascórbico 0.75	90	5	15	2.108±0.2	55	36	66.77 ± 1.67	0.09 ± 0.26	26.88 ± 1.32	26.88 ± 1.32	89.82 ± 0.52	26.62
Materia Prima								62.21 ± 4.41	-16.16 ± 3.94	50.00 ± 5.70	52.71 ± 5.45	107.90 ± 5.01	—
Bisulfito de Sodio (Na ₂ S ₂ O ₃)								69.96 ± 1.37	-3.30 ± 1.43	29.47 ± 1.53	29.68 ± 1.56	96.30 ± 2.70	25.51
A. Ascórbico (C ₆ H ₈ O ₆)								69.14 ± 1.80	-2.13 ± 1.57	28.06 ± 0.96	28.17 ± 0.96	94.28 ± 3.18	27.04
Sin Aditivo								70.22 ± 1.24	-3.40 ± 0.25	27.71 ± 0.90	27.92 ± 0.92	96.95 ± 0.31	26.92

No obstante que la diferencia en el efecto de los tratamientos es mínima, se puede apreciar que la tendencia de los resultados no es igual a la reportada en el estudio preliminar, es decir, los tratamientos escaldados con ácido ascórbico presentaron mayor CTC (27.04), seguido de los tratamientos escaldados sin aditivo (26.92) y finalmente los tratamientos escaldados con bisulfito de sodio son los que presentaron el menor CTC (25.51), esto podría estar relacionado con la degradación del ácido ascórbico (Esparza-Rivera *et al.* 2006) en la fruta y la variación del color entre el fruto fresco del estudio preliminar y el utilizado en el estudio final; ya que el higo utilizado en el experimental preliminar se caracterizó por presentar un color amarillo-dorado.

El Cuadro 22, muestra la comparación de los resultados obtenidos, con los reportados por Piga *et al.* (2004) en la deshidratación de higo entero. El CTC promedio de los tratamientos escaldados con bisulfito de sodio (26.51 ± 1.01) en el proceso de 24 h, fue menor al de los tratamientos escaldados sin aditivo (27.27); mientras que los resultados de Piga *et al.* (2004) muestra mayor CTC en los tratamientos escaldados con metabisulfito de sodio (18.82) en comparación con los escaldados sin aditivo (13.41). Esta misma tendencia se presento en los resultados del proceso de 36 h. Sin embargo, la diferencia en los resultados de ambos estudios es reducida, este resultado podría estar relacionado con el periodo de tiempo de secado, debido a que en el estudio de Piga *et al.* (2004) se reporta mayor diferencia en el CTC después de 50 h de secado.

La diferencia en los resultados podría estar relacionada con el tiempo de escaldado, puesto que Piga *et al.* (2004) utilizó tiempos de 3 min en los tratamientos escaldados con metabisulfito y de 1 min en los escaldados sin aditivo, mientras que en este estudio los tiempos fueron 5 min y 15 min, lo cual permitió mayor penetración del sulfito en las paredes celulares del higo. En la figura 22, se puede observar el color y la apariencia del higo deshidratado en el experimental final.



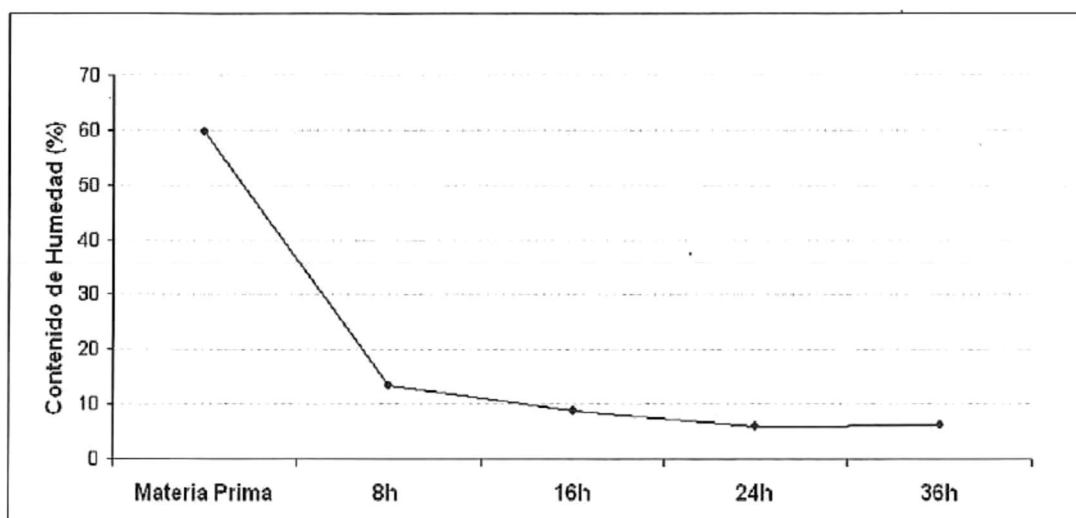
Figura 22. Rodajas y polvo de higo deshidratado: Experimental final

Cuadro 22. Evolución de cambio de color en los parámetros L^* , a^* , b^* , C^* , h^* y cambio total de color (CTC) en la piel del higo durante el proceso de deshidratación (media $\pm$ desviación estándar)

	L^*	a^*	b^*	h^*	CTC
Materia Prima	62.21 $\pm$ 4.41	-16.16 $\pm$ 3.94	50.00 $\pm$ 5.70	52.71 $\pm$ 5.45	—
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.30% - 24h	69.67 $\pm$ 2.10	-3.44 $\pm$ 0.14	26.57 $\pm$ 1.18	26.79 $\pm$ 1.19	27.68
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.45% - 24h	70.94 $\pm$ 2.07	-4.81 $\pm$ 0.43	30.28 $\pm$ 1.27	30.65 $\pm$ 1.29	24.37
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.75% - 24h	68.96 $\pm$ 2.09	-0.65 $\pm$ 0.53	30.33 $\pm$ 0.56	30.33 $\pm$ 0.56	25.95
Sin Aditivo 24h	69.34 $\pm$ 2.22	-3.23 $\pm$ 0.40	27.07 $\pm$ 0.55	27.26 $\pm$ 0.57	27.27
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.15% - 36h	69.07 $\pm$ 1.91	-4.20 $\pm$ 0.56	31.06 $\pm$ 1.01	31.35 $\pm$ 1.03	23.43
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.30% - 36h	68.75 $\pm$ 2.54	-2.89 $\pm$ 0.49	28.31 $\pm$ 1.76	28.44 $\pm$ 1.73	26.26
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.45% - 36h	72.60 $\pm$ 2.38	-4.53 $\pm$ 0.29	30.02 $\pm$ 1.68	30.36 $\pm$ 1.65	25.35
Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.75% - 36h	69.75 $\pm$ 1.89	-2.59 $\pm$ 0.45	29.75 $\pm$ 2.11	29.86 $\pm$ 2.09	25.52
Sin Aditivo 36h	71.10 $\pm$ 2.76	-3.58 $\pm$ 0.32	28.35 $\pm$ 1.46	28.57 $\pm$ 1.41	26.57
Piga et al. (2004)	L^*	a^*	b^*	h^*	CTC
Materia Prima	62.15	-21.76	49.85	113.68	—
Bisulfito de Sodio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 3% a 23h	55.55	-4.83	54.76	94.96	18.82
Sin Aditivo 23h	52.28	-1.87	45.74	92.26	22.58
Bisulfito de Sodio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 3% a 30h	52.70	-3.08	49.57	93.26	20.94
Sin Aditivo 30h	48.85	-0.72	40.63	91.01	26.54

La Gráfica 3, muestra la secuencia en la pérdida del contenido de humedad del higo durante el proceso de deshidratación. Los resultados muestran tres fases o etapas principales de eliminación de humedad, la primera va de las 0 a las 8 h y es donde se presenta la mayor eliminación de humedad. La segunda fase se presenta de las 8 a las 24 h, en ella la eliminación de humedad es menor pero constante; la tercera fase se presenta de las 24 a las 36 h donde la humedad se mantiene constante. Este patrón de comportamiento es consistente con lo reportado por Piga *et al.* (2004) y Xanthopoulos *et al.* (2007) la deshidratación de higo, en estos estudios la mayor eliminación de humedad de presento de las 0 a las 15 h, la segunda fase de las 15 a las 20 h, y la tercera fase de las 20 a las 37 h. La diferencia entre la longitud de los periodos de Piga *et al.* (2004) y Xanthopoulos *et al.* (2007) y las reportadas en esta investigación, puede atribuirse a la diferencia en tamaño de partícula utilizada (los estudios mencionados utilizaron higo entero) debido a que la eliminación de humedad es mayor al utilizar tamaños de partícula es menores (Fellows, 2006; Ratti y Mujumdar, 2005).

El cuadro 23, muestra los valores de las mediciones realizadas (dos mediciones repetidas) para determinar el contenido final de humedad. Como se observa, temperaturas de 60°C generan mayor eliminación de humedad, lo mismo sucede al utilizar tiempos de 24 h. El contenido promedio final de humedad para los tratamientos de 24 h fue de 5.99 ± 1.10 y para los tratamientos de 36 h fue de 6.28 ± 2.52 , estos resultados son menores a los reportados por Piga *et al.* (2004) y Xanthopoulos *et al.* (2007) quienes obtuvieron 15% (55°C/33-37 h) y menor al 30% (50°C - 23 a 53 h) respectivamente. Esta diferencia puede estar relacionada con la variación en el tamaño de partícula y el contenido de humedad inicial, los cuales fueron mayores en los estudios mencionados.



Gráfica 3. Curva de la pérdida del contenido de humedad(%) en el higo durante el proceso de deshidratación

Cuadro 23. Resultados del AO L16 del efecto de los factores controlables sobre el contenido final de humedad en el higo deshidratado (Media $\pm$ Desviación estándar)

Exp. No.	Concentración y tipo de Aditivo (%)	Temperatura de Escaldado (°C)	Tiempo de Escaldado (min)	Uniformidad del proceso Inmersión (rpm)	Tamaño de partícula (cm)	Temperatura de Secado (°C)	Tiempo de Secado(h)	Contenido Final de Humedad (%)
1	S/Aditivo 0.00	80	5	15	1.347 $\pm$ 0.2	55	24	5.19 $\pm$ 3.54
2	Bisulfito 0.15	90	15	45	2.108 $\pm$ 0.2	60	36	5.59 $\pm$ 0.21
3	Bisulfito 0.30	80	5	15	1.347 $\pm$ 0.2	60	36	3.20 $\pm$ 0.14
4	Bisulfito 0.30	90	15	45	2.108 $\pm$ 0.2	55	24	5.70 $\pm$ 3.54
5	Bisulfito 0.45	80	5	45	2.108 $\pm$ 0.2	55	24	6.69 $\pm$ 0.81
6	Bisulfito 0.45	90	15	15	1.347 $\pm$ 0.2	60	36	6.30 $\pm$ 0.24
7	Bisulfito 0.75	80	5	45	2.108 $\pm$ 0.2	60	36	7.89 $\pm$ 2.98
8	Bisulfito 0.75	90	15	15	1.347 $\pm$ 0.2	55	24	4.97 $\pm$ 0.46
9	S/Aditivo 0.00	80	15	15	2.108 $\pm$ 0.2	55	36	5.75 $\pm$ 1.41
10	A.Ascórbico 0.15	90	5	45	1.347 $\pm$ 0.2	60	24	5.02 $\pm$ 0.45
11	A.Ascórbico 0.30	80	15	15	2.108 $\pm$ 0.2	60	24	8.09 $\pm$ 5.29
12	A.Ascórbico 0.30	90	5	45	1.347 $\pm$ 0.2	55	36	7.70 $\pm$ 0.65
13	A.Ascórbico 0.45	80	15	45	1.347 $\pm$ 0.2	55	36	7.05 $\pm$ 1.17
14	A.Ascórbico 0.45	90	5	15	2.108 $\pm$ 0.2	60	24	5.54 $\pm$ 0.21
15	A.Ascórbico 0.75	80	15	45	1.347 $\pm$ 0.2	60	24	6.77 $\pm$ 0.67
16	A.Ascórbico 0.75	90	5	15	2.108 $\pm$ 0.2	55	36	6.80 $\pm$ 2.14
Contenido final de humedad promedio en el proceso de 24h								5.99 $\pm$ 1.10
Contenido final de humedad promedio en el proceso de 36h								6.28 $\pm$ 2.52
Contenido final de humedad al utilizar 55°C								6.22 $\pm$ 0.96
Contenido final de humedad al utilizar 60°C								6.04 $\pm$ 1.49

El Cuadro 24, muestra los resultados del análisis fisicoquímico del higo deshidratado, donde se determinó el nivel del pH, la concentración de SST y la acidez Títulable. Los valores del pH disminuyeron en los tratamientos escaldados con bisulfito de sodio (4.45 ± 0.44) y en los escaldados sin aditivo (4.48 ± 0.18) en relación al pH contenido en el fruto fresco (5.30 ± 0.02), mientras que en los tratamientos escaldados con ácido ascórbico (5.08 ± 0.26) los valores fueron muy similares a los del higo fresco; estos resultados coinciden con lo reportado por Piga *et al.* (2004). La acidez Títulable del higo deshidratado fue mayor a la reportada por Piga *et al.* (2004), sin embargo coincide con lo reportado Gallali *et al.* (2000); este incremento podría estar asociado con la presencia de acidez constante, ácidos orgánicos y otros elementos en el fruto (Luning *et al.* 1994; Castro *et al.* 2008). La concentración de SST disminuyó durante el proceso de deshidratación en todos los tratamientos, siendo menor en los tratamientos escaldados con bisulfito de sodio; esto coincide con lo reportado por Gallali *et al.* (2000) y Kulkarni *et al.* (2007).

1) Análisis de Datos

El análisis del efecto de los factores de control se realizó considerando los resultados de las mediciones del CTC y los resultados del contenido final de humedad del higo deshidratado. A continuación se describen los efectos de los factores sobre las características de calidad.

Color.- El Cuadro 25, muestra los resultados del análisis de SN de las mediciones del CTC del higo deshidratado (generadas por el programa "MINITAB 14") donde el criterio de optimización utilizado fue "Lo menor es lo mejor", para obtener el menor CTC en el producto final. Como se puede observar, la combinación de factores del experimento 2 genero la mayor SN (-30.32) y el menor CTC (32.79 ± 1.11); mientras que la combinación de factores con la menor SN correspondió al experimento 16 el cual genero (-31.74) y el mayor CTC (38.61 ± 1.34).

Cuadro 24. Resultados del AO L16 del efecto de los factores controlables sobre el pH, la concentración de SST y Acidez titulable en el higo deshidratado (Media $\pm$ Desviación estándar)

Exp. No.	Concentración y tipo de Aditivo (%)	Temperatura de Escaldado °C	Tiempo de Escaldado (min)	Uniformidad del proceso de inmersión (rpm)	Tamaño de partícula (cm)	Temperatura de Secado (°C)	Tiempo de Secado (h)	pH	Acidez Titulable	SST
1	S/Aditivo 0.00	80	5	15	1.347 $\pm$ 0.2	55	24	4.14 $\pm$ 0.00	0.7015 $\pm$ 0.06	12.00 $\pm$ 0.00
2	Bisulfito 0.15	90	15	45	2.108 $\pm$ 0.2	60	36	4.33 $\pm$ 0.03	0.7011 $\pm$ 0.05	13.03 $\pm$ 0.29
3	Bisulfito 0.30	90	5	15	1.347 $\pm$ 0.2	60	36	4.29 $\pm$ 0.03	0.7532 $\pm$ 0.06	9.63 $\pm$ 0.15
4	Bisulfito 0.30	90	15	45	2.108 $\pm$ 0.2	55	24	4.30 $\pm$ 0.01	0.7774 $\pm$ 0.05	15.50 $\pm$ 0.61
5	Bisulfito 0.45	80	5	45	2.108 $\pm$ 0.2	55	24	4.58 $\pm$ 0.00	0.6480 $\pm$ 0.04	11.63 $\pm$ 0.46
6	Bisulfito 0.45	90	15	15	1.347 $\pm$ 0.2	60	36	4.53 $\pm$ 0.00	0.9079 $\pm$ 0.03	20.37 $\pm$ 0.81
7	Bisulfito 0.75	80	5	45	2.108 $\pm$ 0.2	60	36	4.78 $\pm$ 0.11	0.7865 $\pm$ 0.15	9.63 $\pm$ 0.21
8	Bisulfito 0.75	90	15	15	1.347 $\pm$ 0.2	55	24	4.54 $\pm$ 0.07	0.8180 $\pm$ 0.08	13.67 $\pm$ 0.06
9	S/Aditivo 0.00	80	15	15	2.108 $\pm$ 0.2	55	36	4.76 $\pm$ 0.01	0.8629 $\pm$ 0.03	12.40 $\pm$ 0.10
10	A.Ascórbico 0.15	90	5	45	1.347 $\pm$ 0.2	60	24	4.69 $\pm$ 0.06	0.8797 $\pm$ 0.00	8.60 $\pm$ 0.10
11	A.Ascórbico 0.30	80	15	15	2.108 $\pm$ 0.2	60	24	4.91 $\pm$ 0.10	0.8965 $\pm$ 0.01	11.27 $\pm$ 0.06
12	A.Ascórbico 0.30	90	5	45	1.347 $\pm$ 0.2	55	36	5.48 $\pm$ 0.01	0.6175 $\pm$ 0.03	13.73 $\pm$ 0.12
13	A.Ascórbico 0.45	80	15	45	1.347 $\pm$ 0.2	55	36	5.29 $\pm$ 0.01	0.4559 $\pm$ 0.03	14.53 $\pm$ 0.21
14	A.Ascórbico 0.45	90	5	15	2.108 $\pm$ 0.2	60	24	5.04 $\pm$ 0.07	0.6227 $\pm$ 0.03	12.33 $\pm$ 0.31
15	A.Ascórbico 0.75	80	15	45	1.347 $\pm$ 0.2	60	24	4.98 $\pm$ 0.00	0.9659 $\pm$ 0.01	9.27 $\pm$ 0.06
16	A.Ascórbico 0.75	90	5	15	2.108 $\pm$ 0.2	55	36	5.15 $\pm$ 0.03	1.2125 $\pm$ 0.00	9.53 $\pm$ 0.12
Materia Prima								5.30 $\pm$ 0.02	0.3890 $\pm$ 0.24	15.46 $\pm$ 0.01
Sin Aditivo								4.45 $\pm$ 0.44	0.7822 $\pm$ 0.11	12.20 $\pm$ 0.28
Bisulfito de Sodio								4.48 $\pm$ 0.18	0.7699 $\pm$ 0.08	13.35 $\pm$ 3.76
A. Ascórbico								5.08 $\pm$ 0.26	0.8072 $\pm$ 0.26	11.32 $\pm$ 2.31

Cuadro 25. Resultados del AO L₁₆(8x1 2x6) del efecto sobre el CTC en el higo deshidratado y la SN_g generada.

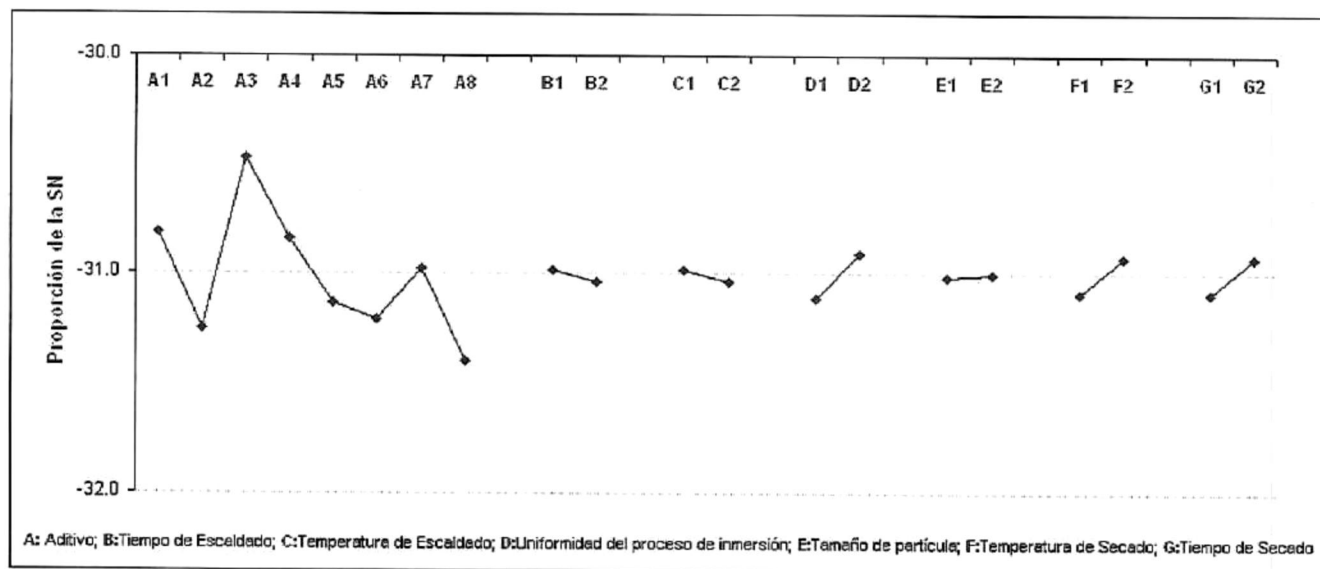
Exp. No.	FACTORES	CTC						Media	Desv. Estándar	SN _g ("Lo Menor es lo mejor")
		R1	R2	R3	R4	R5	R6			
1	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁ F ₁ G ₁	36.11	36.33	37.54	37.44	36.50	36.97	36.82	0.60	-31.32
2	A ₁ B ₂ C ₂ D ₂ E ₂ F ₂ G ₂	33.96	32.77	32.96	31.53	31.51	34.01	32.79	1.11	-30.32
3	A ₂ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁ F ₂ G ₂	34.72	36.86	38.56	36.18	34.65	34.36	35.89	1.64	-31.11
4	A ₂ B ₂ C ₂ D ₂ E ₂ F ₁ G ₁	37.57	35.64	37.37	38.60	35.87	37.97	37.17	1.18	-31.41
5	A ₃ B ₁ C ₁ D ₂ E ₂ F ₁ G ₁	31.63	33.22	35.58	32.48	33.30	32.91	33.19	1.32	-30.43
6	A ₃ B ₂ C ₂ D ₁ E ₁ F ₂ G ₂	32.17	36.07	32.25	33.75	32.62	34.52	33.56	1.54	-30.52
7	A ₄ B ₁ C ₁ D ₂ E ₂ F ₂ G ₂	32.32	32.22	34.64	36.28	36.52	35.73	34.62	1.93	-30.80
8	A ₄ B ₂ C ₂ D ₁ E ₁ F ₁ G ₁	35.00	34.35	35.59	34.72	36.04	34.55	35.04	0.65	-30.89
9	A ₅ B ₁ C ₂ D ₁ E ₂ F ₁ G ₂	34.41	35.62	37.90	34.47	35.82	34.67	35.48	1.33	-31.01
10	A ₅ B ₂ C ₁ D ₂ E ₁ F ₂ G ₁	35.96	36.54	37.78	36.39	36.82	36.18	36.61	0.64	-31.27
11	A ₆ B ₁ C ₂ D ₁ E ₂ F ₂ G ₁	37.55	37.11	36.42	36.29	36.66	36.41	36.74	0.49	-31.30
12	A ₆ B ₂ C ₁ D ₂ E ₁ F ₁ G ₂	36.39	35.77	36.02	35.67	36.22	35.86	35.99	0.28	-31.12
13	A ₇ B ₁ C ₂ D ₂ E ₁ F ₁ G ₂	35.11	33.91	35.32	34.69	34.38	36.60	35.00	0.93	-30.88
14	A ₇ B ₂ C ₁ D ₁ E ₂ F ₂ G ₁	36.45	33.88	36.14	36.59	36.04	35.68	35.80	0.99	-31.08
15	A ₈ B ₁ C ₂ D ₂ E ₁ F ₂ G ₁	35.19	35.43	34.75	38.07	36.10	35.01	35.76	1.22	-31.07
16	A ₈ B ₂ C ₁ D ₁ E ₂ F ₁ G ₂	40.46	39.29	38.69	39.02	37.47	36.71	38.61	1.34	-31.74

R1, R2, R3, R4, R5 y R6 representan los resultados de las mediciones repetidas realizadas en el CTC

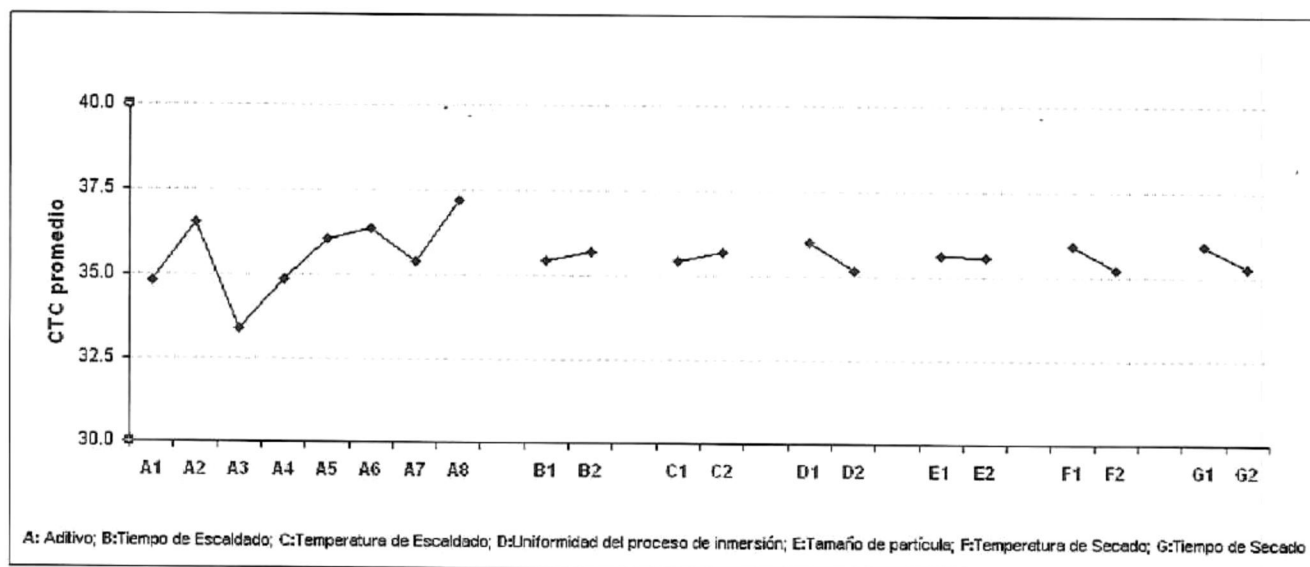
a) Gráfica de efectos principales. La Gráfica 4, muestra los efectos de los factores de estudio sobre la SN y la Gráfica 5, el efecto de los factores sobre el CTC promedio (gráfica de medias). Los resultados muestran que el tipo de aditivo (A) es el factor que más influye sobre la variación del CTC. La misma gráfica muestra que la combinación óptima está dada por el nivel 3(0.45% bisulfito de sodio) del factor A, y la elección del resto de los factores se realiza tomando su nivel más económico.

b) Análisis Pareto-ANOVA. Los resultados del análisis Pareto-ANOVA se muestran en el Cuadro 26. Como se puede observar la variación causada por los factores en el CTC es mínima, sin embargo el factor que mayor variación causa en el CTC es el A, el cual contribuye con un 13.91%, seguido de D con 5.10% y C con 3.90%. Por lo tanto la combinación óptima de factores está dada por el nivel 3(0.45% de bisulfito de sodio) del factor A y por el nivel más económico del resto de los factores.

c) Análisis de Varianza. En el Cuadro 27, se despliegan los resultados del ANOVA. Con base en el nivel de significancia seleccionado ($\alpha=0.05$) y considerando que el valor del *p-value* es mayor a éste, se infiere que ninguno de los factores afecta significativamente en la variación del CTC. Sin embargo, al analizar la suma de cuadrados, se puede observar que la correspondiente al factor A es mucho mayor al resto de los factores, lo cual indica una variabilidad en las observaciones que podría ubicarse en los tratamientos o entre los tratamientos. Por lo tanto y considerando lo anterior, la combinación óptima de factores que disminuye la variación en el CTC esta dada por el nivel 3(0.45% de bisulfito de sodio) del factor A y por el nivel más económico del resto de los factores.



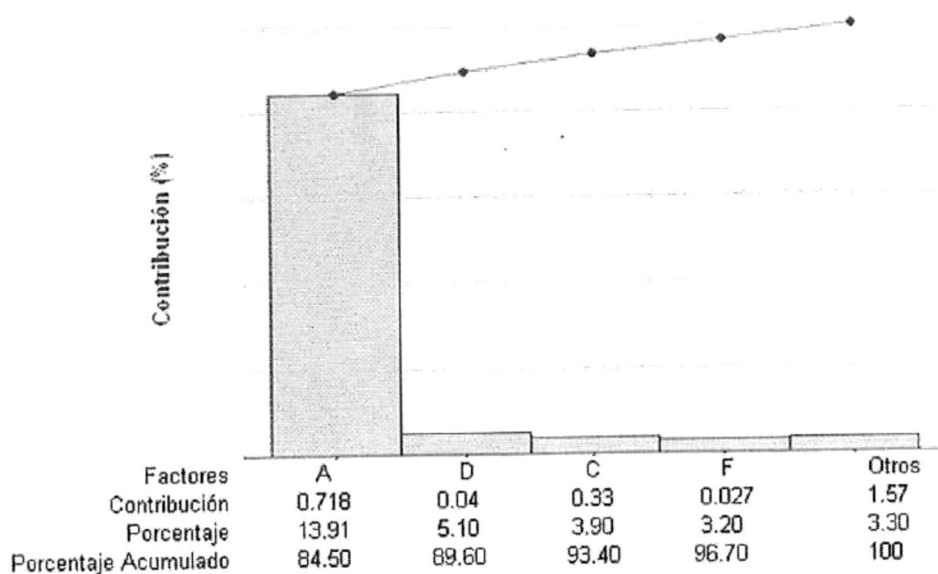
Gráfica 4. Efectos principales de la SNs ("Lo Menor es lo mejor") en cada uno de los factores del proceso de deshidratación del higo



Gráfica 5. Efectos principales de cada uno de los factores sobre el CTC del higo deshidratado.

Cuadro 26. Análisis Pareto-ANOVA para el Cambio Total de Color del higo deshidratado

FACTORES		A	B	C	D	E	F	G	
Suma a nivel de factores	1	-30.82	-30.99	-31.11	-31.12	-31.02	-31.10	-31.10	
	2	-31.26	-31.04	-30.93	-30.91	-31.01	-30.93	-30.94	
	3	-30.47							
	4	-30.85							
	5	-31.14							
	6	-31.21							
	7	-30.98							
	8	-31.40							
Suma de la Diferencia de Cuadrados (S)		5.03	0.00	0.03	0.04	0.00	0.03	0.03	
Grados de Libertad (D)		7	1	1	1	1	1	1	
Contribución (S/D)		0.718	0.003	0.033	0.044	0.000	0.027	0.025	$S_T = 5.16$
Contribución S/D/ S_T (%)		13.91	0.06	0.64	0.84	0.00	0.53	0.49	100%



Combinación óptima $A_3B_3C_3D_3E_3F_3G_3$

Factores: A-Aditivo; B-Tiempo de Escaldado; C-Temperatura de Escaldado; D-Uniformidad del proceso de inmersión; E-Tamaño de partícula; F-Temperatura de Secado; G-Tiempo de Secado

Cuadro 27. Resultados del ANOVA para el Cambio Total de Color ($\alpha=0.05$)

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados _{Ajustados}	Cuadrados Medios _{Ajustados}	F	P-value
A	7	20.723	2.960	1.10	0.555
B	1	0.270	0.270	0.10	0.782
C	1	2.224	2.224	0.82	0.460
D	1	2.898	2.898	1.07	0.409
E	1	0.005	0.005	0.00	0.970
F	1	1.909	1.909	0.71	0.489
G	1	1.679	1.679	0.62	0.513
Error	2	5.394	2.697		
Total	15	35.101			

Humedad.- El Cuadro 28 muestra los resultados del análisis de la SN para el contenido final de humedad del higo deshidratado. La combinación de niveles en del experimento 2 generó la mayor SN (28.42), en contraste la combinación de factores del experimento 1 generó la menor SN (3.31); lo anterior indica que las combinaciones de niveles en estos experimentos influyen bastante sobre la variabilidad del contenido final de humedad.

a) Gráfica de efectos principales. La Gráfica 6, se presentan los efectos de los factores de estudio sobre la SN y la Gráfica 7, el efecto de los factores sobre el contenido final de humedad (gráfica de medias). El análisis de la gráfica muestra que el factor A es el que más influye sobre la variación del contenido final de humedad. En la gráfica 7 se puede observar como el efecto de los factores B, C, D, E, F y G no afecta la variabilidad en el contenido final de humedad establecido ($6\pm 1\%$). Por consiguiente la combinación óptima está dada por el nivel 3(0.45% bisulfito de sodio) del factor A y la elección del resto de los factores se realiza tomando su nivel más económico.

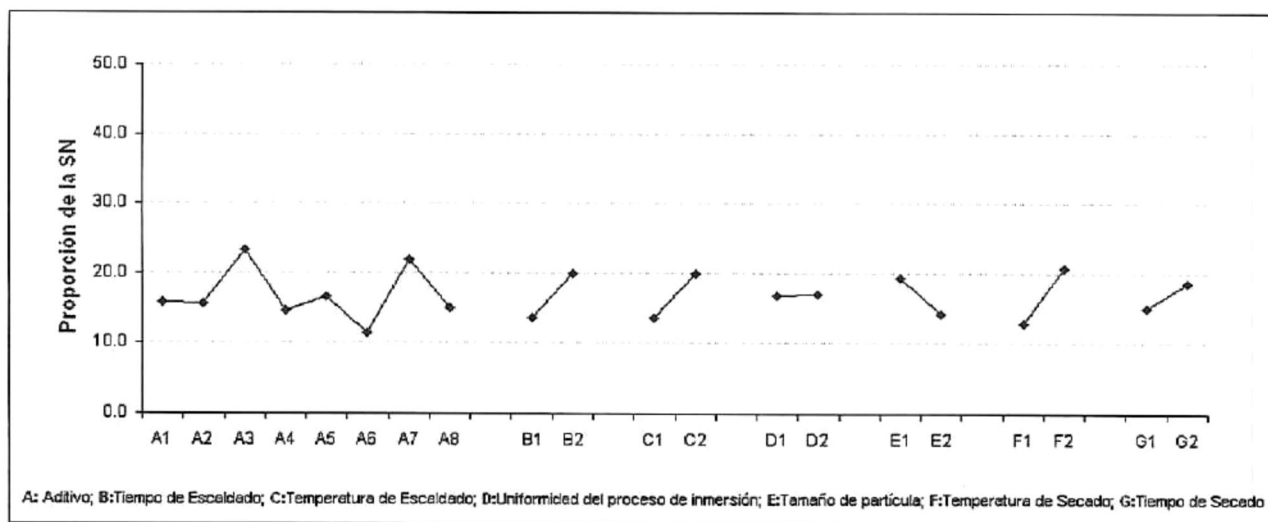
b) Análisis Pareto-ANOVA. Los resultados del análisis Pareto-ANOVA se muestran en el Cuadro 29. Como se puede observar la variación causada por los factores en el contenido final de humedad es mínima, sin embargo el factor que mayor variación causa es el A, el cual contribuye con un 12.29%. Por lo tanto la combinación óptima de factores está dada por el nivel 3(0.45% de bisulfito de sodio) del factor A y por el nivel más económico del resto de los factores.

c) Análisis de Varianza. En el Cuadro 30, se despliegan los resultados del ANOVA para el contenido final de humedad ($\alpha = 0.05$). Los valores para el valor de *p-value* son mayores al nivel de significancia establecido, por lo que se infiere que ninguno de los factores afecta significativamente en la variación del contenido final de humedad. Sin embargo, al analizar la suma de cuadrados, se puede observar que la correspondiente al factor A es mucho mayor al resto de

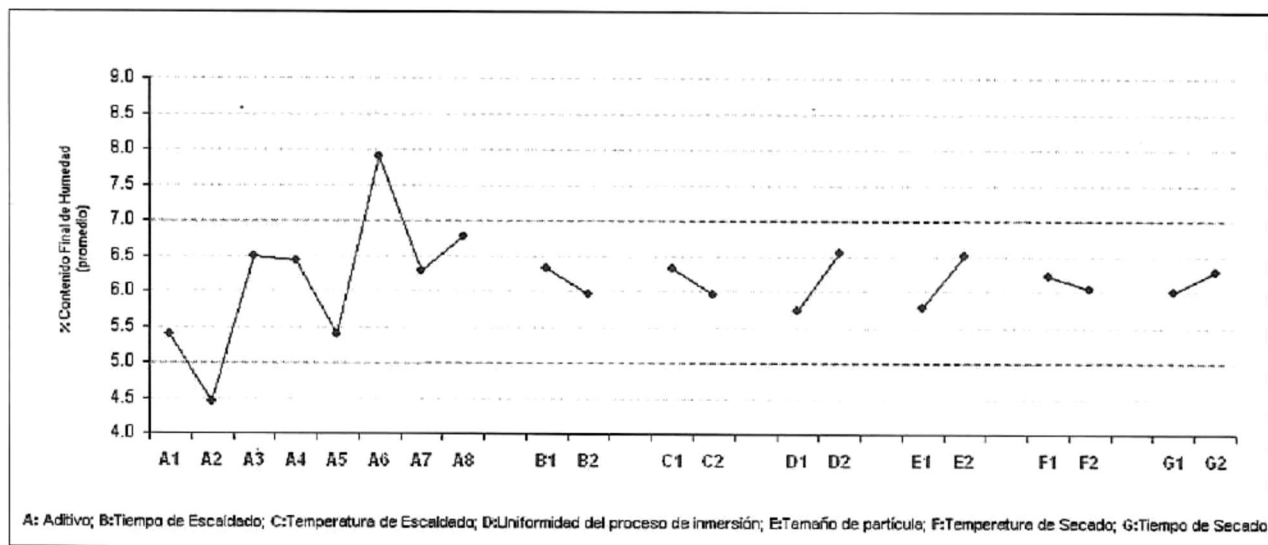
Cuadro 28. Resultados del AO $L_{16}(B \times 1 \ 2 \times 6)$ del efecto de los factores sobre el Contenido Final de Humedad del higo deshidratado y la SN_{η} generada.

Exp. No.	FACTORES	R1	R2	Media	Desv. Estándar	SN_{η} ("Lo Nominal es lo Mejor")
1	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁ F ₁ G ₁	7.69	2.68	5.19	3.54	3.31
2	A ₁ B ₂ C ₂ D ₂ E ₂ F ₂ G ₂	5.44	5.74	5.59	0.21	28.42
3	A ₂ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁ F ₂ G ₂	3.1	3.3	3.20	0.14	27.09
4	A ₂ B ₂ C ₂ D ₂ E ₂ F ₁ G ₁	8.2	3.2	5.70	3.54	4.15
5	A ₃ B ₁ C ₁ D ₂ E ₂ F ₁ G ₁	7.26	6.12	6.69	0.81	18.38
6	A ₃ B ₂ C ₂ D ₁ E ₁ F ₂ G ₂	6.13	6.47	6.30	0.24	28.37
7	A ₄ B ₁ C ₁ D ₂ E ₂ F ₂ G ₂	5.78	9.99	7.89	2.98	8.46
8	A ₄ B ₂ C ₂ D ₁ E ₁ F ₁ G ₁	5.29	4.64	4.97	0.46	20.67
9	A ₆ B ₁ C ₂ D ₁ E ₂ F ₁ G ₂	6.74	4.75	5.75	1.41	12.22
10	A ₆ B ₂ C ₁ D ₂ E ₁ F ₂ G ₁	5.33	4.7	5.02	0.45	21.03
11	A ₆ B ₁ C ₂ D ₁ E ₂ F ₂ G ₁	4.35	11.83	8.09	5.29	3.69
12	A ₆ B ₂ C ₁ D ₂ E ₁ F ₁ G ₂	8.3	7.1	7.70	0.85	19.16
13	A ₇ B ₁ C ₂ D ₂ E ₁ F ₁ G ₂	7.88	6.22	7.05	1.17	15.57
14	A ₇ B ₂ C ₁ D ₁ E ₂ F ₂ G ₁	5.69	5.39	5.54	0.21	28.34
15	A ₈ B ₁ C ₂ D ₂ E ₁ F ₂ G ₁	6.29	7.24	6.77	0.67	20.06
16	A ₈ B ₂ C ₁ D ₁ E ₂ F ₁ G ₂	5.29	8.31	6.80	2.14	10.06

R1 y R2 representan los resultados de las mediciones repetidas realizadas en el contenido final de humedad



Gráfica 6. Efectos principales de la SN ("Lo Nominal es lo Mejor") en cada uno de los factores del proceso de deshidratación del higo: Contenido Final de Humedad

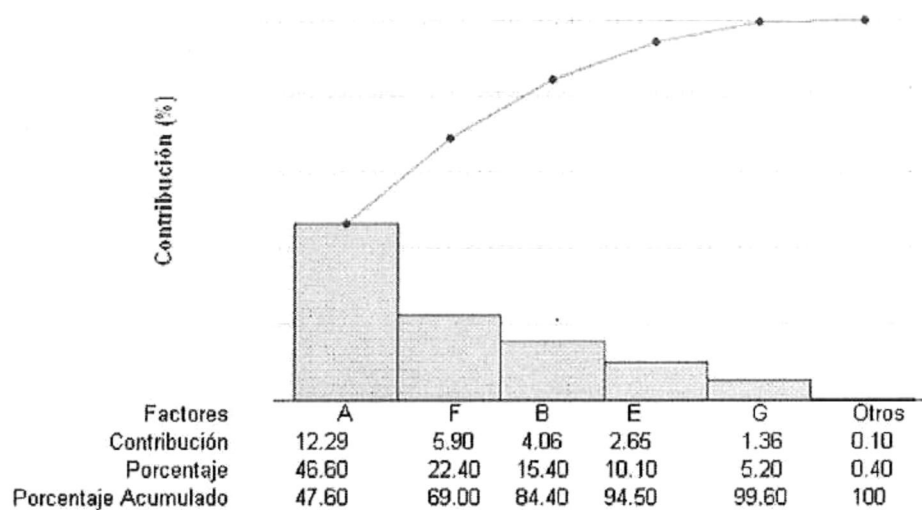


Gráfica 7. Efectos principales de la SN ("Lo Nominal es lo Mejor") en cada uno de los factores del proceso de deshidratación del higo: Contenido Final de Humedad

Cuadro 29. Análisis Pareto-ANOVA para el Contenido Final de Humedad en el higo deshidratado

FACTORES		A	B	C	D	E	F	G
Suma a nivel de factores	1	15.86	13.60	16.98	16.72	19.41	12.94	14.95
	2	15.62	20.02	16.64	16.90	14.21	20.68	18.67
	3	23.37						
	4	14.57						
	5	16.62						
	6	11.42						
	7	21.96						
	8	15.06						
Suma de la Diferencia de Cuadrados (S)		873.57	41.28	0.11	0.03	26.97	59.95	13.80
Grados de Libertad (D)		7	1	1	1	1	1	1
Contribución (S/D)		124.80	41.28	0.11	0.03	26.97	59.95	13.80
Contribución s_{ij}/S_T (%)		12.29	4.06	0.01	0.00	2.65	5.90	1.36

$S_T = 1015.71$



Combinación óptima $A_3B_3C_3D_8E_3F_3G_3$

Factores: A-Aditivo; B-Tiempo de Escaldado; C-Temperatura de Escaldado; D-Uniformidad del proceso de inmersión; E-Tamaño de partícula; F-Temperatura de Secado; G-Tiempo de Secado

Cuadro 30. Resultados del ANOVA para el Contenido final de humedad ($\alpha=0.05$)

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados_{Ajustados}	Cuadrados Medios_{Ajustados}	F	P-value
A	7	15.438	2.205	1.54	0.448
B	1	0.566	0.566	0.40	0.593
C	1	0.300	0.300	0.21	0.692
D	1	2.698	2.698	1.89	0.303
E	1	2.139	2.139	1.50	0.346
F	1	0.131	0.131	0.09	0.790
G	1	0.334	0.334	0.23	0.677
Error	2	2.860	1.430		
Total	15	24.465			

los factores (al igual que en el análisis del CTC), lo cual indica una variabilidad en las observaciones que podría asociarse a la variación originada en los tratamientos o entre los tratamientos. Considerando lo anterior, se estima que la combinación óptima de factores que disminuye la variación en el CTC esta dada por el nivel 3(0.45% de bisulfito de sodio) del factor A y por el nivel más económico del resto de los factores.

4.3 Etapa III: Optimización del proceso

A partir del análisis de la SN para el CTC y el contenido final de humedad, se concluye que la combinación de factores que genera la menor variabilidad en estas dos características de calidad esta dada por $A_3 B_5 C_5 D_5 E_5 F_5 G_5$. Sustituyendo el valor más económico de cada factor óptimo, la combinación resultante es $A_3 B_1 C_1 D_1 E_2 F_1 G_1$, esta combinación no corresponde a ninguno de los 16 experimentos desarrollados en el experimental. El Cuadro 31, muestra las combinaciones de factores desarrolladas donde se utilizó bisulfito de sodio con la concentración correspondiente al nivel 3; estos resultados proporcionan una visión del efecto del factor sobre el CTC y el contenido final de humedad.

Cuadro 31. Efecto del escaldado con Bisulfito de Sodio (0.45%) en el CTC y contenido final de humedad del higo deshidratado.

Exp. No.	Combinación óptima	CTC			Contenido Final de Humedad		
		Media	Desv. Estándar	SN _S (Lo Menor es lo Mejor)	Media	Desv. Estándar	SN _N (Lo Nominal es lo Mejor)
5	$A_3 B_1 C_1 D_2 E_2 F_1 G_1$	33.39	1.32	-30.43	6.69	0.81	18.38
6	$A_3 B_2 C_2 D_1 E_1 F_2 G_2$	33.66	1.54	-30.53	6.3	0.24	28.37

a) Modelo de predicción

La estimación del comportamiento de la combinación de factores óptimos se determino utilizando la siguiente formula (Phadke, 1989):

$$Y_{opt} = m + (m_{Ai} - m) + (m_{Bj} - m) +(m_{Nn} - m)$$

$$m = \frac{T}{n}$$

Donde:

m= Representa el promedio total del CTC/Contenido de humedad

T= Representa el gran total de la suma del CTC/Contenido de humedad

n= Representa el número de experimentos

$m_{Ai...n}$ = Representa el nivel óptimo seleccionado en cada factor.

Por lo tanto, haciendo la sustitución para la variable de respuesta CTC, se tiene:

$$Y_{optimaCTC} = 35.56 + (33.38 - 35.56) + (35.44 - 35.56) +(35.89 - 35.56)$$

$$Y_{optimaCTC} = 34.14$$

Y la SN_s correspondiente fue

$$SN_{optimaCTC} = -31.01 + (-30.47 - (-31.01)) +(-31.10 - (-31.01))$$

$$SN_{optimaCTC} = -30.57$$

El procedimiento anterior se realizó para la variable de respuesta: contenido final de humedad (CFH), los resultados fueron:

$$Y_{optimaCFH} = 6.14 + (6.5 - 6.14) + (6.33 - 6.14) +(5.99 - 6.14)$$

$$Y_{optimaCFH} = 6.77$$

y la SN_N correspondiente fue

$$SN_{\text{optimaCFH}} = 16.81 + (23.13 - 16.81) + (13.60 - 16.81) + \dots(14.95 - 16.81)$$

$$SN_{\text{optimaCFH}} = 8.53$$

Con la combinación optimizada $A_3 B_1 C_1 D_1 E_2 F_1 G_1$ se estima un CTC de 34.14 y un contenido de humedad final de 6.77%.

4.4 Etapa IV: Estudio de Comprobación

La combinación de niveles y factores del modelo de predicción: $A_3 B_1 C_1 D_1 E_2 F_1 G_1$, no correspondió con ninguno de los 16 tratamientos desarrollados durante el experimento, por lo que se realizó un estudio de comprobación; los resultados se muestran en el Cuadro 32. Como se observa tanto el CTC como el contenido final de humedad del higo escaldado con 0.45% de bisulfito de sodio presento los mejores resultados, y conservaron la tendencia del experimental final con respecto al efecto de los tratamientos escaldados con 0.30% de bisulfito de sodio y los escaldados sin aditivo.

Modelo de Predicción

Con base en estos resultados, se estableció el siguiente modelo de predicción, el conduce a la obtención de un mínimo CTC y un contenido de humedad del $6 \pm 1\%$, en el proceso de deshidratación del higo kadota es:

$$Y_{(CTC,CFH)ijk} = \mu + \tau_3 + \beta_2 + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

μ = representa la media global de los ijk -ésimo tratamientos

τ_i = representa el efecto del nivel 3 del factor A (concentración y tipo de aditivo) en el CTC y el Contenido Final de Humedad (CFH)

β_j = representa el efecto del nivel 2 del factor E (Tamaño de partícula) en el CTC y CFH

ε_{ijk} = representa el error aleatorio

a) Caracterización del higo deshidratado en el estudio final

Los cambios fisicoquímicos y características de color del higo deshidratado, se muestran en el Cuadro 33. El contenido final de humedad en los tres tratamientos (escaldado sin aditivo, escaldado con 0.30% bisulfito de sodio, 0.45% bisulfito de sodio) es menor al reportado por Papoff *et al.* (1998), Gallali *et al.* (2000), Piga *et al.* (2004), y Xanthopoulos *et al.* (2007). Por ejemplo Papoff *et al.* (1998), alcanzó un 12% de humedad en el deshidratado de higo (variedad 'Niedda Longa') en un tiempo de procesamiento de 17 h con temperaturas de 95°C y 85°C; asimismo Piga *et al.* (2004), reporta un tiempo de secado de 37 h y 33h para lograr un 15% de humedad en la deshidratación de higo turco; mientras que los niveles de humedad alcanzados en éste estudio para 24 h y 36 h son de 6.63 ± 1.82 y 5.99 ± 1.5 . Xanthopoulos *et al.* (2007), reporta niveles del 15% al 20% de humedad en 24 h a 30 h de secado. En los estudios mencionados el higo fue deshidratado entero, por tanto se infiere que el tamaño de partícula es un factor que influye significativamente en la eliminación del contenido de humedad en el higo. La mayor cantidad de humedad eliminada tuvo lugar en las primeras 8 h del proceso; Piga *et al.* (2004), y Xanthopoulos *et al.* (2007), reportan la mayor pérdida de humedad en las primeras 10 h de procesamiento, por tanto se infiere que la tendencia en la eliminación de humedad está influenciada por el tamaño de partícula del fruto.

En relación a los niveles de pH del higo deshidratado se observa un ligero decrecimiento, la reacción coincide con los resultados de Piga *et al.* (2004). La acidez Títulable aumentó en el higo deshidratado, este aumento podría estar relacionado con las características de la variedad y las condiciones ambientales en las que se desarrolló el cultivo (Desai y Kotecha, 1995; Chessa, 1997). El contenido de SST se conservó mejor en los tratamientos escaldados con bisulfito de sodio, Gallali *et al.* (2000) reporta que la pérdida de SST en higos deshidratados es casi el doble en relación a la fruta deshidratada naturalmente (secado al sol), sin embargo en el proceso desarrollado la pérdida fue minimizada.

Cuadro 32. Resultados del estudio de comprobación para el CTC y el contenido final de humedad del higo deshidratado (media±desviación estándar)

Exp. No.	Concentración de Bisulfito de Sodio	Combinación óptima	CTC _{Estimado}	CTC _{Obtenido}	CFH _{Estimado}	CFH _{Obtenido}	Diferencia(%)	
							CTC	CFH
1	0.45%	A ₃ B ₁ C ₁ D ₁ E ₂ F ₁ G ₁	34.14	33.47 ± 1.2	6.77	5.22 ± 0.4	5.68 ± 1.4	2.26 ± 1.9
2	0.30%	A ₂ B ₁ C ₁ D ₁ E ₂ F ₁ G ₁		30.62 ± 1.5		5.80 ± 0.2		
3	Sin Aditivo	A B ₁ C ₁ D ₁ E ₂ F ₁ G ₁		32.48 ± 0.7		8.83 ± 0.3		

CFH:contenido final de humedad

Cuadro 33. Influencia del proceso de deshidratación sobre las características fisicoquímicas y de color del higo deshidratado (media±desviación estándar)

	%Humedad (materia seca)	pH	Acidez Titulable	Sólidos Solubles Totales ("Brix)	L*	a*	b*	C*	°h
Caborca (2007)									
Fresco	40.20	5.3 ± 0.02	0.3890 ± 0.24	15.46 ± 0.01	71.58 ± 2.1	-17.5 ± 1.7	63.33 ± 1.33	—	—
Seco (Escaldado sin Aditivo)	91.17	4.46 ± 0.45	0.7435 ± 0.06	9.90 ± 0.00	65.87 ± 0.90	-3.22 ± 0.12	34.73 ± 0.60	34.88 ± 0.61	95.25 ± 0.19
Seco (0.30% Na ₂ S ₂ O ₅)	94.21	5.28 ± 0.43	0.8059 ± 0.23	11.97 ± 1.10	64.59 ± 1.36	-4.94 ± 0.13	37.46 ± 1.45	37.78 ± 1.43	97.45 ± 0.35
Seco (0.45% Na ₂ S ₂ O ₅)	94.79	4.91 ± 0.53	0.6819 ± 0.32	13.10 ± 1.10	66.41 ± 1.29	-4.68 ± 0.33	36.21 ± 1.30	35.96 ± 1.23	97.53 ± 0.61
Piga et al (2004)									
Fresco	25.55	5.67	0.8700	—	62.15	-21.76	49.85	—	—
Seco (Escaldado sin Aditivo)	85.82	4.87	0.6600	—	52.28	-1.87	45.74	—	—
Seco (3% Na ₂ S ₂ O ₅)	84.47	5.04	0.4200	—	55.55	-4.83	54.76	—	—

Los resultados de los parámetros de color (L^* , a^* , b^* , C^* , h°), revelan que los tratamientos con bisulfito de sodio conservan mejor el color de la fruta, esto coincide con lo reportado en la deshidratación de higo (Piga *et al*, 2004), manzanas (Beveridge y Weintraub, 1995), ajo (Kim y Cho, 1999), damascos (Ozkan y Cemeroglu, 2002), Tomates (Latapi y Barret, 2006), fresas (Ngo *et al*, 2007) entre otros; además las concentraciones de bisulfito de sodio utilizadas son menores a las utilizadas en los estudios mencionados (la concentración del residual de bisulfito fue de 1 ppm).

El cuadro 34, muestra una comparación nutricional del higo deshidratado con otras frutas comerciales. Como se puede observar, el contenido de potasio y fibra dietaria total es superior al reportado en las otras frutas incluyendo al higo. Vinson *et al*. (1999), reporta un contenido de fibra dietaria total del 12.12% en higos calimyrna y mission, dos de las variedad mas utilizadas en la elaboración de alimentos funcionales en Estados Unidos (ERS-USDA, 2004). Respecto al contenido de fibra dietaria total se obtuvo un 9.93%, del cual 6.57% es del tipo insoluble, el consumo de este tipo de fibra es recomendado como auxiliar en la reducción del riesgo de enfermedades cardiacas y de ciertos tipos de cáncer (Valdés, 2006).

Cuadro 34. Comparación Nutricional del higo deshidratado con otras frutas comerciales

Fruta (38 gr)	Fibra Dietaria (gr)	Potasio (mg)	Calcio (mg)	Hierro(mg)
Higo Seco (Caborca)	9.93	637.00	143.5	—
*Higo Seco	9.74	678.95	163.16	2.030
*Dátil	7.97	655.26	38.76	1.000
*Uva Pasa	3.71	747.37	50.34	1.870
*Nuez	5.00	671.05	264.53	6.050
*Manzana	2.37	107.24	5.79	0.120
*Fresa	2.37	155.26	15.18	0.390

*Fuente: Nutritive Value Foods (2002). USDA - National Nutrient Database for Standard Reference, Release 20
Home and Garden Bulletin No. 72

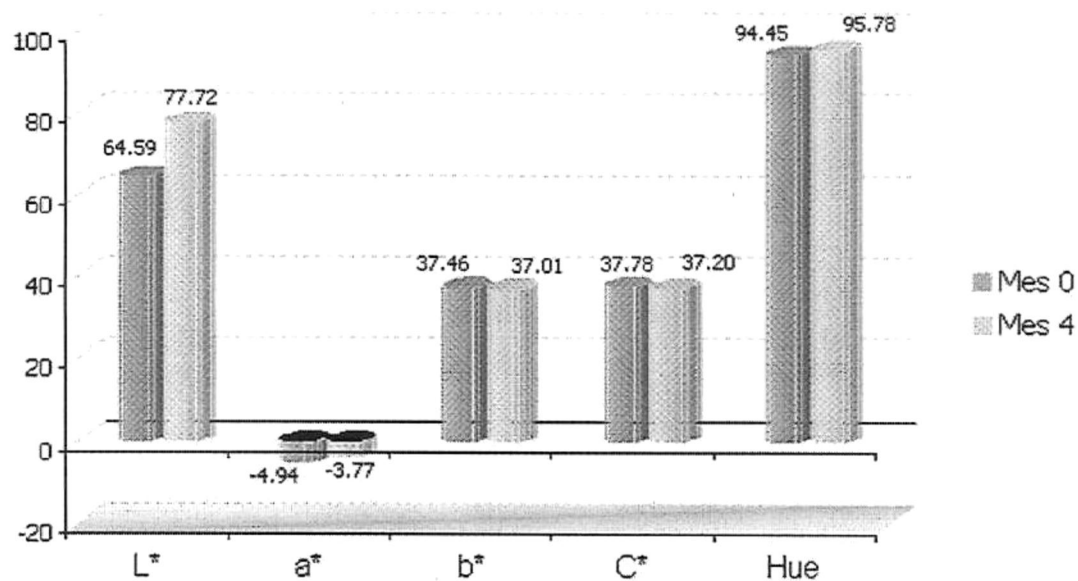
4.5 Etapa V: Estudio de Vida de Anaquel

La Gráfica 8, muestra el efecto en los parámetros de color L^* , a^* , b^* , C^* y h del higo deshidratado después de cuatro meses de almacenamiento a temperatura ambiente ($23\pm 2^\circ\text{C}$). Como se puede observar, la gráfica incluye los valores determinados para el mes 0 (Diciembre 2007) y el mes cuatro (Mayo 2008) como punto de comparación. El CTC fue de 13.18, lo cual es un indicador de la calidad del proceso, debido a que como se puede observar no existen diferencias significativas en los resultados obtenidos.

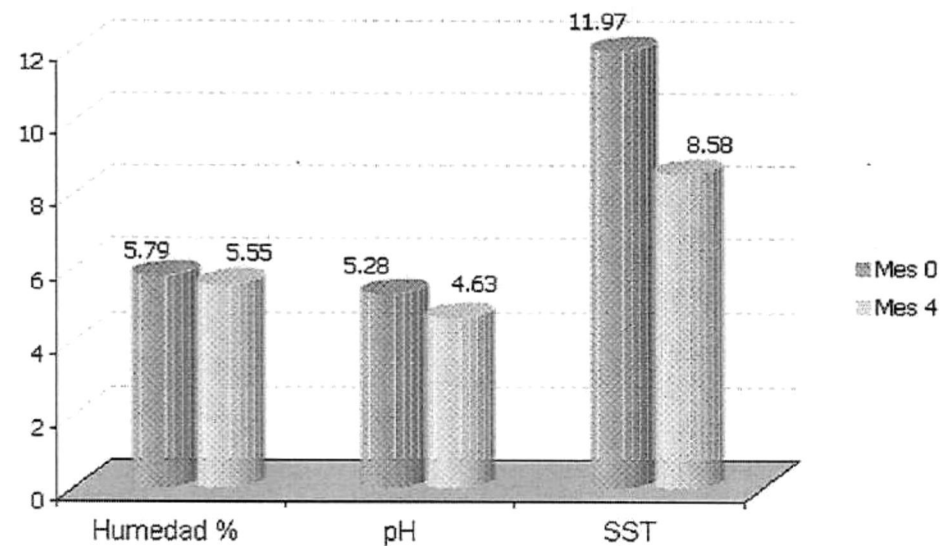
La Gráfica 9 muestra los resultados del análisis de humedad, acidez Títulable y SST. En general, el contenido de humedad decreció un 4.14%, la acidez Títulable un 12.31% y los SST un 28.32%; a excepción de los SST los resultados se encuentran dentro del rango aceptable.

5. Estudio preliminar para la elaboración de una botana

Las características de calidad (apariencia, textura, color, humedad, características fisicoquímicas y nutricionales) que se obtuvieron en el higo deshidratado en rodajas, permitieron realizar un estudio preliminar (utilizando la combinación optimizada de factores), para determinar la factibilidad potencial del higo para la elaboración de una botana agridulce. En la Figura 23, se puede apreciar la apariencia del higo rehidratado y la Figura 24 muestra el producto obtenido, el cual fue evaluado por un grupo de 8 panelistas no entrenados (colaboradores y asesores de ésta investigación), quienes determinaron una aceptabilidad del 85%, en términos de sabor, color y la textura de la botana. La concentración de SST del producto fue 7.06 ± 0.57 , con un pH de 3.83 ± 0.28 y acidez Títulable de 1.04 ± 0.10 .



Grafica 8. Efectos sobre los parámetros de color L*, a*, b*, C* y Hue, en el higo deshidratado después de cuatro meses en anaquel.



Grafica 9. Efectos sobre el contenido de humedad, pH y SST en el higo deshidratado después de cuatro meses en anaquel.

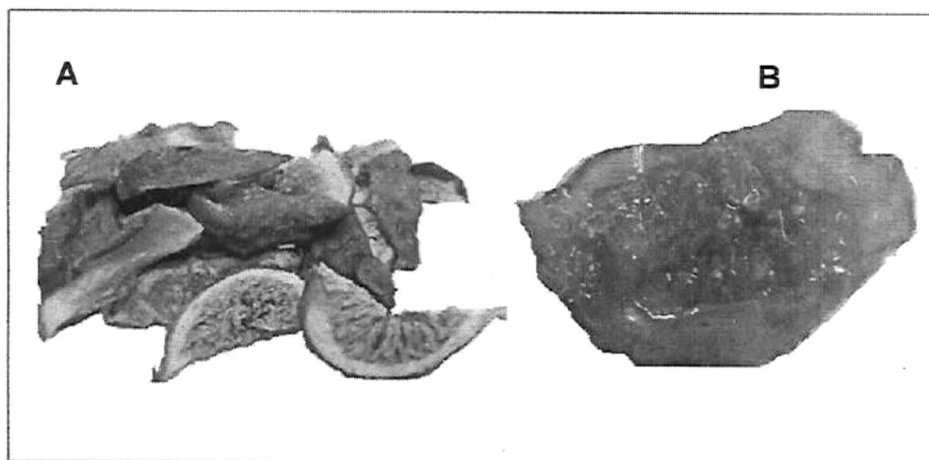


Figura 23. A) Rodajas de higo deshidratado y B) Rodajas de higo rehidratado.



Figura 24. Botana elaborada con el higo deshidratado

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Con base en el análisis de los resultados alcanzados en esta investigación, se establecen las conclusiones:

1. Con la aplicación de la Metodología Taguchi fue posible establecer el valor óptimo de los niveles en los factores de control, del proceso de deshidratación del higo variedad Kadota (*Ficus carica L*) y además logró establecer las condiciones óptimas para las operaciones de escaldado, reducción del tamaño de partícula y secado.
2. Con la aplicación de la MT, fue posible establecer el siguiente modelo de predicción ($\alpha=0.05$) :

$$Y_{(CTC,CFH)ijk} = \mu + \tau_3 + \beta_2 + \kappa_1 + \eta_1 + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

- μ : Representa la media global de los ijk -ésimo tratamientos
- τ_i : Representa el efecto del nivel 3 del factor A (concentración y tipo de aditivo en el CTC y el Contenido Final de Humedad (CFH))
- β_j : Representa es el efecto del nivel 2 del factor B (Tiempo de escaldado) en el CTC y CFH
- κ_1 : Representa el efecto del nivel 1 del factor E (Tamaño de partícula) en el CTC y CFH
- η_1 : Representa es el efecto del nivel 1 del factor G (Temperatura de secado) en el CTC y CFH
- ε_{ijk} : Representa es el error aleatorio

3. La combinación optimizada de factores utilizando el análisis SN de la MT coincide con la establecida por el análisis Pareto-ANOVA y el ANOVA, lo cual ratifica y demuestra la confiabilidad del análisis realizado.

4. La condición óptima de factores que permiten alcanzar un mínimo cambio total de color y un contenido de humedad del $6\pm 1\%$, esta dada por:
a) el uso de 0.45% de bisulfito de sodio en el escaldado del higo a 80°C , por 15 min a 15 rpm; b) tamaño de partícula de $2.108\pm 0.2\text{ cm}$; y c) un tiempo de secado de 24 h, a una temperatura de secado de 55°C .
5. El uso de bisulfito de sodio durante el escaldado contribuyó considerablemente a la disminución del cambio total de color entre el higo fresco y el producto final. Sin embargo, no se descarta la utilización de ácido ascórbico en la deshidratación de higo en estado de madurez comercial debido a los efectos presentados en el color.
6. El proceso de deshidratación con aire caliente del higo variedad kadota a nivel industrial puede ser diseñado en base en este método.

Recomendaciones

Con base en el análisis y alcance de esta investigación se sugiere lo siguiente:

1. Realizar un diseño robusto del proceso de deshidratación del higo variedad kadota, donde la variable de ruido sea el estado de madurez (Nivel 1: fruto inmaduro, Nivel 2: fruto con madurez comercial) con el propósito de mejorar el aprovechamiento de la producción del fruto y aumentar la economía del proceso.
2. Utilizar la MT para diseñar una familia de productos derivados de la deshidratación del higo.
 1. Se recomienda desarrollar el análisis "Split" propuesto por Wu y Wu (1991), para evaluar la SN de las características de calidad.
 2. Se sugiere analizar la actividad del agua en el higo deshidratado, con el propósito de determinar, con mayor precisión el periodo de vida útil del producto.

REFERENCIAS

- Abott, J.A. (1999). Quality Measurement of fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*. Vol 15, pp: 207- 225.
- Ahmed *et al.* (2002). A fraction conversion kinetic model for thermal degradation of color in red chili puree and paste. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*. Vol. 35, pp: 497-503.
- Ahmed *et al.* (2002). Color degradation kinetics of spinach, mustard leaves and mixed puree. *Journal of Food Science*. Vol.67, pp:1088-1091
- Amaya-Flores, D. (2008). Determinación de las Condiciones de Secado y Rehidratado del Higo (*Ficus carica* L.) variedad kadota. Tesis para optar por el grado de ingeniero en alimentos por el Instituto Tecnológico Agropecuario del Valle del Yaqui. Sonora, México. Tesis no publicada.
- Alli, I. (2003). Food Quality Assurance: Principles and Practice. Boca Raton, FL. CRC Press. Pp 25 – 38.
- Alzamora, S.M. (1997). Temas en Tecnología de Alimentos. En: Preservación I Alimentos Conservados por Factores Combinados. CYTED. Alfaomega. Vol1, pp 45- 88.
- A.O.A.C. (1980). Methods of Determining the Moisture Content of Dried Figs: based on Annex I of the standard layout. Official Methods of Analysis, XIIIth Ed.22.013-Moisture on Dried Fruits, Official Final Action.
- A.O.A.C. (2000). Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists. 15th Ed. Arlington, Virginia, USA.
- A.O.A.C. (2000). Method 960.52. 12.1.07-Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists. 15th Ed. Arlington, Virginia, USA.

- A.O.A.C. (1980). Moisture in Dried Fruits. In: Horowitz W, editor. Official Method of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 13th ed. Washington, D.C.: AOAC.
- Artés, F. (2000). Productos Vegetales procesados en fresco. En: Aplicación del frío en los alimentos. M. Lamúa. Mundi Prensa. Cap.5. pp 127-141.
- Artés, F. y Artés-Hernández, F. (2000). Innovaciones industriales en el procesamiento mínimo de frutas y hortalizas. CTC. Revista Agroalimentación e Industrias Afines. Vol. 7, pp 29-33.
- Arreola, S. y Rosas, M. (2007). Aplicación del vacío en la deshidratación osmótica de higos (*Ficus carica*). Revista Información Tecnológica. Vol. 18(2), pp 43-48.
- Askoy *et al.* (2003). Some Significant Results of the Research-work in Turkey on Fig. Acta Hortic. No. 605, pp173-181.
- Ashwell, M. (2001). Functional Foods: A Simple Scheme for Establishing the Scientific Basis for all Claims. *Public Health Nutrition*. Vol. 4, pp 859-863.
- Atil, H. y Unver Y. (2000). A different Approach of Experimental Design: Taguchi Method. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. Vol. 3(9), pp 1538-1540.
- Axtell B.L.A y Russell, A. (2000). Small Scale Drying of Foods. Blackie Academic and Professional. London. pp 65-89.
- Axtell, B.L.A. y Bush, A. (1991). Tray Drying It-Case studies in the dissemination of tray drying technology. Intermediate Technology Publications, London.
- Baker(ed). Industrial Drying of Foods. Blackie Academic and Professional, London, pp 179-209.
- Barret *et al.* (2005). Processing Fruits. Second Edition. Science and Technology. CRC Press. Boca Raton. pp 4 – 22; 127-154.

- Barr, D.J. y Baker, C.J. (1997). Specialized drying systems. In: C.G.J.
- Bauernfeind, J.C. (1985). Antioxidant Function of L-Ascorbic Acid in Food Technology. *Int J Vitam Nutr Res*. Vol 27, pp 307-333.
- Bendell, A. (1988). Introduction to Taguchi Methodology, Taguchi Methods: Proceedings of the European Conference; Elsevier applied Science. London, England. Pp 1- 14.
- Beveridge, T. y Weintraub, S.E. (1995). Effect of blanching pretreatment on color and texture of apple slice at various water activities. *Food Research International*. Vol. 28(1). pp 83-86.
- Bingham, D.R. (2002). A Class of Optimal Robust Parameter Designs. *Journal of Quality Technology*. Vol. 34 (3), pp 244-259.
- Botti, C. and Muchnik, E. (1998). Fig Production in Latin America. *Acta Hort.* (ISHS). 480:37-42
- Bolin *et al.* (1980). Fruit drying by solar energy. *CONFRUCTA*. Vol 25. pp 147 – 160.
- Bolin, H. R. y King, A.D. (1980). Figs; In tropical and subtropical fruits : composition, properties and uses. Nagy, S. and Shaw, P. E., Editors. AVI Publishing, Westport, Conn. Pp 492-505.
- Boonsupthip,W. y Heldman, D.R.(2007). Prediction of frozen food properties during freasing using product composition. *Journal of Food Science*. Vol. 72 (5), pp E254-E263.
- Box G. (1988). Signal-to-Noise Ratios, Performance Criteria, and Transformations. *Technometrics*. ASA & ASQ. Vol 30(1). WI, EUA.
- Bhatia, A.K. y Gupta, S.L. (1997). Solar drier for drying apricots. *Food and Science Technology*. Research and Industry, India Vol 21(3). Pp 188-191.

- Brekke, J.E. y Nury, F.S. (1964). Fruits, In Food Dehydration, Vol 2. VanArsdel, W.B. and Coply M.J. Eds., AVI Publishing, Westport, CT.
- Bright-See E y McKeown (1984). Eyssen Estimation "per capita" crude and dietary fiber supply in 38 countries *Am. Journal of Clinic Nutrition*. Vol. 39 (2):pp 821-829.
- Bryne, D. M. y Taguchi S. (1986). The Taguchi Approach to parameter Design. ASQC Quality Congress Transactions, Anaheim, CA, p 168.
- Campos, J.A. y Herrera, M. (1997). La flora introducida en el País Vasco. *Itinera Geobotánica*. Vol 10. pp 235-255.
- Canjura *et al.* (1991). Degradation kinetics of chlorophylls and chlorophyllides. *Journal of Food Science*. Vol 56, pp 1639-1643.
- Clary, C.D. *et al.* (2007). Improving grape quality using microwave vacuum drying associates whit temperature control. *Journal of Food Science*. Vol 71 (1). pp 23 -28.
- Carrol, N. *et al.* (1996). Predicting the cooling time for irregular shaped food products. *Journal of Food Process Engineering*. Vol 19. pp 385-401.
- Castro, M.S.; *et al.* (2008). Effect of thermal blanching and of high pressure treatments on sweet green and bell pepper fruits (*Capsicum annuum* L.). *Food Chemistry*. Vol 107. pp 1437 – 1449.
- Calvo C. y Duran, L. (1987). Temas en Tecnología de Alimentos: propiedades físicas II (ópticas y color). CYTED. Instituto Politecnico Nacional. Alfaomega. Mexico, D.F. Vol 1, pp 261-268
- Chessa *et al.* (1992). Growth and ripening of main-crop fig. *Advances in Horticultural Science*. Vol 6, pp 112-115.

- Chessa I. (1997). Postharvest Physiology and Storage of Tropical and Subtropical Fruits. Ed S.K. Mitra. CAB INTERNATIONAL 1997. pp 245-268.
- Corlett, D.A. y Brown M.H. (1980). pH and Acidity. Microbial Ecology of Foods, Vol. 1. Factors affecting the life and death of microorganisms. Ed ICMSF, pp 97, Academic Press, London.
- CONABIO (2002). Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad: Colecciones Botánicas.
(http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/50-morac5m.pdf)
- Crane, J.C. (1986). Fig. In: Monselise, S.P.(Ed), CRC Handbook of Fruitset and Development. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp 153-165.
- Crisosto, C. H., *et al.* (2002). FIGS: Postharvest Quality Maintenance Guidelines. Research & Information Center. Department of Pomology, University of California, Davis, CA ,EUA.
- Cumming, D.B. *et al.* (1981). The effect of an individual quick blanching method on ascorbic acid retention in selected vegetables. *J. Food Process Preserv.* Vol 5. pp 31-37.
- Cui *et al.* (2003). Dehydration of garlic slices by combined microwave vacuum and air drying. *Drying Tech.* Vol 21(7), pp 1173-1184.
- Del Caro, A. y Piga, A. (2008). Polyphenol composition of peel and pulp of two Italian fresh fig fruits cultivars (*Ficus carica* L.). *Eur Food Res Technol.* Vol. 226, pp 715-719.
- Delgado, A.E., *et al.* (2006). Thermal Physical Properties of Foods, In: Thermal Food Processing. New Technologies and Quality Issues. CRC press. Taylor & Francis.

- Durán-Ramírez, F.(2006). Manual del Ingeniero en Alimentos. 1er Tomo. Ed. DIMAS. México.
- Demirbüker, D.S. *et al.* (2004). Potential application of hot rehydration alone or in combination with hydrogen peroxide to control pectin methylesterase activity and microbial load in cold-stored intermediate-moisture sun-dried figs. *Journal of Food Science*. Vol 69 (3). pp FCT170- FCT178.
- Emadi, B. *et al.* (2007). Abrasive peeling of pumpkin. *Journal of Food Engineering*. Vol (79). Pp 647-656.
- ERS-USDA (2004). Commodity Highlight: Figs. Fruit and Tree Nuts Outlook/FTS-309/March 30,2004.
- Esparza *et al.* (2006). Effects of Ascorbic Acid applied by two hydrocooling methods on physical and chemical properties of green leaf lettuce stored at 5°C. *Journal of Food Science*. Vol 71(3), pp S270-S276.
- EUFIC (2006). Functional Food Science in Europe. *British Journal of Nutrition*. Vol. 80(1), pp S1 - S193.
- FAO (1993). Prevención de pérdidas de alimentos poscosecha: frutas, hortalizas, raíces y tubérculos. Manual de Capacitación. Colección FAO: Capacitación, No. 17/2. Roma, Italia.
- FDA (2000). Sulfites: An important Food Safety Issue, from Food Safety Magazine August/Septemeber 2000. U.S. Food and Drug Administration, Center for Safety and Applied Nutrition FDA/IFIC Brochure.
- FDA (2001). United States Standards for Grades of Dried Figs. Section 52.1021 – 52.1030. United States Departament of Agriculture/Processed Products Branch. Pp 1-12.
- Fennema, O.R. (1985). Water and ice. Food Chemistry Second Edition. Ed Marcel Dekker Inc, New York.

- Fellows, P.J. (2000). Food Processing Technology: Principles and Practice, Second Edition. CRC Press. Cambridge, England.
- Fisher, A.A. (1989). Reaction to Sulfites on Foods: delayed eczematous and immediate urticarial, anaphylactoid and asthmatic reactions. Part III. *Cutis*, Vol.44, pp 187-190.
- Fowlkes, W.Y. y Creveling, C.M. (1995). Engineering Methods for robust product design. Addison Wesley, USA.
- Funebo, T. y Ohlsson, T. (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*. Vol 38, pp 252 – 267.
- Gallali, Y.M.; Abujnah, Y.S.; Bañan, F.K. (2000); Preservation of fruits and vegetables using solar drier: a comparative study of natural and solar drying, III; Chemical analysis and sensory evaluation data of the dried samples (grapes, figs, tomatoes and onions). *J. Renewable Energy*. Pergamon. Elsevier. Vol 19, pp 203-212.
- Gerald *et al.* (1995). Heated Ascorbic/Citric Acid Solution as Browning inhibitor for pre-peeled potatoes. *Journal of Food Science*. Vol 60(4), pp 762-766.
- Gould *et al.* (1991). Food preservatives, New York:AVI. 386p. [ICMSF] Intl. Commission on microbiological specifications for Foods. Sampling plants for dried foods. In: Microorganisms in foods. Toronto: Univ of Toronto Press, Vol.2, p110-118.
- Gowen, A.A. *et al.* (2006). Comparative study of quality changes occurring on dehydration and rehydration of cooked chickpeas(*Cicer Arietinum* L.) subjected to combined microwave-convective and convective hot air dehydration. *Journal of Food Science*. Vol 71(6). Pp 282 – 289.
- Grassi, G. (1997). In: Reda (ed) *Il Fico*, Bologna.
- Di Lorenzo, R. D. (1990). The Monetary Loss Function –or Why We need TQM. Proceedings of the International Society of Parametric Analysis, 12 th Annual Conference, San Diego California, pp 16-24.

- Dueñas *et al.* (2008). Anthocyanin composition in fig (*Ficus carica* L). *Journal of Food Composition and Analysis*. Vol 21, pp107-115.
- Hatano, K. *et al.* (2008); Investigation of chemical structure of nonprotein proteinase inhibitors from dried figs. *Food Chemistry*. Vol. 107. pp 305-311.
- Hayakawa, K. y Timbers, G.E. (1977). Influence of heat treatment on the quality of vegetables: changes in visual green color. *Journal of Food Sciences*. Vol. 42, pp 778-791.
- Heldman, R.B. y Lund D.B. (2007). Handbook of Food Engineering: principles and practice. Second Edition. CRC Press. Cambridge, England.
- Hutchings. J.B. (1994). Food Colour and Appearance. London: Blackie Academia and Professional Publication.
- Ibarz, A. (2003). Unit operations in Food Engineering. CRC Press, Boca Raton, Fl. pp 491 -573.
- Jennings, W.G. (1976). Volatile components of figs. *Food Chemistry*. Vol 2. pp 185-191.
- Kackar, Raghu (1985). Off-Line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method. *Journal of Quality Technology*. Vol. 17. No. 4, pp. 176-188.
- Kader, A.A. (1992). Postharvest Technology of Horticultural Crops. 2nd. Ed. Publication 3311. University of California. Division of Agriculture and Natural Resources.
- Kays, S.J. (1991). Postharvest Physiology of Perishable Plant Products. Ed. AVI. USA.

- Kaymay, F. y Sultanoglu, M. (2000). Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apple. *Journal of Food Engineering*. Vol 46. pp 246-247.
- Karathanos, V.T. y Belessiotis, V.G. (1999). Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *Journal of Agricultural Engineering Research*. Vol 74, pp 355-361.
- Karmas, E. (1980). Thechniques for measurement of moisture content of food. *Journal of Food Technology*. Vol 34 (4), pp 52.
- Kackar, Raghu (1985). Off -Line Quality Control, Parameter Design and Taguchi Method. *Journal of Quality Technology*. Vol 17, No. 4, pp 176-188.
- Kingsly, R.P. *et al.* (2007). Effects at pretreatments and drying air temeperature on drying behaviour of peach slice. *International Journal of Food Science and Technology*. Vol 42, pp 65 – 69.
- Kim W.J. y Cho, J.S. (1999). Stabilization of ground garlic color by cysteine, ascorbic acid, trisodium phosphate and sodium metabisulfite. *Journal of Food Quality*. Vol. 22, pp 681-691.
- Kramer, A. y Twigg, B.A. (1970). Quality Control for the Food Industry, 3rd ed. New York. Van Nostrand Reinhold Co. pp 15-32
- Kulkarni, S.G. *et al.* (2008). Effect of Dehydration on the quality and storange stability of immature dates (*Pheonix dactylifera*). *Elsevier Science Direct*. LWT Vol 41, pp 278-283.
- Labuza, T.P. (1980). The effect of water activity on reaction kinectics of food deterioration. *Journal of Food Technology*. Vol 34 (4), pp36.
- Lunning, P.A., *et al.* (1994). Combined Instrumental and Sensory Evaluation of Flavor of fresh bell pepper (*Capsicum annuum*) harvest at three maturation stages. *Journal of Agriculture and Food Chemestry*. Vol 42, pp 2855 – 2861.

- López, A. *et al.* (2000). Thin-layer drying behaviour of vegetable wastes from wholesale market. *Drying Technology*. Vol 18, 995-1006.
- Lian, G. *et al.* (1997). Couple heat and moisture transfer during microwave vacuum drying. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. Vol 32. pp 34 – 44.
- Linné, Carl von. (1753). *Species Plantarum: Ficus carica L.* Ed. Laurentii Salvii. Vol 2. pp 1059-1753.
- Lianju *et al.* (2003). The production and research of Fig (*Ficus carica L.*) in China. *Acta Hortic.* 605, pp 191-196.
- Maupoey, P.F. *et al.* (2001). Utilización de técnicas combinadas de deshidratación en la preparación de nuevos productos de frutas. *Alimentaria: Revista de tecnología e higiene de los alimentos*. Nº 320, pp. 113-118.
- Mazza, G. y Maguer, M.L. (1980). Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. *Journal of Food Technology*. Vol 15, pp 181-194.
- MINITAB 14 (2003). Minitab ® Release 14.1 Statistical Software. Facultad de Ingeniería Ensenada. Universidad Autónoma de Baja California. México.
- Miranda, O. y Battistella, M. (2000). El mercado del higo para consumo fresco: tendencias recientes. *Fruticultura Profesional*. Vol. 125, pp 47 – 59.
- Montoya-Ballesteros, L.C. (1991). Elaboración del jugo de manzana (*malus pulima*) con variedades cosechadas en el Estado de Sonora. Tesis para optar por el grado de maestro en ciencias por el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Hermosillo, Sonora. México. Tesis no publicada.

- Moon S y Lin-Chan E.C. (2004). Development af solid-phase microextraction methodology for analysis of headspace volatile compounds in simulated beef flavor. *Food Chemistry*. Vol 88, pp 141-149.
- Montgomery, D. (2005). Diseño y análisis de experimentos. Segunda Edición. LIMUSA-WILEY. México.
- Moshenin, N.N. (1980). Thermal Properties of Foods and Agricultural Products. New York. Gordon and Breach, pp 25 – 196.
- Nair *et al.* (1992). Taguchi's parameter design: A panel Discussion. *Technometrics*. Vol. 34. pp 127-161.
- Nair, V.N. y Pregibon, D. (1986). A data análisis strategy for quality engineering experiment. *AT&T Technical Journal*. Vol 65, pp 73 -84.
- Nanke, K.E., Sebranek y J.G., Olson, D.G. (1999). Color characteristic of irradiated aerobically packaged pork, beff and turkey. *Journal of Food Science*. Vol 64. pp 272-278.
- Nemets, B. *et al.* (2002). Addition of Omega-3 Fatty Acid to Maintenance Medication Treatment for Recurrent Unipolar Depressive Disorder. *American Journal of Psychiatry* .Vol.159, No. 3, pp 477-479.
- Ngo *et al.* (2007). Color quality of oregon strawberries-impact of genotype, composition and processing. *Journal of Food Science*. Vol 72(1), pp C25-C32.
- Okos, M.R. *et al.* (2007). Food Dehydration Chap 10 in: Handbook of Food Engineering: principles and practice. Second Edition. CRC Press. Cambridge, England.
- Oliveira, M.E.C y Franca A.S. (2002). Microwave heating of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*. Vol 53(4). pp 347-359

- Ough, C.S. (1993). Sulphur dioxide and sulphites. In: Davidson P.M., Larry A, Edt. *Antimicrobials in Foods*. New York: Marcel Dekker. P 137-190.
- Ozkan, M. y Cemeroglu, B. (2002). Desulfiting dried apricots by hydrogen peroxide. *Journal of Food Science*. Vol 67(5), pp 1631 -1635.
- Ordoñez, P. J. (1998). *Tecnología de los Alimentos Vol 1: Componentes de los Alimentos y procesos*. Editorial Síntesis
- Oztekin, *et al.* (1999). Crop drying programme in Turkey. *Renewable Energy*. Vol 16, pp 789-794.
- Papoff, C.M. *et al.* (1998). The influence of industrial dehydration on quality of fig fruits. *Acta Hort (ISHS)* 480: 233-238.
- Parag S.S. y Singhal, R.S. (2007). Optimization of nutritional requirements and feeding strategies for clavulanic acid production by *Streptomyces clavuligerus*. *Bioresource Technology*. Vol. 98. pp2010-2017.
- Petri *et al.* (2008). Effect of preservative agents on the respiration rate of minimally processed potato (*solanum tuberosum* cv. Monalisa). *Journal of Food Science*. Vol 73(3), pp C122-126.
- Piga, A. *Et al.* (2004). Hot air dehydration of figs (*Ficus carica* L.): drying kinetics and quality loss. *International Journal of Food Science and Technology*. Vol 39. pp 793-799.
- Pignatiello, J.J. y Ramberg, J.S. (1991). Top ten triumphs and tragedies of Genichi Taguchi. *Quality Engineering*. Vol. 4. pp 211-215
- Phadke, S.M. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, N.J.
- Latapi, G. y Barret, D.M. (2006). Influence of pre-drying treatments on quality and safety of sun-dried tomatos. Part I: Use of steam blanching, boiling brine blanching, and dips in salt or sodium metabisulfite. *Journal of Food Science*. Vol 71 (1), pp S24 –S31.

- Limón-Romero, J. (2004). Determinación de las condiciones óptimas de operación en el proceso de deshidratación del ajo (*Allium sativum* L.) a través de la aplicación del Método Taguchi. Tesis para optar por el grado de maestro en ciencias por el Instituto Tecnológico de Hermosillo, Sonora. México. Tesis no publicada.
- Rahman, M.S. y Perera, C.O. (1999). Drying and Food Preservation. In: M.S. Rahman (ed). Handbook of Food Preservation. Marcel Dekker, New York, pp 173-216.
- Rao, M.A. (1997). Engineering properties of Food; current status. In: P. Fito, E, Ortega-Rodriguez, G.V. Barbosa-Cánovas, Eds. Food Engineering 2000. Nwey York: Chapman & Hall, pp 39-54.
- Ratti, C. y Mujumdar, A. (2005). Drying of Fruits, In: Processing Fruits. Second Edition. Science and Technology. CRC Press. Boca Raton. Pp 127-154.
- Ratti C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*. Vol 49, pp 311 – 319.
- Rito, M.A., (1990). Diseño del producto y optimización del proceso de deshidratación del ajo (*Allium sativum* L.) con la metodología de ingeniería de calidad. Revista Ecológica BOTAM. Vol. 2. No. 1
- Rivera-Esparza *et al.* (2006). Effects of Ascorbic Acid Applied by two hydrocoolling methods on physical and chemical properties of green leaft lettuce stored at 5°C. *Journal of Food Science*. Vol 71 (3), pp S270 – S276.
- Rodrigo *et al.* (1991). Quality of canned mushroom acidified with glucano-lactone. *International Journal of Food Sciene and Technology*. Vol. 34, pp 161-166.

- Rocha *et al.* (1993). Effect of pre-treatments and drying conditions on drying rate and color retention of basil. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*. Vol 26, pp 456-463.
- Roy *et al.* (2001). Texture and histological structure of carrots as affected by blanching and freezing condition. *Journal of Food a Science*. Vol. 66, pp 176-180.
- Ruiz, D.G. *et al.* (2003). Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. *Innov. Food Scu Emerg Tech*. Vol 4(2). Pp 203 -209
- Rutishauser H.E. (1985). Estimation of dietary fiber supply Am. *Journal of Clinic Nutrition*. Vol 41 (4), pp 824-6.
- Ryall, A.L. y Pentzer, W.T. (1982). Handling, Transportation and Storage of Fruits and Vegetables . Vol 2, Fruit and Tree Nuts. VI Publishing, Westport, Connecticut .
- Sanchez, S.M. (2000). Robust Design: seeking the best of all possible worlds. From Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference.
- Sally F. *et al.* (2002). Development of a Glycemic Index Database for Dietary Assessment. Nutrition Cordinating Center, Universty of Minnesota. (www.unc.umn.edu).
- Salunkhe D. K. y Kadam S.S. (1995). Handbook of Fruit Science and Technology: Production, Composition, Storage. Fig: U.T. Desai and P.M. Kotecha. CCP Press. Marcel Dekker Inc. New York – Basel.
- Salunkhe D. K. y Desai S.S. (1995). Postharvest Biotechnology of Fruits. Vol II. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida. Pp 49 – 78.
- Sapers, G.M. (1993). Browning of foods: control by sulfites, antioxidants, and others means. *Food Technology*. Vol. 47, pp 75-84.

- Selman, J.D (1987). The blanching process. In: S.Thorne (ed) Developments in Food Preservation, Vol 4. Elsevier Applied Science, Barking, Essex, pp 205-249.
- Shewfelt, R.L. (1999). What is Quality?. *Postharvest Biology and Technology*. Vol 15. pp 197-200.
- Sharma, G.P. y Prasad, S. (2001). Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*. Vol 50, pp 99 – 105.
- Silva, C.M.L. (1997). Optimization of Thermal Processing Conditions; Effect of reaction type of kinetics. Paper presented at proceedings of the Conference on Modeling of Thermal Properties and Behavior Foods during production, storage and distribution. Prague, Czech Republic.
- SIAP, (2006). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera: Anuario Estadístico de la Producción Agrícola 2006. (www.siap.gob.mx)
- Sfikas, G. (1993). Trees and shrubs of Grece. Efsthadiadis Group D.A. Atenas, pp 213.
- Smout *et al.* (2003). Non-uniformity in lethality and quality in thermal process optimization: a case study on color degradation of green peas. *Journal of Food Sciences*. Vol. 68, 545-550.
- Sun, Da-Wen (2006). Thermal Food Processing. New Technologies and Quality Issues. CRC press. Taylor & Francis.
- Sullivan, L.P. (1987). The power of Taguchi Methods. Quality Progress, June, pp 76-79.
- Steet, J.A. y Tong, C.H. (1996). Degradation kinetics of green color and chlorophyll in peas by colorimetry and HPLC. *Journal of Food Science*. Vol. 61, pp 924 -927.

- Stoll, A. L. (1999). Omega 3 Fatty Acids in Bipolar Disorder. *Arch Gen Psychiatry*. Vol. 56, pp 407-412
- Stover, E. *et al.* (2007). The Fig: Overview of an Ancient Fruit. *HortScience*. Vol.42(5), pp 1083-1087
- Taguchi, G. (1986). Introduction to Quality Engineering. Asian Productivity Organization (Distributed by American Supplier Institute Inc., Dearborn, MI.)
- Taguchi, G. y Konishi, S. (1987). Orthogonal Arrays and Linear Graphs. American Supplier Institute, Inc. Dearborn, MI.
- Taguchi, G. *et al.* (2004). Computer-Based Robust Engineering: Essential for DFSS. Quality Press, ASQ Org. Milwaukee, WI.
- Takeshita S. y Hosokawa T. (2007). Achieving Robust Designs through Quality Engineering: Taguchi Method. *FUJITSU Science Technology Journal*. Vol. 34(1), pp105 -112.
- Tasirin, S.M. *et al.* (2007). Optimization of drying parameters of bird's eye chilli in a fluidized bed dryer. *Journal of Food Engineering*. Vol 80. pp 695-700.
- Taylor S.L. y Bush, R.K. (1986). Sulfites: A Tecnical and Scientific Review. International Food Additives Council.
- Teicholz, E. y Orr, J. (1987). Computer Integrated Manufacturing Handbook. McGraw Hill, New York , N.Y.
- Tosun, N. y Delen, N. (1998). Minimising of contamination of aflatoxigenic fungi and subsecuent aflatoxin development in fig orcardes by fungicides. *Acta Horticulturae*, 480, pp 193-197.

- USDA (2004). National Nutrient Database for Standard Reference, Release 20.
(<http://www.ars.usda.gov/Main/docs.htm?docid=15869>)
- USDA, (2005). Animal and Plant Health Inspection Service, Fresh Fruit and Vegetable Import Manual 2005
(http://www.aphis.usda.gov/import_export/plants/manuals/ports/downloads/fv.pdf; World Bank, World Development Indicators 2005)
- Unal y Dean (1991). Taguchi approach to design optimization for quality and cost; an overview. Annual Conference of the International Society of Parametric Analysis.
- USDA (2004). United States Department of Agriculture, Commodity Specification. Dried Fruit. Section FV307-CSI. In: Marketing and Regulatory Programs. pp 4-29.
- USDA (2001). United States Standards for Grades of Dried Figs, Section 52.1028. In: United States Department of Agriculture. Pp 7.
- Unal, R. y Dean, E.B. (1991); Taguchi Approach to Design Optimization for Quality and Cost: an Overview. Presentes at the Annual Conference of International Society of Parametric Analysis.
- Valdés, M. S. (2006). Alimentos Funcionales: panorama y tendencias futuro de los alimentos funcionales en México. Congreso Internacional CIAO 2006.
- Vinson, J.A. (1999). The Functional Food Properties of Figs. Cereal Foods World, Vol. 44, No. 2.
- Vinson, J.A. *et al.* (2005). Dried fruits: Excellent in Vitro and in Vivo Antioxidants. *J.Am.Coll. Nutr.* Vol 24, pp 44 – 50
- Wille, R. (1990). Landing Gear Weight Optimization using Taguchi Analysis. Paper presented at the 49th Annual International Conference of Society of Allied Weight Engineers Inc., Chandler, AR.

- Wills et al (1989). Postharvest: An Introduction to the Physiology and Handling of Fruits and Vegetables. Ed. AVI. USA
- Watanabe *et al.* (1979). Effect of dietary alfalfa, pectin and wheat bran on azoxymethane or methylnitrosourea induced colon carcinogenesis in F344 rats. *J Nat Cancer Intest.* Vol. 63, pp141-145.
- Whitaker, J.R. (1994). Principles of Etimology for the Food Sciences. New York:Marcel Dekker. Pp 615-621.
- Xanthopoulos, G. *et al.*.(2007). Applicability of a single-layer drying model to predict the drying rate of whole figs. *Journal of Food Engineering.* Vol. 81, pp 553-559.
- Young, K.W. y Whittle, K.J. (1985). Colour measurement of fish minces using Hunter L,a,b values. *Journal of Science of Food and Agriculture.* Vol 36. pp 383-392.