

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**OPCIÓN I.- TESIS**

**TRABAJO PROFESIONAL**

“Proceso de secado por aspersion de pulque  
proveniente de *Agave salmiana*”.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

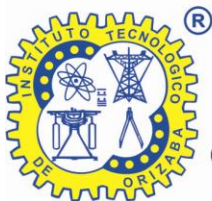
*I.Q. Yesenia Núñez Galindo*

DIRECTOR DE TESIS:

*Dra. Guadalupe Luna Solano*

CODIRECTOR DE TESIS:

*Dra. Yolanda Sonia Pliego Bravo*





"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA: 22/01/2016  
DEPENDENCIA: POSGRADO  
ASUNTO: Autorización de Impresión  
OPCIÓN: I

**C. YESENIA NUÑEZ GALINDO**  
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:  
**CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA**

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**"PROCESO DE SECADO POR ASPERSIÓN DE PULQUE PROVENIENTE DE AGAVE SALMIANA".**

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

  
**M. C. MA. ELENA GARCÍA REYES**  
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ggc





"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA : 19/01/2016

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES  
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACION.  
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

YESENIA NUÑEZ GALINDO

la cual lleva el título de:

"PROCESO DE SECADO POR ASPERSIÓN DE PULQUE PROVENIENTE DE AGAVE SALMIANA".

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DRA. GUADALUPE LUNA SOLANO

SECRETARIO : DRA. YOLANDA SONIA PLIEGO BRAVO

VOCAL : DR. DENIS CANTU LOZANO

VOCAL SUP. : DRA. ROSALIA CERECERO ENRIQUEZ

FIRMA  
  
FIRMA  
  
FIRMA  
  
FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

OPCION: I Tesis



## DEDICATORIAS

*A Dios por acompañarme día a día en mi camino, por darme fortaleza para levantarme y luchar por cada uno de mis sueños, por iluminar mi mente cada vez que lo he necesitado y por haberme rodeado de personas que son muy valiosas en mi vida.*

*A mi pequeño Sebastián, por ser la luz de mi vida y haber compartido conmigo estos dos años de lucha. Tú eres mi mayor motivación porque cuando digo que ya no puedo más, una simple sonrisa me da esa fuerza que necesito para seguir adelante y me has enseñado a darle un nuevo significado a cada pequeña cosa.*

*A Celina y Juan, mis padres que han sido todos estos años un ejemplo de vida, porque me han enseñado a luchar por cada uno de mis sueños y a levantarme cada vez que caído, por ser mis pilares y estar siempre a mi lado y darme la oportunidad de estar con ustedes compartiendo esta nueva etapa de mi vida.*

*A mi esposo Alejandro, por darme la oportunidad de seguir con mi preparación, por tener confianza en mí y por estos años de ausencia los cuales no han sido fáciles. Por haberme enseñado que en esta vida hay que ser pacientes y que todo tiene su tiempo y momento.*

*A mis amigos y compañeros de laboratorio, Cinthia, Alfredo, Mauricio, Citlali, Pati, Alejandra y Rosy, por su compañía y haber hecho que el tiempo fuera relativo, por sus enseñanzas y cada momento agradable que pasamos. Gracias por la bonita amistad y saben que cuando lo necesiten podrán contar conmigo.*

*A Gabi, por ser mi hermana por decisión, por estar conmigo en momentos difíciles aunque no compartimos espacio, pero si tiempo y porque tú solo entenderás que “dos electrones en un átomo no pueden tener los mismos valores para todos sus números cuánticos” y que eso marca la diferencia digna hija de Pauli.*

## AGRADECIMIENTOS

### ***Dra. Guadalupe Luna Solano***

*Muchas gracias por haber sido mi asesora y brindarme la oportunidad de realizar este trabajo con usted. Sus conocimientos, experiencia, consejos, manera de trabajar, paciencia y motivación han sido una parte fundamental para mi formación tanto profesionalmente como de manera personal, le expreso mi más grande admiración y estoy segura que logró inculcar en mí un sentido de sinceridad, disciplina y responsabilidad, por lo que le agradezco infinitamente su amistad y confianza.*

### ***Dra. Yolanda S. Pliego Bravo***

*Agradezco el tiempo que dedico a asesorarme, su contribución y el apoyo que me brinda para la realización de este proyecto.*

### ***Dr. Denis Cantú Lozano***

*Gracias por cada una de sus enseñanzas, las cuales quedaron muy marcadas en mi persona, por compartir cada uno de sus conocimientos y de sus anécdotas. Gracias por las aportaciones brindadas en la revisión de este proyecto.*

### ***Dra. Rosalía Cerecero Enriquez***

*Muchas gracias doctora por la confianza brindada a lo largo de este periodo, por su sinceridad y por cada una de las cosas que aprendí de usted las cuales contribuyeron en mi formación académica y personal. Gracias por sus aportaciones las cuales fueron muy valiosas y el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis.*

Esta tesis se desarrolló en el Instituto Tecnológico de Orizaba durante el periodo Enero 2014-Enero 2016. Las presentaciones en congresos y publicaciones que se obtuvieron de esta tesis se enlistan a continuación:

## PRESENTACIONES EN CONGRESOS

- |      |          |   |
|------|----------|---|
| 2015 | Poster   | Caracterización fisicoquímica del pulque proveniente del <i>Agave salmiana</i> . Jornadas de actualización en investigación y desarrollo de alimentos, Veracruz, México. 11-13 Febrero.   |
| 2015 | Ponencia | Proceso de secado por aspersion de pulque proveniente de <i>Agave salmiana</i> . XXX Congreso Nacional de Termodinámica, Pachuca, Hidalgo, México. 7-11 Septiembre.                       |
| 2015 | Poster   | Physicochemical characterization of pulque a traditional Mexican beverage from <i>Agave salmiana</i> . 29 <sup>th</sup> EFFoST International Conference. Atenas, Grecia. 10-12 Noviembre. |

## PUBLICACIONES

- |      |  |   |
|------|--|---|
| 2015 | Núñez-Galindo, Y., Pliego-Bravo, Y.S., Cantú-Lozano, D., Luna-Solano, G. | Proceso de secado por aspersion de pulque proveniente de <i>Agave salmiana</i> . Memorias del XXX Congreso Nacional de Termodinámica. Pachuca, Hidalgo, México. 7-11 Septiembre.  |
| 2015 | Núñez-Galindo, Y., Pliego-Bravo, Y.S., Cantú-Lozano, D., Luna-Solano, G. | Physicochemical characterization of pulque a traditional Mexican beverage from <i>Agave salmiana</i> . 29 <sup>th</sup> EFFoST International Conference. Atenas, Grecia. 10-12 Noviembre. ISBN 978-618-82196-1-8, p. 1030-1034. |

## RESUMEN

### Proceso de secado por aspersión de pulque proveniente de *Agave salmiana*

**Realizado por: I.Q. Yesenia Núñez Galindo**

**Dirigido por: Dra. Guadalupe Luna Solano**

**Dra. Yolanda Sonia Pliego Bravo**

El *Agave salmiana* se distribuye en los estados centrales de México y se cultiva para extraer aguamiel que al fermentarse se convierte en pulque, una bebida de bajo grado alcohólico. A diferencia de muchas bebidas alcohólicas el pulque contiene componentes nutrimentales, que son benéficos para la salud, sin embargo presenta el inconveniente de ser un alimento altamente perecedero. El secado por aspersión es una alternativa para la elaboración de productos en polvo que conservan sus características y componentes naturales. Por lo que el propósito de este trabajo fue aplicar el proceso de secado por aspersión al pulque proveniente del *Agave salmiana* y evaluar el efecto de las variables de proceso de secado sobre las características fisicoquímicas (contenido de humedad, actividad de agua, diferencia de color y rendimiento) del pulque en polvo. Un diseño ortogonal  $L_{16}4^4$  fue utilizado para el secado por aspersión del pulque. Los factores investigados fueron la procedencia del pulque (Veracruz, Puebla, México y Tlaxcala), temperatura del aire de entrada (160, 180, 200 y 220 °C), temperatura del aire de salida (80, 90, 100, 110 °C) y adición de maltodextrina (5, 10, 15 y 20 %). El análisis estadístico (nivel de confianza del 90 %) indicó que la procedencia del pulque, la temperatura de aire de entrada, la temperatura de aire de salida y el contenido de maltodextrina no muestran un efecto significativo sobre el contenido de humedad ( $X$ ), la actividad de agua ( $a_w$ ) y la diferencia de color ( $\Delta E$ ). Los valores de  $a_w$  y  $X$  fueron inferiores a 0.6 y 10 % respectivamente, lo que asegura que el pulque en polvo es un producto estable y no presentará crecimiento de microorganismo ni habrá desarrollo de reacciones deteriorativas. La procedencia del pulque afecta significativamente el rendimiento. Los resultados fueron representados con modelos de superficie de respuesta. Las condiciones óptimas del proceso de secado fueron: pulque procedente del estado de México, 183 °C, 84 °C y 5 % de maltodextrina. Con estas condiciones óptimas de secado, el pulque en polvo presenta:  $X$  de 0.936 %,  $a_w$  de 0.227,  $\Delta E$  de 19.30 y un rendimiento del 73.6 %. Además el pulque en polvo contiene 1.1955 % de cenizas, 47.3 mg de calcio y 38.06 mg de ácido ascórbico.

## ABSTRACT

### Spray drying process of pulque from *Agave salmiana*

**By: I.Q. Yesenia Núñez Galindo**

**Advisors: Dra. Guadalupe Luna Solano**

**Dra. Yolanda Sonia Pliego Bravo**

The *Agave salmiana* is distributed in the central states of Mexico and is cultivated to extract the fermented mead becomes pulque, a drink low alcohol content. Unlike many pulque alcoholic beverages containing nutritional components that are beneficial for health, but has the disadvantage of being a highly perishable food. Spray drying is an alternative for the production of powder products retain their natural features and components. The aim of this work was to apply the spray drying process of pulque from *Agave salmiana* and evaluate the effect of process variables of drying on the physicochemical characteristics (moisture content, water activity, color difference and yield) of pulque powder. An orthogonal design  $L_{16}4^4$  was used for the spray drying of pulque. The factors investigated were the source of pulque (Veracruz, Puebla, Tlaxcala and Mexico), inlet air temperature (160, 180, 200 and 220 °C), output air temperature (80, 90, 100, 110 °C) and addition of maltodextrin (5, 10, 15 and 20 %). Statistical analysis (90 % confidence level) indicated that the origin of pulque, the inlet air temperature, the outlet air temperature and maltodextrin content show no significant effect on moisture content (X), activity water ( $a_w$ ) and color difference ( $\Delta E$ ). The values of  $a_w$  and X were below 0.6 and 10% respectively, ensuring that pulque powder product is stable and does not present microorganism growth or development will deteriorative reactions. The origin of pulque significantly affect yield. The results were represented with response surface models. The optimum drying conditions were: pulque of Mexico, 183 °C, 84 °C and 5 % of maltodextrin. With these optimum drying conditions, pulque powder has a X of 0.936%,  $a_w$  of 0.227,  $\Delta E$  of 19.30, yield of 73.6%, 1.1955% of ash, 47.5 mg of calcium and 38.06 mg of ascorbic acid.



## ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b>	
<b>ABSTRACT</b>	
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	v
<b>LISTA DE TABLAS</b>	ix
<b>NOMENCLATURA</b>	xi
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	3
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	4
<b>CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>5</b>
1.1 Generalidades del pulque	6
1.1.1 Origen y taxonomía del género <i>Agave</i>	8
1.1.2 Descripción botánica	9
1.1.2.1 <i>Agave salmiana</i>	10
1.2 Proceso de elaboración del pulque	12
1.2.1 Composición y valor nutricional	15
1.2.1.1 Ácido ascórbico (Vitamina C)	17
1.2.1.2 Calcio	18
1.2.2 Producción anual y aplicaciones del pulque	19
1.3 Proceso de secado	20
1.3.1 Secado por aspersion	22
1.3.2 Etapas del proceso de secado por aspersion	23
1.3.2.1 Calentamiento del aire de secado	24

1.3.2.2	Atomización del alimento en partículas finas	24
1.3.2.3	Contacto del aire caliente con las partículas atomizadas	25
1.3.2.4	Secado de las gotas	25
1.3.2.5	Recolección del producto seco	26
1.4	Encapsulación	27
1.4.1	Materiales de pared	28
1.4.1.1	Maltodextrinas	28
1.5	Propiedades fisicoquímicas de los alimentos	29
1.5.1	Actividad de agua ( $a_w$ )	30
1.5.2	Humedad (X)	32
1.5.3	Color ( $L$ , $a$ y $b$ )	33
1.6	Diseño de experimentos	35
1.7	Estudios realizados sobre secado por aspersión	36
 <b>CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS</b>		 39
2.1	Metodología general	40
2.2	Selección de la materia prima	41
2.3	Acondicionamiento de la muestra	41
2.4	Proceso de secado	42
2.4.1	Secado por aspersión	42
2.5	Diseño de experimentos	44
2.6	Caracterización fisicoquímica del pulque	46
2.6.1	pH	46
2.6.2	Humedad y sólidos totales	47
2.6.3	Actividad de agua	47
2.6.4	Análisis de color	48
2.6.5	Densidad	48

2.6.6 Determinación de proteínas	49
2.6.7 Determinación de cenizas	50
2.7 Calculo del rendimiento	50
2.8 Optimización del proceso de secado por aspersión de pulque	51
2.9 Validación de los puntos óptimos	52
2.9.1 Contenido de calcio	52
2.9.2 Contenido de ácido ascórbico (Vitamina C)	53
<b>CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>55</b>
3.1 Caracterización fisicoquímica del pulque	56
3.2 Secado por aspersión del pulque	58
3.2.1 Humedad y actividad de agua del pulque	58
3.2.1.1 Análisis estadístico del contenido de humedad	60
3.2.1.2 Superficies de respuesta del contenido de humedad final	60
3.2.1.3 Análisis estadístico de la actividad de agua	67
3.2.1.4 Superficies de respuesta de la actividad de agua final	68
3.2.2 Parámetros de color del pulque	74
3.2.2.1 Análisis estadístico para los parámetros de color	75
3.2.3 Diferencia de color	76
3.2.3.1 Análisis estadístico de la diferencia de color	78
3.2.3.2 Superficies de respuesta para la diferencia de color final	78
3.2.4 Rendimiento del pulque	84
3.2.4.1 Análisis estadístico del rendimiento	85
3.2.4.2 Superficies de respuesta para el rendimiento final	86
3.3 Optimización del proceso de secado	92
3.3.1 Análisis de las gráficas de contorno	93
3.4 Validación de los puntos óptimos	99

3.5 Cuantificación de cenizas, calcio y ácido ascórbico	101
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	102
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	106

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Pág.
1.1	(a) <i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm y (b) Morfología	11
1.2	Distribución en México del <i>Agave salmiana</i>	12
1.3	Proceso de obtención del aguamiel y pulque	14
1.4	Etapas del proceso de secado por aspersion	23
1.5	Características de las gotas sometidas a proceso de secado	26
1.6	Formula estructural de la maltodextrina	29
1.7	Tasa de reacciones químicas y bioquímicas en función del $a_w$	32
1.8	Diagrama Hunter $L, a, b$	34
2.1	Metodología general del proceso de secado por aspersion del pulque	40
2.2	Muestras de pulque fresco	41
2.3	Mini Spray Dryer modelo B-290	43
3.1	Pulque y diagrama de Hunter $L, a, b$	57
3.2	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del contenido de humedad como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de entrada	62
3.3	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del contenido de humedad como una función de la procedencia del pulque y el contenido de maltodextrina	63
3.4	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del contenido de humedad como una función de la temperatura de aire de entrada y la temperatura de aire de salida	64
3.5	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del contenido de humedad como una función de la temperatura de aire de salida y el contenido de maltodextrina	64

<b>3.6</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del contenido de humedad como una función de la procedencia del pulque y la temperatura del aire de salida	65
<b>3.7</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del contenido de humedad como una función de la procedencia del pulque y de la temperatura del aire de salida	65
<b>3.8</b>	Gráfica de distribución normal de residuos de la variable de respuesta contenido de humedad	66
<b>3.9</b>	Gráfica de residuos vs valores ajustados de la variable de respuesta contenido de humedad	67
<b>3.10</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la actividad de agua como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida	70
<b>3.11</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la actividad de agua como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida	70
<b>3.12</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la actividad de agua como una función de la procedencia del pulque y el contenido de maltodextrina	71
<b>3.13</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la actividad de agua como una función de la temperatura de aire de entrada y la temperatura de aire de salida	71
<b>3.14</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la actividad de agua como una función de la temperatura de aire de entrada y el contenido de maltodextrina	72
<b>3.15</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la actividad de agua como una función de la temperatura de aire de salida y el contenido de maltodextrina	72
<b>3.16</b>	Gráfica de distribución normal de residuos de la variable de respuesta actividad de agua	73

<b>3.17</b>	Gráfica de residuos vs valores ajustados de la variable de respuesta actividad de agua	73
<b>3.18</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la diferencia de color como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de entrada	80
<b>3.19</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la diferencia de color como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida	81
<b>3.20</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la diferencia de color como una función de la temperatura de aire de entrada y la temperatura de aire de salida	81
<b>3.21</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la diferencia de color como una función de la temperatura de aire de salida y el contenido de maltodextrina	82
<b>3.22</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la diferencia de color como una función de la procedencia del pulque y el contenido de matodextrina	82
<b>3.23</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la diferencia de color como una función de la temperatura de aire de entrada y el contenido de matodextrina	83
<b>3.24</b>	Gráfica de distribución normal de residuos de la variable de respuesta diferencia de color	83
<b>3.25</b>	Gráfica de residuos vs valores ajustados de la variable de respuesta diferencia de color	84
<b>3.26</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del rendimiento como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de entrada	88
<b>3.27</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del rendimiento como una función de la temperatura de aire de entrada y la temperatura de aire de salida	88

<b>3.28</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del rendimiento como una función de la temperatura de aire de entrada y el contenido de maltodextrina	89
<b>3.29</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del rendimiento como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida	90
<b>3.30</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del rendimiento como una función de la procedencia del pulque y el contenido de maltodextrina	90
<b>3.31</b>	(a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del rendimiento como una función de la temperatura de aire de salida y el contenido de maltodextrina	91
<b>3.32</b>	Gráfica de distribución normal de residuos de la variable de respuesta rendimiento	92
<b>3.33</b>	Gráfica de residuos vs valores ajustados de la variable de respuesta rendimiento	92
<b>3.34</b>	Región óptima obtenida después de superponer las gráficas de contornos de las respuestas como función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de entrada	94
<b>3.35</b>	Región obtenida después de superponer las gráficas de contornos de las respuestas como función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida	94
<b>3.36</b>	Región obtenida después de superponer las gráficas de contornos de las respuestas como función de la procedencia del pulque y el contenido de maltodextrina	95
<b>3.37</b>	Región factible obtenida después de superponer las gráficas de contornos de las respuestas como función de la temperatura de aire de entrada con la temperatura de aire de salida	96



<b>3.38</b>	Región factible obtenida después de superponer las gráficas de contornos de las respuestas como función de la temperatura de aire de entrada con el contenido de maltodextrina	97
<b>3.39</b>	Región factible obtenida después de superponer las gráficas de contornos de las respuestas como función de la temperatura de aire de entrada con el contenido de maltodextrina	98

## LISTA DE TABLAS

Tabla		Pág.
1.1	Clasificación y taxonomía del genero <i>Agave</i>	9
1.2	Contenido de aminoácidos y vitaminas en el pulque tradicional, pulque de planta piloto e industrial	16
1.3	Composición química del pulque por región	17
1.4	Características químicas y fisicoquímicas del pulque en 100 mL	17
1.5	Producción de pulque en miles de litros para 2014	20
2.1	Factores y niveles para el diseño de experimentos ortogonal $L_{16}4^4$ del proceso de secado por aspersion del pulque	44
2.2	Datos codificados para el diseño de experimentos ortogonal $L_{16}4^4$	45
3.1	Caracterización fisicoquímica del pulque	56
3.2	Valores experimentales para la variable de respuesta $X$ y $a_w$	59
3.3	Análisis de varianza de la variable de respuesta contenido de humedad	60
3.4	Análisis de varianza de la variable de respuesta contenido de humedad	61
3.5	Análisis de varianza de la variable de respuesta actividad de agua	67
3.6	Análisis de varianza para el modelo de segundo orden de la variable de respuesta actividad de agua	68
3.7	Valores experimentales para la variable de respuesta $L$ , $a$ , $b$	74
3.8	Análisis de varianza de la variable de respuesta parámetro de color ( $L$ , $a$ y $b$ )	76
3.9	Valores experimentales para la variable de respuesta $\Delta E$	77
3.10	Análisis de varianza de la variable de respuesta diferencia de color	78

<b>3.11</b>	Análisis de varianza para el modelo de segundo orden de la variable de diferencia de color	79
<b>3.12</b>	Valores experimentales para la variable de respuesta R	85
<b>3.13</b>	Análisis de varianza de la variable de respuesta rendimiento	86
<b>3.14</b>	Análisis de varianza para el modelo de segundo orden de la variable de diferencia de color	86
<b>3.15</b>	Valores óptimos estimados para las variables de respuesta en función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de entrada	93
<b>3.16</b>	Valores factibles estimados para las variables de respuesta en función de la temperatura de aire de entrada y la temperatura de aire de salida	96
<b>3.17</b>	Valores factibles estimados para las variables de respuesta en función de la temperatura de aire de entrada y contenido de maltodextrina	97
<b>3.18</b>	Valores factibles estimados para las variables de respuesta en función de la temperatura de aire de entrada y contenido de maltodextrina	98
<b>3.19</b>	Valores óptimos estimados para las variables de respuesta	99
<b>3.20</b>	Resultados de la validación de las variables de respuesta	100
<b>3.21</b>	Resultados del error relativo para las variables de respuesta	100
<b>3.22</b>	Resultados para el contenido de proteínas, cenizas, calcio y ácido ascórbico presentes en el pulque en polvo	101

## NOMENCLATURA

DE	Grado equivalente de dextrosa
$a_w$	Actividad de agua
$p$	Presión parcial de vapor de agua ( $\text{atm/m}^3$ )
$p_o$	Presión parcial de vapor de agua pura ( $\text{atm/m}^3$ )
HR	Humedad relativa
$X_{wb}$	Humedad en base húmeda
$X_{db}$	Humedad en base seca
$C^*$	Parámetro de color Chroma
$a$	Parámetro de color $a$
$b$	Parámetro de color $b$
$h^0$	Parámetro de color Hue
L	Tabla ortogonal
$n$	Número de ensayos a tomar por la tabla ortogonal
$m$	Número de factores dispuestos en la tabla ortogonal
$k$	Numero de niveles de cada factor
$X_1$	Procedencia del pulque
$X_2$	Temperatura de aire de entrada
$X_3$	Temperatura de aire de salida
$X_4$	Adición de maltodextrina
$\Delta E$	Diferencia de color
$\Delta L$	Diferencia del parámetro de color $L$
$L_{inicial}, L_{final}$	Parámetro de color $L$ inicial y final
$\Delta a$	Diferencia del parámetro de color $a$
$a_{inicial}, a_{final}$	Parámetro de color $a$ inicial y final
$\Delta b$	Diferencia del parámetro de color $b$
$b_{inicial}, b_{final}$	Parámetro de color $b$ inicial y final
$\rho$	Densidad del pulque a 20 °C (g/mL)
$M_m$	Masa del picnómetro con muestra (g)

$M_t$	Masa del picnómetro vacío (g)
$M_a$	Masa del picnómetro con agua (g)
$\rho_{H_2O}$	Densidad del agua a 20 °C (0.998202 g/mL)
% proteínas	Porcentaje de proteínas (%)
N	Normalidad del HCl
V	Volumen gastado de HCl (mL)
factor	Factor para proteínas en alimentos, 6.25
m	Masa de la muestra (g)
% cenizas (base seca)	Porcentaje de cenizas (%)
$m_{cenizas}$	Masa de las cenizas (g)
$m_{alimento}$	Masa del alimento (g)
R	Rendimiento (%)
$P_{exp}$	Pulque en polvo obtenido experimentalmente (g)
$P_{calc}$	Pulque en polvo calculado (g)
$E_R$	Error relativo
$V_{predicho}$	Valor predicho
$V_{exp}$	Valor experimental
% Ca	Porcentaje de calcio en el alimento
$V_{KMnO_4}$	Volumen de $KMnO_4$ gastados en la titulación (mL)
$N_{KMnO_4}$	Normalidad de la solución de $KMnO_4$
$V_t$	Volumen total de la solución de cenizas (mL)
A	Alícuota de la solución de cenizas (mL)
P	Peso de la muestra (g)
Aa (mg/100 g)	Cantidad de ácido ascórbico (mg / 100 g)
a	Volumen de $I_2$ gastados (mL)
T	Título del reactivo (0.8806 mg)
$V_{total}$	Volumen de solución extractora (mL)
$V_{filtrado}$	Alícuota de solución filtrada (mL)
m	Masa de la muestra (g)

---

---

## INTRODUCCIÓN

El maguey es una planta de la familia *Agavaceae* que crece en el altiplano semiseco y frío de México. El maguey pulquero o *Agave salmiana* se distribuye principalmente en el valle de México y en los estados de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. Su cultivo y aprovechamiento data desde la época precolombina, en la actualidad de él dependen económicamente un gran número de familias campesinas. Los habitantes de estas zonas lo cultivan para extraer del centro de su tallo un jugo denominado aguamiel que al fermentar se convierte en pulque, una bebida de bajo grado alcohólico.

El agave pulquero en general tarda de 8 a 12 años para florecer, momento en el que son aprovechados para la extracción de aguamiel, ésta se extrae del área donde nace el cogollo y la yema vegetativa, zona donde se forma una cavidad en el centro, hacia la cual escurre la savia dulce o aguamiel, esta posteriormente se almacena en tinacales durante 8 a 30 días para su fermentación, etapa que se lleva a cabo por medio de algunas bacterias como *Zimomona mobilis*, *Lactobacillus* y *Leuconostoc*, las cuales le confieren la viscosidad característica, mientras que el grado alcohólico lo proporcionan las levaduras del género *Saccharomyces*. Este producto ha sido por mucho tiempo una bebida muy popular y parte importante de la cultura en México, además se le considera una bebida con propiedades alimenticias por el contenido de azúcares, aminoácidos esenciales y vitaminas.

El consumo tradicional de pulque ha disminuido día a día ante la proliferación de nuevas y diversas bebidas. Actualmente se está perdiendo la costumbre de consumir pulque, por lo que una alternativa sería procesar la bebida tradicional conservando sus componentes nutrimentales como son vitaminas y aminoácidos esenciales y, ofrecerla con características aceptables para el gusto de los consumidores. Esta alternativa puede ser el proceso de secado por aspersion, en el cual, el pulque sería transformado desde un estado líquido en gotas atomizadas para luego ser convertidas en partículas secas mediante una corriente de aire caliente. Aplicando el proceso de secado por

---

aspersión el pulque conservará la mayor parte de sus componentes nutrimentales que son de gran interés, además que se puede prolongar el tiempo de vida útil de este producto.

---

---

## OBJETIVO GENERAL

Aplicar el proceso de secado por aspersión para deshidratar el pulque proveniente del *Agave salmiana*.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicoquímicamente el pulque obtenido de diferentes regiones.
- Obtener pulque deshidratado a diferentes condiciones del proceso de secado por aspersión.
- Evaluar el efecto de las variables del proceso de secado por aspersión sobre las características fisicoquímicas de pulque en polvo.
- Cuantificar el contenido de ácido ascórbico y calcio en el producto deshidratado.



---

## JUSTIFICACIÓN

El pulque es una bebida alcohólica tradicional mexicana, se obtiene por la fermentación del aguamiel procedente del *Agave salmiana*. A diferencia de otras bebidas alcohólicas contiene componentes nutricionales, que son benéficos para la salud, como son el calcio, la vitamina C, el ácido fólico, aminoácidos esenciales y vitaminas del complejo B. Sin embargo no se aplica algún proceso para obtener un nuevo producto a partir de pulque y aprovechar sus nutrimentos, además es un alimento altamente perecedero, por lo que es factible buscar nuevas alternativas que permitan procesar dicha bebida, con la finalidad de obtener un productos con características fisicoquímicas similares a la bebida natural tratando de conservar sus propiedades nutricionales y organolépticas.

Una alternativa que se adecua y que es eficiente para el procesamiento de productos naturales es el secado por aspersion, el cual permite obtener productos en polvo con alta calidad, no alterando sus propiedades fisicoquímicas y que podría ser aplicado al pulque para obtener un producto deshidratado de un alto valor nutritivo.

# **CAPITULO 1**

## **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

## CAPITULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.1. Generalidades del pulque

El pulque se ha consumido durante miles de años en el centro de México y sigue siendo popular en muchas comunidades. Es muy probable que los antiguos Otomíes fueron los primeros en preparar el pulque hacia el año 2000 a.C, heredando el proceso de elaboración a casi todas las culturas de la meseta central. Sin embargo, diferentes leyendas atribuyen su origen a la civilización Tolteca. Otra leyenda considera que el maguey y el pulque son un regalo de la diosa Mayahuel (Escalante *et al.*, 2012).

La civilización Azteca desarrollo el dominio de las técnicas de producción de aguamiel y pulque, que incorporaron a su dieta debido a sus beneficios nutricionales y propiedades curativas. Los aztecas consideraban al pulque un alimento divino, una medicina y un elemento ritual que les permitía tener una relación estrecha con su cosmología. A medida que esta cultura dominaba el altiplano mexicano, establecieron las pautas para el consumo y uso religioso del pulque, solo a los niños y jóvenes, los ancianos, las mujeres embarazadas o en lactancia, sacerdotes y guerreros se les permitía consumirlo. Cuando el Imperio Azteca cayó, el pulque perdió su importancia religiosa y ha prevalecido hasta hoy como una bebida tradicional y popular. Al principio de la Época Colonial, los españoles promovieron su consumo entre los grupos indígenas y los esclavos inmigrantes como un medio para controlarlos. (Backstrand *et al.*, 2004; Escalante *et al.*, 2012).

Las actividades de producción y comercialización del pulque florecieron a finales del Siglo 18, con el desarrollo de las haciendas pulqueras, dedicadas al cultivo de plantas de agave, extracción de aguamiel y la producción de pulque, el cual era transportado principalmente a las ciudades de México y Puebla. Las haciendas pulqueras prosperaron principalmente en los estados del centro de México, tales

como Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Querétaro, Morelos y Michoacán. Desde 1779, la producción, comercialización y los privilegios especiales que fueron concedidos a los españoles que controlaban la agroindustria del pulque fueron fuertemente regulados, convirtiéndose esta en una de las actividades económicas más importantes de la Nueva España (Escalante *et al.*, 2012).

Durante el movimiento de independencia (1810-1821), la producción de pulque sufrió una drástica reducción. Una vez que México se independizó, las regulaciones gubernamentales con respecto a la producción, la calidad, el comercio y los impuestos del pulque, consolidaron nuevamente a las haciendas pulqueras, lo que les permitió hacer frente a la demanda de la bebida debido al rápido crecimiento de la población. En 1910, la industria del pulque se vio afectada de nuevo por el movimiento revolucionario. La inestabilidad social, junto con la introducción de las empresas cerveceras y una fuerte campaña contra el pulque tuvo impacto negativo en esta agroindustria. No fue hasta 1960 que se realizaron esfuerzos considerables con el fin de recuperar este importante patrimonio nacional con la creación del Patronato del Maguey, con el objetivo de mejorar la cultura y explotación del Agave a través de modificaciones, tanto en el proceso de producción y distribución. Actualmente, el pulque se considera una bebida tradicional que prácticamente ha desaparecido del mercado urbano y que solo se encuentra en pulquerías ubicadas en barrios populares de la ciudad de México, mientras que en las zonas rurales cerca de las regiones de producción, el pulque sigue siendo la bebida estimulante preferida, es consumida por hombres, mujeres y niños como parte de la dieta diaria y en festividades tradicionales como cumpleaños, bautizos, bodas y funerales (Escalante *et al.*, 2012; Moreno-de LeBlanc *et al.*, 2014).

El pulque es una bebida tradicional mexicana que se obtiene haciendo fermentar el aguamiel o jugo extraído del corazón de diferentes especies de maguey, principalmente *Agave salmiana var. salmiana* (maguey verde o pulquero), *A. atrovirens* (maguey blanco), *A. mapisaga* (maguey mexicano o manos largas) y *A.*

*americana* (maguey cenizo), estas especies crecen en una vasta región de las zonas áridas, semiáridas y templadas, en arena, suelos pobres y bien drenados, con precipitaciones escasas e irregulares (Escalante *et al.*, 2004; Ramírez *et al.*, 2004).

De acuerdo con la norma NMX-V-037 el pulque se define como la bebida fermentada de bajo contenido alcohólico, no clarificada, de color blanco, ácida, de aspecto viscoso elaborada mediante el empleo como substrato fermentable del aguamiel obtenido de *Agave* pulquero (Banco de Normas Mexicanas, 1972b). Esta bebida se produce principalmente en estados centrales de México y juega un papel importante en la nutrición de las personas de bajos ingresos (Battcock y Azam-Ali, 1998; Cervantes-Contreras y Pedroza, 2008).

### **1.1.1 Origen y taxonomía del género *Agave***

El uso y explotación de los agaves o magueyes en México comenzaron cuando los primeros grupos humanos se establecieron en la región mesoamericana. Desde entonces, los agaves han sido utilizados como fuente de alimentos, bebidas, medicamentos, combustible, vivienda, ornamento, fertilizante y fuente de fibras. De las especies del género *Agave*, el *Agave salmiana*, fue la más empleada con ese fin, considerándose como el progenitor de los cultivos actuales (Castillo *et al.*, 2007; Olvera *et al.*, 2015).

El género *Agave* forma parte de la familia Agavaceae, originaria del continente Americano, en donde se han registrado más de 200 especies y 47 categorías intraespecíficas. En México se encuentra alrededor del 75% de las especies de agave, de las cuales 135 especies se consideran endémicas, por lo que este país es considerado como su centro de origen. Sin embargo, sólo 74 de estas se utilizan para el consumo humano, elaboración de bebidas fermentadas y destiladas, obtención de fibras y forraje (Castillo *et al.*, 2007; Nava-Cruz *et al.*, 2014). La Tabla

1.1 muestra la clasificación y taxonomía del género *Agave* (Verduzco-Martínez *et al.*, 2009).

**Tabla 1.1** Clasificación y taxonomía del género *Agave*.

<b>Clasificación</b>	
Reino	<i>Plantae</i>
Subreino	<i>Tracheobionta</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Liliopsida</i>
Subclase	<i>Liliidae</i>
Orden	<i>Liliales</i>
Familia	<i>Agavaceae</i>
Género	<i>Agave</i>

La riqueza de especies endémicas del género *Agave* en México se debe principalmente a los hábitats tan heterogéneos que presenta el país, los cuales difieren en clima, geología, suelos, topografía, altitud, entre otros factores ambientales (León-Vázquez *et al.*, 2013).

### 1.1.2 Descripción botánica

La palabra *Agave* es proveniente del árabe y significa “admirable” y es la que representa al género de los conocidos magueyes. Las plantas de este género son perennes, pueden crecer hasta 1.8 m de altura, con una roseta formada por hojas suculentas y llegan a pesar hasta 250 kg en estado fresco, son frecuentemente propagadas por hijuelos, tiene raíces duras y fibrosas que penetran aproximadamente 30 cm en el suelo. Las inflorescencias son bracteadas, escamosas y racemosas o paniculadas, y ocasionalmente presentan bulbillos, sus semillas son planas y negras. Los agaves son semélparos, esto es que solo tienen una floración durante su ciclo de vida (8 a 20 años) al cabo de la cual la planta muere (Gentry, 1982; Martínez *et al.*, 2013).

Las plantas de agave se adaptan muy bien a varios hábitats y crecen en suelos con pH neutro o ligeramente alcalino. Su metabolismo, las características fisiológicas y morfológicas, les permiten sobrevivir en condiciones extremas, incluyendo ambientes áridos, y pueden crecer de forma individual o como poblaciones (Ayala, 2010; Nava-Cruz *et al.*, 2014).

#### **1.1.2.1 *Agave salmiana***

El *Agave salmiana* var. *salmiana* es una planta de tamaño medio a grande, con tallos gruesos y cortos, retoños estrechos, forma rosetas de 1.5 a 2.0 m de alto con el doble de amplitud; sus hojas son lanceoladas lineales, suculentas, fibrosas, verde grisáceo o glauco y miden de 1.0 a 2.0 m de largo por 20 a 35 cm de ancho, los márgenes de las hojas presentan pequeñas espinas en forma de gancho o rectas, al final de esta hay una espina terminal de 4 a 5 cm de largo, color marrón oscuro, ranurada interiormente (Figura 1.1a). Las inflorescencias son robustas miden de 7 a 8 m de alto, pedúnculo con brácteas carnosas y grandes, panícula amplia compuestas de 15 a 20 umbelas grandes, con flores de 8 a 11 cm de largo, gruesas y carnosas, amarillas por encima del ovario que es de color verde y mide de 5 a 6 cm de largo, con tépalos desiguales de color amarillo. Las semillas son de color negro, lacrimiformes, con una muesca hilar poco profunda y apical, miden de 8 a 9 mm de largo por 6 a 7 mm de ancho (Gentry, 1982; Smith y Figueiredo, 2012).

El ciclo biológico de la especie es de entre 8 y 20 años, la floración se presenta al final del ciclo de vida, después del largo periodo de crecimiento vegetativo. La planta se propaga mediante la producción de vástagos y es capaz de producir abundante semilla (Reynoso *et al.*, 2012). En la Figura 1.1b se muestra la morfología del *Agave salmiana* var. *Salmiana*.

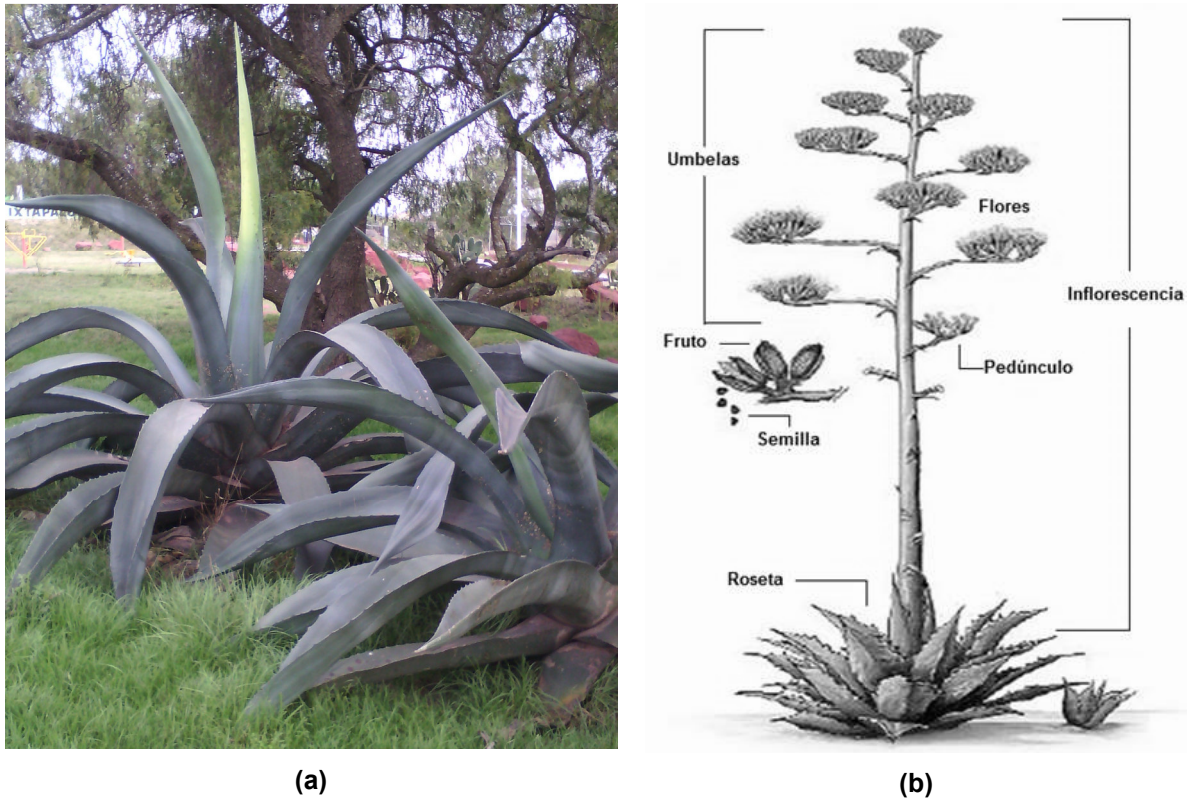
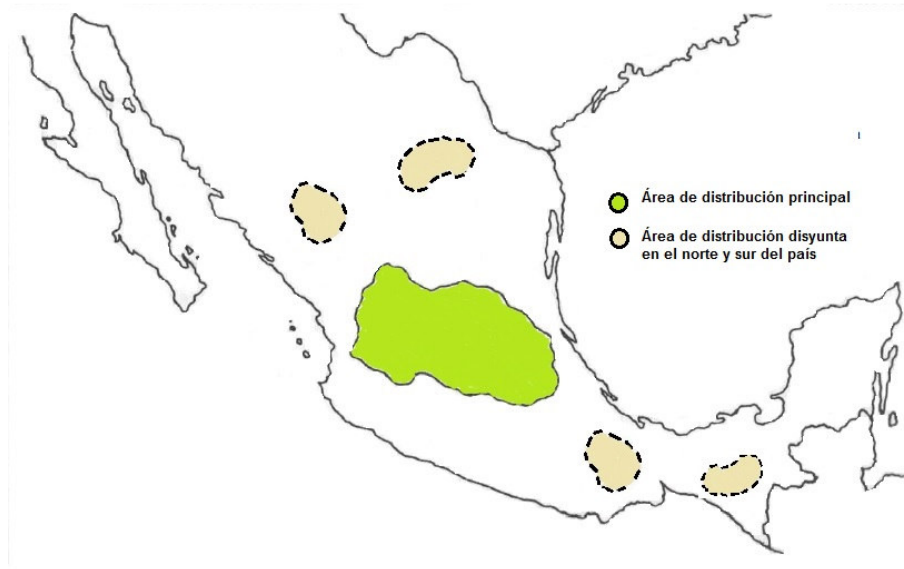


Figura 1.1 (a) *Agave salmiana* var. *salmiana* y (b) Morfología.

La especie *Agave salmiana* es una especie endémica de las tierras montañosas del centro de México y son numerosas sus variedades silvestres y cultivadas. Es la especie de hoja ancha más distribuida en el país y se le considera el ancestro común de todas estas; generalmente ocupa elevaciones entre 1230 a 2460 msnm, la precipitación pluvial de los sitios donde se desarrolla varía entre 360 a 1000 mm anuales, principalmente entre los meses de mayo y octubre, crece como planta silvestre en bordes del bosque de *Quercus-Pinus*, bosque tropical caducifolio, matorral xerófilo, y es muy notorio en grandes extensiones del Altiplano central de México (Durango, Hidalgo, Puebla, Querétaro y San Luis Potosí), como planta cultivada se encuentra desde Coahuila y Nuevo León hasta Chiapas (Figura 1.2), principalmente en parcelas agrícolas de temporal, en áreas de plantaciones y reforestaciones (Ayala y Ruiz, 1996; Castillo *et al.*, 2007; Parra *et al.*, 2010; Reynoso *et al.*, 2012).





**Figura 1.2** Distribución en México del *Agave salmiana*.

El *Agave salmiana* es uno de los agaves más utilizados para la producción de aguamiel y pulque, además el aguamiel por cocción prolongada se transforma en miel; las espinas terminales de las hojas sirven como clavos en las paredes, alfileres para retener lienzos gruesos o como aguja; sus hojas tienen una gran cantidad de fibras duras, constituidas principalmente por celulosa, con las cuales anteriormente se hacían hilos; de las pencas se obtenía papel machacado y actualmente son preferidas para la elaboración de barbacoa y extracción de mixiote (Ayala y Ruiz, 1996; Parra *et al.*, 2010; Reynoso *et al.*, 2012).

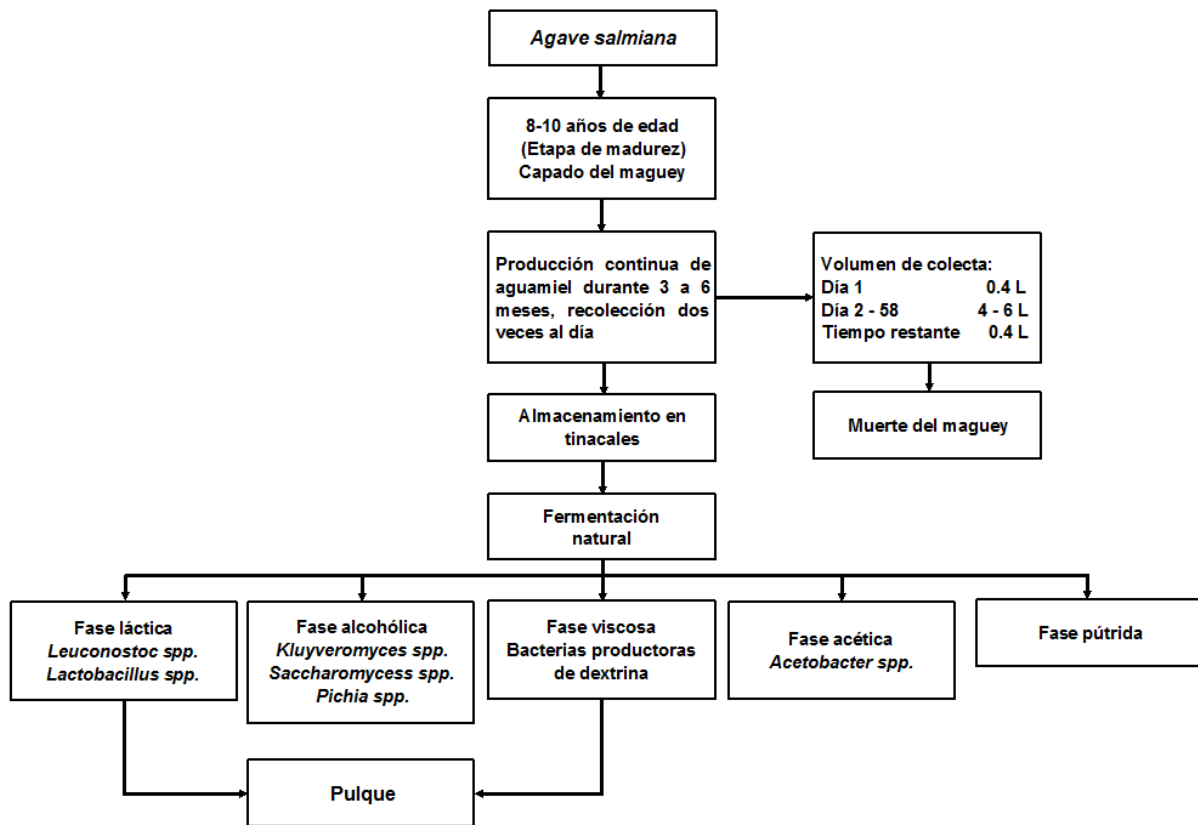
## 1.2 Proceso de elaboración del pulque

Cuando el maguey tiene la edad adecuada, aproximadamente de 8 a 12 años de plantado, se observa un adelgazamiento en la base del “meyolote” (cogollo o yema central) y el “tlachiquero” efectúa la operación de “capado”, que consiste en cortar las hojas laterales del maguey hasta llegar al corazón. El maguey se deja reposar hasta por 6 meses, el cual es el periodo de envejecimiento, lo que permite la maduración de las hojas centrales y el aumento del contenido de azúcares. En seguida, se inicia

el proceso de “picazón”, cuya operación consiste en abrir en el tallo del maguey la cavidad donde se acumula el aguamiel, y por otra parte producir en la planta una lesión que permitirá que el aguamiel fluya. El maguey se deja reposar por varios días y se realiza el “raspado”, con la cual se inicia la producción de aguamiel y es obtenida por succión oral a través de una calabaza (*Lagenaria siceraria*) seca llamada “acocote”. Un maguey puede producir por un periodo de 6 meses, dos veces al día, una cantidad de 3 a 4 L de aguamiel, después de este periodo la planta llega a su ciclo final de vida. Una vez recolectada el aguamiel es llevada a los tinacales (recipientes abiertos de hasta 700 L de capacidad) donde se realiza la fermentación, sea de forma espontánea o inducida mediante la adición de la semilla, y después de horas se obtiene como producto final el pulque (Lappe-Oliveras *et al.*, 2008; Manrique, 2013).

El proceso de obtención del pulque se lleva a cabo en cinco fases, en las cuales ocurre una transformación microbiana en el aguamiel, como resultado de cambios químicos que propician el desarrollo de diferentes microorganismos. En la primera fase se inicia la fermentación láctica, donde *Leuconostoc spp.* es la especie más activa e inicia la producción de ácido láctico, etanol, dextranos y numerosos compuestos menores, algunos de ellos componentes del sabor; a medida que el pH descende, las especies de *Lactobacillus* dominan, produciendo ácido láctico hasta que el crecimiento de las levaduras se acelera a un pH aproximado de 4.5. Al inicio de la segunda fase las levaduras *Kluyveromyces spp.* y *Pichia spp.*, son más activas generando un cantidad moderada de etanol, y posteriormente domina *Saccharomyces spp.* hasta el final de la fermentación alcohólica. *Zymomonas mobilis* (var. *mobilis*) también juega un papel importante en la fermentación alcohólica, además de producir en menor cantidad ácido láctico, ácido acético y otras sustancias a partir de la fructosa y glucosa presente en el aguamiel. En la tercera etapa, bacterias generadoras de dextranos (*Leuconostoc spp.*) son las responsables del aumento en la viscosidad del pulque. Posteriormente se presenta la etapa ácida donde la producción de ácido acético se incrementa debido a la presencia de la

bacteria *Acetobacter spp.*; y finalmente otros microorganismos son responsables de la etapa de putrefacción (Lappe-Oliveras *et al.*, 2008; McKay *et al.*, 2010). En la Figura 1.3 se muestra el proceso de obtención de aguamiel y pulque.



**Figura 1.3** Proceso de obtención del aguamiel y pulque.

Durante el proceso de fermentación ocurren cambios importantes como son la reducción de sólidos solubles del 30 % hasta el 6 %; el pH disminuye de 7.4 a 3.5 y 4.0; el contenido de sacarosa desciende del 15 % a 1% y el contenido de vitaminas (miligramo de vitamina por 100 g de producto) se incrementa, por ejemplo, la tiamina aumenta de 5 a 29, la niacina de 54 a 515 y la riboflavina de 18 a 33 (Battcock y Azam-Ali, 1998).

En la norma mexicana NMX-V-022 se clasifica el aguamiel en dos tipos: el Tipo I, se refiere al producto de mayor limpieza (libre de insectos y otros contaminantes) y con

alto contenido de azúcares; el Tipo II, incluye todos los otros tipos de aguamiel (Banco de Normas Mexicanas, 1972a). Por otro lado, en la norma mexicana NMX-V-037, se reconocen dos tipos de pulque: Tipo I o pulque de semilla y puntas (pie de cuba), y Tipo II o pulque comercial. El pulque de semilla se prepara para aumentar la microbiota natural que determina la fermentación correcta en la elaboración de la bebida en un tanque dedicado exclusivamente para este fin. El aguamiel Tipo I se inocula con pulque de semilla y se utiliza para establecer el equilibrio bioquímico óptimo entre los sustratos fermentables y los microorganismos implicados en la fermentación, siendo estas las bases para la producción del pulque comercial o Tipo II (Banco de Normas Mexicanas, 1972b).

### **1.2.1 Composición y valor nutricional**

El pulque ha sido consumido durante miles de años en México central y sigue siendo popular en muchas comunidades, por sus propiedades nutritivas. En algunas áreas el consumo de esta bebida puede ser considerable, en zonas rurales la media es aproximadamente de 6.4 L/semana, en zonas urbanas aporta alrededor del 9 % del consumo total de alcohol. En el lado nutricional se ha encontrado que el consumo de 0.5 L de pulque contiene aproximadamente 24 g de etanol y proporciona 215 kcal, así como minerales y vitaminas, incluyendo el ácido ascórbico (30 mg), tiamina (0.1 mg), riboflavina (0.1 mg) y hierro (3.5 mg), además esta bebida contiene aminoácidos libres cíclicos y alifáticos, y proteínas. De acuerdo con su coeficiente de digestibilidad, proporcionan un 0.628 % de calorías (Backstrad *et al.*, 2001; Godoy *et al.*, 2003; Backstrad *et al.*, 2004). En la Tabla 1.2 se muestra el contenido de vitaminas y aminoácidos presentes en el pulque tradicional, pulque obtenido en planta piloto e industrializado.

**Tabla 1.2** Contenido de aminoácidos y vitaminas en el pulque tradicional, pulque de planta piloto e industrial.

Componente	Tradicional <sup>a</sup>	Planta piloto <sup>b</sup>	Industrial <sup>c</sup>
Aminoácido (mg/100 mL)			
Lisina	16.2	7.5	12.0
Triptófano	2.7	9.0	6.0
Histidina	4.7	1.0	
Fenilalanina	11.2	7.5	
Leucina	10.5	6.0	
Treonina	6.4	5.0	
Metionina	0.7	5.0	
Valina	6.6	7.5	
Arginina	10.9	3.2	
Tirosina		7.5	
Vitaminas (mg/100 mL)			
Tiamina	0.02	0.02	0.02
Riboflavina	0.025	0.03	0.03
Niacina	0.32	0.37	0.35
Piridoxina		0.03	
Biotina		0.02	
Ácido ascórbico	5.6		5.1
Ácido fólico	0.01		

<sup>a</sup>Massieu *et al.*, 1949; <sup>b</sup>Sánchez-Marroquín, 1977; <sup>c</sup>Del Razo, 2004

La concentración de aminoácidos es mayor en el pulque tradicional que el obtenido en planta piloto e industrializado, en tanto que las vitaminas presentan concentraciones similares en ambos tipos; esto puede ser debido a que la población de levaduras aumenta al final de la fermentación, por lo que cuanto mayor es la población de levaduras en el pulque, mayor será el valor nutricional de la bebida (Lappe-Oliveras *et al.*, 2008). En el pulque intervienen en forma básica los mismos principios alimenticios de la leche y de la carne; tiene buena proporción de proteínas, vitaminas del complejo B, vitamina C y sales minerales. Además del poder nutritivo del pulque, este es considerado energético por su contenido de alcohol y produce más energía que la sidra, cerveza y vinos blancos o tintos. (Godoy *et al.*, 2003). En la

Tabla 1.3 y 1.4 se muestra la composición química y las características químicas y fisicoquímicas del pulque:

**Tabla 1.3** Composición química del pulque por región.

Componente	Unidad	Pulque <sup>a</sup>	Pulque <sup>a</sup>	Pulque <sup>b</sup>
		(México)	(Hidalgo)	
Calcio	mg	11.0	10.0	
Fosforo	mg	6.0	10.0	
Hierro	mg	0.70	0.70	
Proteínas	%	0.37	0.44	0.37
Humedad	%	98.3	97.0	97.0
Cenizas	%	0.2		0.24

<sup>a</sup>Cravioto *et al.*, 1951; <sup>b</sup>Banco de Normas Mexicanas, 1972b.

**Tabla 1.4** Características químicas y fisicoquímicas del pulque en 100 mL.

Característica	Pulque <sup>a</sup>	Pulque <sup>b</sup>	
		Tipo I	Tipo II
Índice de refracción a 20 °C		1.3390-1.3406	1.3365-1.3380
Gravedad específica	0.978		
pH	4.6	>3.7-4.2	3.5-4.0
Acidez total (ácido láctico) (g)	0.348	0.40-0.75	0.40-0.70
Reductores totales (glucosa) (g)	0.48	0.10-0.80	0.20-0.50
Grado alcohólico (% V/V)	5.43	6.0-9.0	4.0-6.0

<sup>a</sup>Steinkraus., 1979; <sup>b</sup>Banco de Normas Mexicanas, 1972b.

### 1.2.1.1 Ácido ascórbico (Vitamina C)

El ácido ascórbico, comúnmente conocido como Vitamina C, tiene cuatro isómeros, de los cuales solo el L-ascórbico y el L-deshidroascórbico tienen actividad fisiológica. Esta sustancia es cristalina, blanca y sin olor, debido a sus características polares, es fácilmente soluble en agua y de solubilidad limitada en medios no acuosos, por ejemplo etanol y acetonitrilo. El ácido ascórbico cristalino y puro es estable cuando se expone al aire, la luz y a temperatura ambiente durante un largo periodo, sin

embargo, puede ser fácilmente degradado si hay un cambio en el pH, la temperatura, la luz y por la presencia de enzimas, oxígeno y catalizadores metálicos. Por lo tanto, muchos estudios sobre los procesos de alimentos toman a la Vitamina C como un indicador de la calidad de estos (Santos y Silva, 2008).

El nivel de ingesta media diaria suficiente para satisfacer las necesidades nutricionales de ácido ascórbico en adultos (>19 años) es de 90 mg/día en hombres y 75 mg/día para las mujeres. Esta vitamina está presente en frutas (cítricos, fresas, melones, piña, plátanos y uvas), vegetales (coles de Bruselas, espárragos y espinacas) y productos animales tales como carne, hígado y leche (Arilla, 1999). El contenido de Vitamina C en la dieta del campesino mexicano no es pobre si éste bebe pulque, para ello no es necesaria la ingestión de grandes cantidades de esta bebida, dado que dosis pequeñas de pulque son suficientes para satisfacer estas necesidades (Godoy *et al.*, 2003).

#### **1.2.1.2 Calcio**

El calcio es el elemento divalente más abundante en el ser humano y representa hasta el 2 % del peso corporal, equivalente a 1.000-1.500 g en un adulto. Aproximadamente el 99 % de este elemento se encuentra distribuido en las estructuras óseas, en forma de hidroxapatita cálcica, y el resto, 1 %, en los fluidos extracelulares y en el interior de los tejidos. A pesar de que esta segunda fracción es muy pequeña, tiene una enorme influencia funcional e interviene en gran número de transformaciones y mecanismos, como son la coagulación de la sangre, la contracción muscular, la activación enzimática, la transmisión de impulsos nerviosos, entre otros (Farré y Frasquet, 1999; Badui, 2006).

No existen valores recomendados de ingesta diaria para el calcio, sin embargo, una ingesta adecuada para adultos y niños en crecimiento es de 800 mg aproximadamente, para el caso de embarazadas y madres lactantes esta cifra se

incrementa hasta un 50 % (Badui, 2006; Thompson *et al.*, 2008). Las principales fuentes dietéticas de calcio son la leche y derivados lácteos; le siguen tanto por su contenido de calcio como por su participación en la dieta los cereales, las frutas y los vegetales. En México una gran parte del calcio que se consume proviene del maíz nixtamalizado, debido a que en su preparación se añade una cantidad considerable de este elemento, en forma de cal, y en ciertas zonas del país se complementa con la ingesta de pulque, el cual aporta alrededor de 20 mg de calcio por cada 0.5 L de esta bebida (Farré y Frasquet, 1999, Backstrad *et al.*, 2002; Badui, 2006).

### **1.2.2 Producción anual y aplicaciones del pulque**

Actualmente los estados productores de pulque son principalmente Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México, Puebla y Aguascalientes, aunque también se le encuentra marginalmente en Coahuila, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Querétaro, San Luis Potosí, Veracruz y Oaxaca, reportándose para el 2014 una producción total de 399 083.57 miles de litros de pulque. En la Tabla 1.5 se muestra la producción de pulque por estado, reportado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de México en el año 2014 (SIAP, 2015).

El pulque prácticamente ha desaparecido del mercado urbano y solo se consume en pulquerías ubicadas en algunos barrios de la Ciudad de México. En las zonas rurales el pulque aun es preferido como una bebida estimulante, la cual se consume natural o preparada con frutas de temporada (curados) como parte de la dieta diaria. Actualmente, se están haciendo esfuerzos importantes para luchar contra su desaparición, para ello se está promoviendo su consumo en restaurantes de comida mexicana y en festivales gastronómicos (Escalante *et al.*, 2012).



**Tabla 1.5** Producción de pulque en miles de litros para 2014.

<b>Estado</b>	<b>Superficie Sembrada (Ha)</b>	<b>Superficie Cosechada (Ha)</b>	<b>Producción (miles de L)</b>
Coahuila	1,838.00	0	0
Guanajuato	3.5	2.5	56.25
Guerrero	3.5	3.5	19.78
Hidalgo	6,654.00	2,637.00	338,826.60
Jalisco	3	0	0
Michoacán	7.05	0	0
México	1,423.00	240.7	3,472.86
Puebla	374	224	7,609.28
Querétaro	89	0	0
San Luis Potosí	31	24	298.8
Tlaxcala	562	562	48,080.00
Veracruz	107	80	720

La producción de pulque es una industria a pequeña escala y predominantemente tradicional, sin embargo, empresas como Néctar del Razo y Hacienda de 1981, en el Estado de Tlaxcala, Desarrollo Agropecuario del Altiplano, en Puebla y La Lucha, en Hidalgo, han modificado el proceso de elaboración para obtener un producto estable con una larga vida útil, exportando pulque enlatado a diferentes países en forma natural y añadido con frutas (Lappe-Oliveras *et al.*, 2008; Escalante *et al.*, 2012). Las características de esta bebida ancestral son de tal valor, que se deben desarrollar otras técnicas que permitan conservar sus propiedades nutricionales y que proporcione a los consumidores el beneficio de un producto seguro y de buena calidad.

### 1.3 Proceso de secado

El secado es una operación esencial para la química, la agricultura, la biotecnología, en alimentos, polímeros, cerámicos, productos farmacéuticos, industria de

procesamiento de minerales, maderas, pulpas y papel. Para la industria alimenticia es importante la eliminación de agua y, se considera un alimento seco si contiene más de 2.5 % de agua y, deshidratado si este contiene menos de 2.5 % de agua (Barbosa-Canovas y Vega-Mercado, 1996; Mujumdar, 2015).

El objetivo del secado de alimentos es la eliminación de agua a un nivel donde el deterioro microbiológico es minimizado para así extender el tiempo de vida de un producto. Adicionalmente al incremento en la estabilidad del producto, se tiene una reducción significativa en el peso y el volumen de este, contribuyendo en la reducción del costo de empaçado, manejo, almacenamiento y distribución del alimento. Durante el proceso de secado, el material alimenticio experimenta cambios físicos, químicos y biológicos, que pueden afectar algunos atributos naturales de este como la textura, color, sabor y valor nutricional. Por tanto, un segundo objetivo del secado es producir alimentos secos de buena calidad desde un punto de vista nutricional y organoléptico (Ibartz y Barbosa-Cánovas, 2010).

El secado describe el proceso térmico de la eliminación de sustancias volátiles (humedad) para dar un producto sólido. Es una operación compleja que involucra la transición de varios tipos de procesos junto con la transferencia de calor y masa, estas transformaciones pueden ser físicas o químicas, y a su vez, pueden causar cambios en la calidad de un producto, así como en los mecanismos de transferencia de calor y masa. Los cambios físicos que pueden ocurrir incluyen la contracción, el hinchamiento, la cristalización y la transición vítrea. En algunos casos, se producen reacciones químicas y bioquímicas deseables o indeseables, que conducen a cambios en el color, la textura, el olor u otras propiedades del producto sólido. Cuando un sólido húmedo se somete a un secado térmico, dos procesos ocurren simultáneamente:

1. Transferencia de energía (en su mayoría en forma de calor) del entorno circundante que evapora la humedad de la superficie.

2. Transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido y su posterior evaporación debido al proceso anterior.

La velocidad a la que se lleva a cabo el secado se rige por la velocidad a la que proceden los dos procesos. La transferencia de energía en forma de calor desde el entorno circundante al sólido húmedo puede ocurrir como resultado de la convección (secadores directos), conducción (secadores por contacto o indirectos) o radiación, y en algunos casos como resultados de una combinación de estos efectos. Más del 85 % de los secadores industriales son del tipo convectivo y utilizan como medio de secado aire caliente o gases de combustión directa, y más del 99 % de las aplicaciones implican la eliminación de agua (Mujumdar, 2015).

### **1.3.1 Secado por aspersion**

El secado por aspersion es un método importante para el secado de productos líquidos, incluyendo soluciones y suspensiones. Entre sus principales aplicaciones en la industria de alimentos está el secado de productos lácteos, incluyendo la leche descremada, así como la leche entera, y de café. Muchos otros productos alimenticios son secados por este medio, incluyendo a los zumos de frutas y purés, huevos, proteínas y almidones hidrolizados (Karel y Lund, 2005).

El secado por aspersion es un proceso de transferencia simultánea de calor y masa, éste puede ser una alternativa para la elaboración de productos en polvo, además de la liofilización, conservando sus características y componentes naturales, entre las principales características del producto secado por aspersion incluye el control de la humedad, el tamaño de partícula, densidad a granel, capacidad de rehidratación entre otras, las cuales son importantes para la estabilidad y aceptación en el mercado. Cada día se incrementa pronunciadamente la demanda de nutraceuticos de origen natural y alto valor alimenticio, principalmente en las áreas urbanas (Ibartz y Barbosa-Cánovas, 2010).

El principio del secado por aspersión parece simple y consiste en atomizar un líquido o suspensión en una cámara de secado, donde entra en contacto con el aire a una temperatura y humedad controlada. Las partículas secas son rodeadas por el aire y son transportadas neumáticamente a equipos de separación, donde se separan del aire para ser recolectadas (Karel y Lund, 2005). El secador por aspersión más utilizado es el de ciclo abierto, el cual tiene un consumo continuo de aire atmosférico. El aire es calentado, utilizado como medio de secado, limpiado por medio de remolinos y depuradores, y luego liberado al medio ambiente. Este tipo de operación presenta un gasto de calor contenido en el aire que es liberado (Barbosa-Canovas y Vega-Mercado, 1996).

### 1.3.2 Etapas del proceso de secado por aspersión

En la Figura 1.4 se muestra el proceso de secado por aspersión que consiste en cuatro etapas: calentamiento del aire de secado, atomización del alimento en partículas finas, contacto del aire con las partículas atomizadas y recolección del producto seco (Masters, 1991).

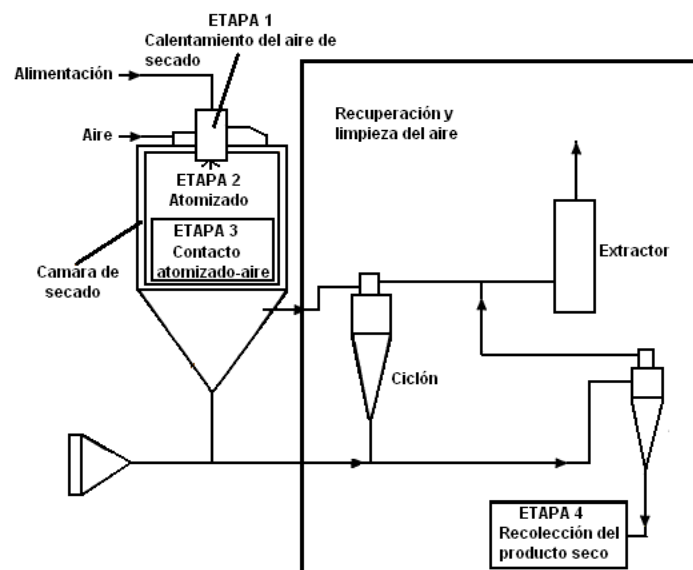


Figura 1.4 Etapas del proceso de secado por aspersión.

### **1.3.2.1 Calentamiento del aire de secado**

Existen dos tipos de calentadores que pueden ser utilizados en el proceso de secado por aspersion que son los calentadores de aire directos e indirectos. Los calentadores de aire directo, tales como gas o aceite, pueden ser utilizados donde el contacto entre el gas de combustión y el alimento atomizado es aceptable, mientras que los calentadores indirectos, tales como vapor de aire caliente indirecto, gas o aceite caliente indirecto, son utilizados cuando el contacto no es tolerado. Cuando los productos de combustión de combustibles fósiles no pueden estar en contacto con el producto, se recomienda un calentador indirecto (Mujumdar, 2004).

### **1.3.2.2 Atomización del alimento en partículas finas**

La característica principal del secado por aspersion es la formación de gotas atomizadas y su contacto con el aire. Esta etapa se logra al aplicar energía a la masa del líquido que va a ser procesado. Esta operación debe producir una nube de líquido con alta relación superficie-masa y la dispersión del tamaño de la partícula debe mantenerse al mínimo.

El tipo de atomizador determina la energía requerida para formar la nube, el tamaño y la distribución de tamaño de partículas atomizadas, su trayectoria y velocidad, siendo estos los factores de los que depende el tamaño final de la partícula seca.

Las boquillas de presión son utilizadas para formar partículas de 15 a 250  $\mu\text{m}$ . En este tipo de boquillas el líquido se bombea a una presión elevada, con un movimiento circular rápido a través de un pequeño orificio. La variación de la presión da un control sobre la velocidad de alimentación y las características del atomizado, donde éste último es inversamente proporcional a la presión; en cuanto al tamaño medio del material atomizado, este es directamente proporcional a la velocidad de alimentación y su viscosidad. Una de las boquillas utilizadas, son las boquillas de presión estriada,

el principio fundamental de este tipo de boquilla es la conversión de la energía de presión en energía cinética. Las hojas de líquido se rompen bajo la influencia de sus propiedades físicas y por los efectos de fricción con el aire (Barbosa-Canovas y Vega-Mercado, 1996).

### **1.3.2.3 Contacto del aire caliente con las partículas atomizadas**

La distancia que recorre la gota atomizada hasta el contacto con el aire de flujo depende del tamaño de la gota, la forma y la densidad. Las gotas grandes son independientes del flujo del aire mientras que las gotas finas se mueven por la influencia del flujo de aire (Masters, 1991). El movimiento del atomizado es clasificado de acuerdo a la disposición o arreglo del aire de secado, el cual se moverá con la corriente, en contra corriente o flujo mezclado (Mujumdar, 2004).

### **1.3.2.4 Secado de las gotas**

El paso más importante en la operación de secado por aspersion es la formación de las gotas. El intercambio de calor y masa, inicia después de que las gotas son liberadas del atomizador y continua mientras las gotas viajan con el aire caliente. La gota que consiste de agua y sólidos, en la misma proporción en el alimento líquido, empieza a perder agua en forma de vapor, y así inicia la formación de una partícula. Al final de la trayectoria de secado dentro del secador por aspersion la partícula está completamente formada y constituida principalmente con sólidos. La forma característica de los productos secados por aspersion depende si la temperatura del aire de secado está por encima o debajo del punto de ebullición de las gotas. Las partículas pueden ser rígidas porosas, rígidas con fracturas, flexibles, lisas y esponjas o cristales (Figura 1.5).

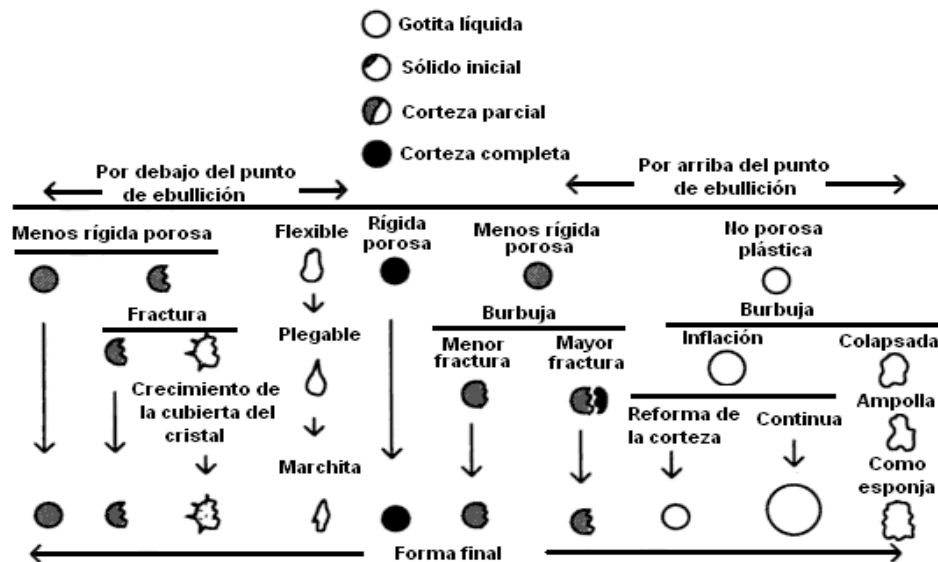


Figura 1.5 Características de las gotas sometidas a proceso de secado.

### 1.3.2.5 Recolección del producto seco

El producto seco que es arrastrado por el aire de salida desde la cámara de secado, deberá ser separado y colectado. Generalmente hay dos tipos de colectores, que son el colector seco y el colector húmedo. El colector seco incluye ciclones, filtro de bolsa y precipitadores electrostáticos, mientras que los colectores húmedos incluyen depuradores húmedos, ciclones húmedos y torres de pulverización.

Los colectores secos son utilizados en la primera etapa colectora del secado por aspersión, mientras que los precipitadores electrostáticos al tener un alto costo y a su mantenimiento son utilizados con menos frecuencia. Los ciclones son los primeros en ser escogidos debido a su bajo costo y bajos requerimientos de mantenimiento, sin embargo, su baja eficiencia en la colección (90-98 %) no es adecuada en algunos casos. Tomando en cuenta lo anterior, el filtro bolsa es utilizado en la segunda etapa de colección, la limitación clave del filtro bolsa es su mantenimiento y la dificultad de limpieza, por otro lado, la ruptura de la bolsa ocasiona pérdidas de producto y contaminación. El utilizar colectores húmedos implican costos adicionales, además el

líquido lavador necesita ser retratado y recirculado. Por lo tanto, la selección del colector depende del valor del producto y de las regulaciones ambientales (Mujumdar, 2004).

#### **1.4 Encapsulación**

La encapsulación se puede definir como el proceso donde se atrapa una sustancia dentro de otra, produciendo de este modo partículas con diámetros que van de unos pocos nm a unos cuantos mm. La sustancia que esta encapsulada puede ser llamada material núcleo, agente activo, fase interna o fase de carga útil. Las sustancias encapsulantes puede ser llamadas revestimiento, membrana, material vehículo, material de pared, fase externa o matriz. Los materiales utilizados para encapsular productos alimenticios deben ser de calidad alimentaria y capaz de formar una barrera entre el agente activo y sus alrededores (Zuidam y Shimoni, 2010).

La encapsulación involucra la incorporación de varios ingredientes dentro de una cápsula de aproximadamente 5 a 300 micras de diámetro y pueden distinguirse dos tipos de encapsulación, el tipo depósito (forma un revestimiento alrededor del agente activo) y el tipo matriz (el agente activo se encuentra disperso sobre el material de transporte). El revestimiento del agente activo puede ser formado por azúcares, gomas, proteínas, polisacáridos naturales y modificados, lípidos y polímeros sintéticos. Algunas ventajas de la encapsulación son el mantenimiento de las propiedades del alimento y su fácil almacenamiento, pues pasan del estado líquido al sólido. La estabilidad del material encapsulado puede ser mejorada debido a la protección contra el calor y la humedad, que otorga la cápsula (Pegg y Shahidi, 2007; Zuidam y Shimoni, 2010).

Muchos procesos de encapsulación se basan en formar inicialmente la gotita del agente activo (en forma gaseosa, líquida o en polvo) y estas gotitas son



posteriormente rodeadas por el material de pared en fase gaseosa o líquida a través de diferentes procesos fisicoquímicos como pueden ser: secado por aspersión, recubrimiento por lecho fluidizado, extrusión, emulsificación, co-extrusión, atrapamiento de liposomas, entre otros (Zuidam y Shimoni, 2010).

#### **1.4.1 Materiales de pared**

El secado por aspersión ha sido utilizado extensamente como una técnica de microencapsulación en la industria de los alimentos, es típicamente utilizada para la preparación de aditivos secos, alimentos estables y saborizantes. Una limitación de los métodos de encapsulación en el secado por aspersión es el limitado número de materiales de pared disponibles. Puesto que casi todos los procesos de secado por aspersión empleados en la industria de alimentos se encuentran en formulaciones acuosas, los materiales de pared deberán ser solubles en agua. Algunos materiales de pared utilizados en el proceso de secado por aspersión son la goma de acacia, maltodextrina, almidón hidrofólicamente modificado y una mezcla de los mismos, también pueden ser empleados polisacáridos (alginatos, carboximetil celulosa) y proteínas (de suero de leche, de soya, caseinato de sodio) pero su uso se hace tedioso y caro debido a su baja solubilidad en agua (Pegg y Shahidi, 2007; Wandrey *et al.*, 2010).

##### **1.4.1.1 Maltodextrinas**

Las maltodextrinas son hidratos de carbono obtenidos por hidrólisis parcial del almidón de maíz o papa mediante enzimas hidrolíticas ( $\alpha$ -amilasa) en medio ácido (ácido clorhídrico). Las maltodextrinas se clasifican por su grado equivalente de dextrosa (DE), que es una medida del poder reductor, teniendo como base 100 el de la dextrosa. Su composición química consiste en unidades de  $\alpha$ -D-glucosa unidas con enlaces  $\alpha$ (1-4) y con un bajo número de enlaces  $\alpha$ -(1,6) en posición aleatoria (Figura 1.5). A mayor DE, las cadenas lineales son más cortas y tienen mayor

contenido de maltosa y glucosa. Las maltodextrinas son agentes de carga, es decir, sustancias inertes que permiten aumentar los sólidos de un alimento sin un cambio concomitante en su viscosidad (Castro *et al.*, 2010; Wandrey *et al.*, 2010).

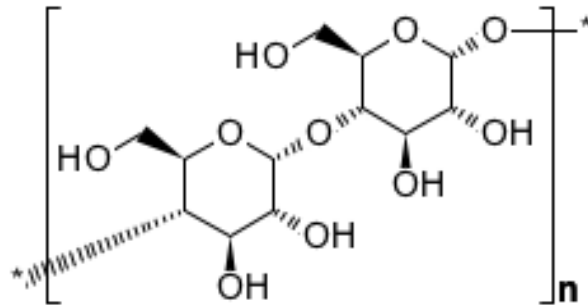


Figura 1.6 Formula estructural de la maltodextrina.

La maltodextrina comercial es de dos tipos, las que varían aproximadamente de 10 a 14 DE y aquellas que varían de 15 a 19 DE. Las composiciones de estos productos no solo dependen del grado equivalente de dextrosa (DE), sino también del método de hidrolisis empleado en su fabricación (Kennedy *et al.*, 1995). Las maltodextrinas son una herramienta básica en la industria alimentaria y se emplean principalmente para dispersar ingredientes secos, estabilizar alimentos con altas cantidades de grasas, y como auxiliar en el secado por aspersion de saborizantes, jugos de frutas y productos difíciles de secar, porque reducen los problemas de adhesión y aglomeración durante el almacenamiento, mejorando así la estabilidad de estos productos.

### 1.5 Propiedades fisicoquímicas de los alimento

La importancia de las propiedades fisicoquímicas en la industria de alimentos han sido reconocidas desde hace muchos años, recientemente se ha visto la necesidad de conocerlas, por lo que las investigaciones en este ámbito han aumentado considerablemente. En alimentos, se pueden definir, como aquellas propiedades que son importantes para el diseño de procesos y en la manufactura de alimentos y que

son medidas y expresadas en forma fisicoquímica. Hoy en día es necesario comprender las propiedades fisicoquímicas de los alimentos, porque estas se relacionan con diferentes aplicaciones como son el procesamiento, preservación, almacenamiento y control de calidad de los alimentos (Rahman, 2009).

Al deshidratar los alimentos, se producen cambios físicos y químicos que influyen en la calidad final, el interés por mejorar la calidad de este tipo de productos conduce a estudiar diferentes propiedades fisicoquímicas de los alimentos, porque estas evalúan y definen las características finales, vida útil y precio del producto deshidratado. Las investigaciones llevadas a cabo en este campo han permitido minimizar los aspectos negativos de los productos deshidratados de manera que las industrias de este sector ofrecen al mercado productos secos de rápida constitución que poseen propiedades sensoriales lo más parecidas a las del alimento fresco (Muñoz-López, 2013).

### **1.5.1 Actividad de agua ( $a_w$ )**

Todos los alimentos contienen agua, por lo que estos son propensos a mostrar un rápido deterioro debido a cambios biológicos y químicos referidos al alto contenido de agua. Las propiedades reológicas y de textura dependen del agua libre contenida en un alimento, y está es responsable en gran medida de las reacciones químicas, enzimáticas y microbiológicas, que son las tres principales causas del deterioro de un producto, y el agua ligada que está unida a la superficie sólida, no puede intervenir en estos procesos. Los criterios relacionados con el agua y que han sido utilizados para describir la estabilidad de los alimentos incluyen el contenido de agua, la concentración de soluto, la presión osmótica, la humedad relativa en equilibrio y la actividad de agua (Barreiro y Sandoval, 2006; Rahman y Sablani, 2009).

La actividad de agua ( $a_w$ ) es la relación que existe entre la presión parcial de vapor de agua contenida en el alimento ( $p$ ) con respecto a la presión parcial de vapor de

agua pura ( $p_o$ ) a la misma temperatura, y su expresión matemática está dada por la ecuación (1.1).

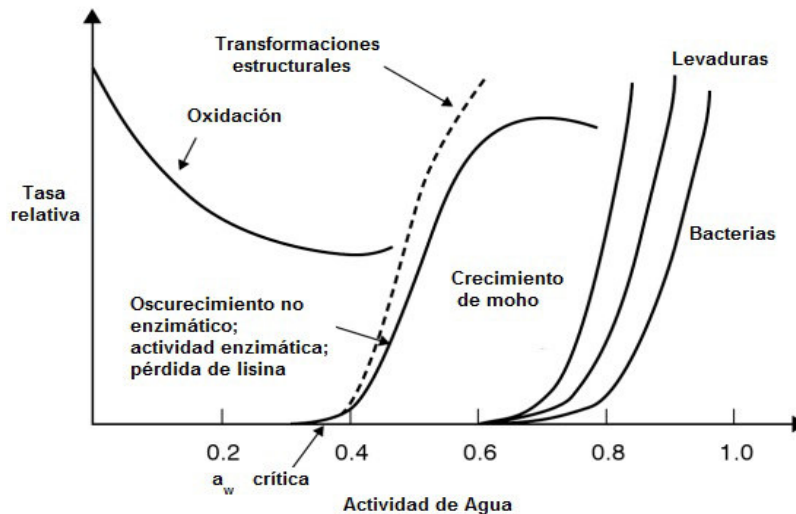
$$a_w = \frac{p}{p_o} = \frac{HR}{100} \quad (1.1)$$

Como se puede apreciar en la ecuación anterior, la actividad de agua representa la humedad relativa (HR) ambiental (generalmente aire u otro gas que rodee el alimento) que se encuentra en equilibrio termodinámico con el agua presente en el alimento. El agua pura tiene una actividad de agua de 1.0 (Barreiro y Sandoval, 2006; Troller, 2012).

El estudio del efecto de la actividad de agua en los alimentos no solo sirve para definir la estabilidad microbiana del producto, sino también para conocer las reacciones bioquímicas y sus interacciones sobre la estabilidad de los alimentos (Figura 1.7). Actualmente es bien conocido que los microorganismos no pueden crecer en alimentos deshidratados, cuando el intervalo de actividad de agua es menor o igual que 0.6-0.7. La deshidratación se basa en la eliminación del agua, por lo que esta no está disponible para promover el crecimiento microbiano. Ninguna de las bacterias patógenas que son asociadas con los alimentos, tales como *Clostridium* o *Vibrio spp.*, causantes del botulismo y del cólera, pueden multiplicarse con valores de  $a_w$  por debajo de 0.9, por lo tanto el secado es el método más efectivo para prevenir el crecimiento de bacterias que causan intoxicaciones alimenticias (Cybulska y Doe, 2007; Troller, 2012).

Las levaduras osmofílicas y algunos mohos pueden crecer con actividades de agua en el intervalo de 0.6 a 0.65, por lo tanto, mediante la reducción de la actividad de agua por debajo de estos valores permiten obtener un alimento estable microbiológicamente. Sin embargo, reacciones químicas, enzimáticas y no enzimáticas pueden acelerarse y causar cambios en el color, el sabor y estabilidad

del alimento para estos valores de  $a_w$ . Las reacciones de Maillard que producen la pérdida de lisina y reacciones de oscurecimiento se desarrollan con actividades de agua de aproximadamente 0.5 a 0.8. La oxidación no enzimática de lípidos aumenta rápidamente por debajo de 0.4, mientras que la hidrólisis enzimática presenta una disminución a actividades de agua de 0.3 (Cybulska y Doe, 2007; Chen, 2008).



**Figura 1.7** Tasa de reacciones químicas y bioquímicas en función del  $a_w$ .

### 1.5.2 Humedad (X)

La humedad indica la cantidad de agua presente en una muestra, su estimación durante y después del procesamiento de alimentos se convierte en una parte esencial de la vigilancia y control de calidad. El contenido de humedad puede expresarse en base seca o en una base húmeda. La humedad en base húmeda ( $X_{wb}$ ) es la cantidad de agua por unidad de masa de muestra húmeda y está definida matemáticamente por la ecuación (1.2).

$$X_{wb} = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de la muestra húmeda}} \quad (1.2)$$

La humedad en base seca ( $X_{db}$ ) es la cantidad de agua por unidad de masa de sólido seco, la cual se define matemáticamente por la ecuación (1.3).

$$X_{db} = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de la muestra seca}} \quad (1.3)$$

El contenido de humedad de los alimentos no elaborados o frescos se expresa generalmente en base humedad, pero muchos productos alimenticios que son sometidos a un proceso de secado su contenido de humedad es expresada en base seca, debido a que esta permanece constante a lo largo del proceso de secado, por tanto, a no ser que se indique lo contrario, se entenderá por humedad de un sólido el peso de agua que acompaña a la unidad de peso del sólido seco (Bhuyan, 2007; Domínguez-Niño, 2013).

### **1.5.3 Color ( $L$ , $a$ y $b$ )**

El color es una característica importante para evaluar a un producto, en especial con los alimentos esto debido a que está directamente ligada a su relación con el sabor y el aroma de los productos, por ello es importante evaluarlo, ya que representa la primera impresión del consumidor para aceptarlo, comprarlo y posteriormente consumirlo.

El color es una respuesta mental al estímulo producido en la retina por una radiación luminosa visible, pero la medida de este estímulo depende de las condiciones que lo rodean. El estímulo cromático está caracterizado por la colorimetría triestímulo, lo cual permite obtener una medida objetiva de color por medio de tres sensaciones o atributos psicométricos, de dan fácilmente un carácter tridimensional a este estímulo. Estos son: la tonalidad, la luminosidad y la saturación. La tonalidad o matiz, se refiere a aquella característica que permite clasificar un color como rojo, amarillo, verde o azul, y está relacionado con las diferencias de absorbancia/transmitancia de la

energía radiante a diferentes longitudes de onda. La saturación o pureza, describe la intensidad con la que un color se separa del gris neutro y se acerca a un color puro del espectro, y describe la reflexión o transmisión a una determinada longitud de onda. La luminosidad o brillo, permite clasificar el color como claro u oscuro, y se define como la característica de una sensación de color que la hace equivalente a la producida por algún elemento en la escala de grises que va desde el blanco, máxima luminosidad (100), hasta el negro, mínima luminosidad (0), estableciendo un si un elemento es más claro u oscuro.

El sistema  $L, a, b$  de Hunter se desarrolló tomando como base la teoría de los colores opuestos de Hering; con las cuales se establecen coordenadas triestímulo dentro de un espacio cartesiano (Figura 1.8), donde  $L$  corresponde a la luminosidad o brillo, mientras que  $a$  y  $b$  a la cromaticidad. Específicamente  $a$  define el componente 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. Los colores son tanto más saturados cuanto más separados se encuentran del centro del espacio de color Hunter  $L, a, b$  que los definen.

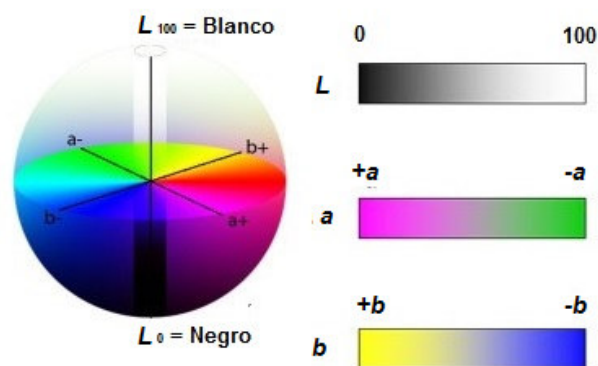


Figura 1.8 Diagrama Hunter  $L, a, b$ .

El espacio de color CIELAB es similar al espacio de color de Hunter, pero la diferencia es la representación de la escala que se establece en coordenadas cilíndricas y usa las variables  $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h^0$ , donde  $L^*$  es la luminosidad,  $C^*$  es Chroma (saturación), y  $h^0$  es Hue, estos últimos son definidos por las siguientes ecuaciones (Calvo, 2004).

$$C^* = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

$$h^0 = \left| \tan^{-1} \left( \frac{a}{b} \right) \right| \quad (1.5)$$

## 1.6 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos ortogonal es una rama importante de las matemáticas estadística, basada en la teoría de la probabilidad, la estadística matemática, y la tabla ortogonal normalizada para organizar un plan de pruebas. Es un método de diseño de pruebas científicas, que selecciona la cantidad adecuada de puntos representativos o utiliza casos de un gran número de datos experimentales, así como para organizar experimentos o ensayos razonables. La tabla ortogonal es la base del diseño de experimentos ortogonal y está formada de la siguiente manera:

$$L_n m^k \quad (1.6)$$

La  $L$  es el símbolo de la tabla ortogonal;  $n$  es el número de ensayos organizados por la tabla ortogonal, ese es el número de filas que corresponde al número de casos de prueba;  $m$  es el número de factores dispuestos en la tabla ortogonal, es el número de columnas que corresponden a los parámetros estudiados,  $k$  es el número de niveles de cada factor o parámetro (Wu, 2013).



La agrupación de las variables en columnas que forman una matriz llamada arreglo ortogonal, donde se puede extraer información mucho más precisa si los experimentos se llevaran a cabo con un único factor por el enfoque de un solo factor. En cada par de columnas ortogonales, todas las combinaciones de diferentes niveles variables se producen, y se producen el mismo número de veces. Por lo cual, este método permite estudiar muchos factores simultáneamente, con un número relativamente pequeño de corridas experimentales y es capaz de estimar por separado los efectos de cada uno de estos sobre las variables de respuesta (Khosrow, 1989; Bolboacă y Jäntschi, 2007).

La selección del arreglo ortogonal adecuado depende básicamente de dos características: el número de factores e interacciones de interés y el número de niveles para los factores que serán evaluados (Roy, 2001). Por ejemplo, en estudios sobre secado por aspersión se ha utilizado el arreglo ortogonal  $L_{16}4^4$  para evaluar los efectos de algunos factores, como son: la temperatura del aire de entrada, la velocidad del flujo de aire, la temperatura del aire de salida y la concentración de la alimentación sobre las propiedades del producto final (Zhang *et al.*, 2010).

### **1.7 Estudios realizados sobre secado por aspersión**

La aplicación del secado por aspersión es de gran utilidad para la conservación de alimentos, algunos estudios que se han reportado son los siguientes:

Gong *et al.* (2008) realizaron el estudio de secado por aspersión y aglomeración de polvo instantáneo de arrayan donde las condiciones de trabajo fueron variadas dentro de diferentes intervalos: temperatura del aire de entrada de 140-160 °C, temperatura del aire de salida de 65-85 °C, maltodextrina 12 y 19 DE, concentración de alimentación de 7-17 °B. Evaluaron los parámetros de color y el contenido de humedad del polvo de arrayan, encontrando que el contenido de humedad era afectado principalmente por la temperatura del aire de entrada y de salida, la

cantidad de maltodextrina y la concentración de alimentación, mientras que la temperatura del aire de entrada y de salida tuvo efectos importantes sobre el color.

Zhang *et al.* (2010) estudiaron el secado por aspersion de las semillas de *Ginkgo biloba* (GB) mediante un arreglo ortogonal L<sub>16</sub>4<sup>4</sup> empleando como factores la temperatura del aire de entrada y de salida, la velocidad del flujo de aire y la concentración de alimentación. Analizaron los efectos de estos cuatro parámetros sobre el producto seco, evaluando el contenido de humedad, la diferencia de color, el tamaño medio de partícula y el contenido de proteínas. Mostrando que la temperatura del aire de salida afectaba significativamente la humedad y el contenido de proteínas; la concentración del alimento afecto el tamaño medio de la partícula del polvo de GB; mientras que el color del polvo se vio afectado por la temperatura del aire de entrada y salida, y la concentración del alimento.

Solval *et al.* (2012) desarrollaron jugo de melón (*Curcumis melo*) en polvo usando la tecnología de secado por aspersion para evaluar sus propiedades nutricionales y físicas. Emplearon jugo de melón adicionado con maltodextrina al 10 % y utilizaron temperaturas de entrada de aire de 170, 180 y 190 °C, analizaron la humedad, actividad de agua, vitamina C, β-carotenos, la disolución y la microestructura; encontrando que el contenido de vitamina C y β-caroteno fue mayor para la temperatura de 170 °C.

Con respecto al pulque, únicamente se han encontrado trabajos que se enfocan en la determinación del contenido nutrimental y aislamiento de microorganismos, dentro de los cuales se pueden mencionar los siguientes:

Massieu *et al.* (1949) determinaron el contenido de aminoácidos esenciales en varios alimentos crudos y cocidos mexicanos. Reportando para el pulque contenido lisina, triptófano, histidina, fenilalanina, leucina, treonina, metionina, valina y arginina.

Cravioto *et al.* (1951) dieron a conocer la composición de alimentos mexicanos, donde reportaron el contenido de proteínas, calcio, fosforo, humedad, cenizas, hierro, carotenos, tiamina, riboflavina, niacina y ácido ascórbico del pulque.

Escalante *et al.* (2008) realizaron el estudio y caracterización de la comunidad bacteriana presente durante la fermentación del pulque, encontrando que la diversidad bacteriana en el aguamiel está compuesta principalmente por bacterias heterofermentativas (*Leuconostoc citreum*, *L. mesenteroides*, *L. kimchi*),  $\gamma$ -Proteobacterias (*Erwinia rhapontici*, *Enterobacter spp.*) y *Acinetobacter radioresistens* y que al final del proceso de fermentación, la diversidad microbiana se compone principalmente por *Lactobacillus acidophilus* homofermentativo, *L. mesenteroides* heterofermentativo, *Lactococcus lactis subsp. lactis* y la  $\alpha$ -Proteobacteria *A. malorum*.

León-de la O *et al.* (2012) realizaron el análisis bromatológico y aislamiento de microorganismos con potencial probiótico del pulque, encontrando un contenido pobre en carbohidratos, proteínas y alcohol, sin embargo, se aislaron ocho microorganismos, seis bacterias (cinco bacilos y un coco) y dos levaduras, con técnicas microbiológicas convencionales. Además reportaron que una de las levaduras y un bacilo fueron resistentes a pH ácido y a jugo gástrico artificial, por lo que esos microorganismos pueden tener potencial probiótico.

Por lo mencionado anteriormente se observa que actualmente no existe ningún trabajo reportado sobre el proceso de secado por aspersión del pulque. Por lo cual, en este trabajo de tesis se está proponiendo evaluar el efecto de las variables del proceso de secado por aspersión sobre las características fisicoquímicas y el contenido de ácido ascórbico y calcio del pulque en polvo.

## **CAPITULO 2**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

## CAPITULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Metodología general

En la Figura 2.1, se muestra la metodología general del proceso de secado por aspersión del pulque que se siguió para el desarrollo de este proyecto. Básicamente consistió en cuatro etapas, que son la obtención del pulque, acondicionamiento de la muestra, aplicación del proceso de secado por aspersión y evaluación de las variables de proceso.

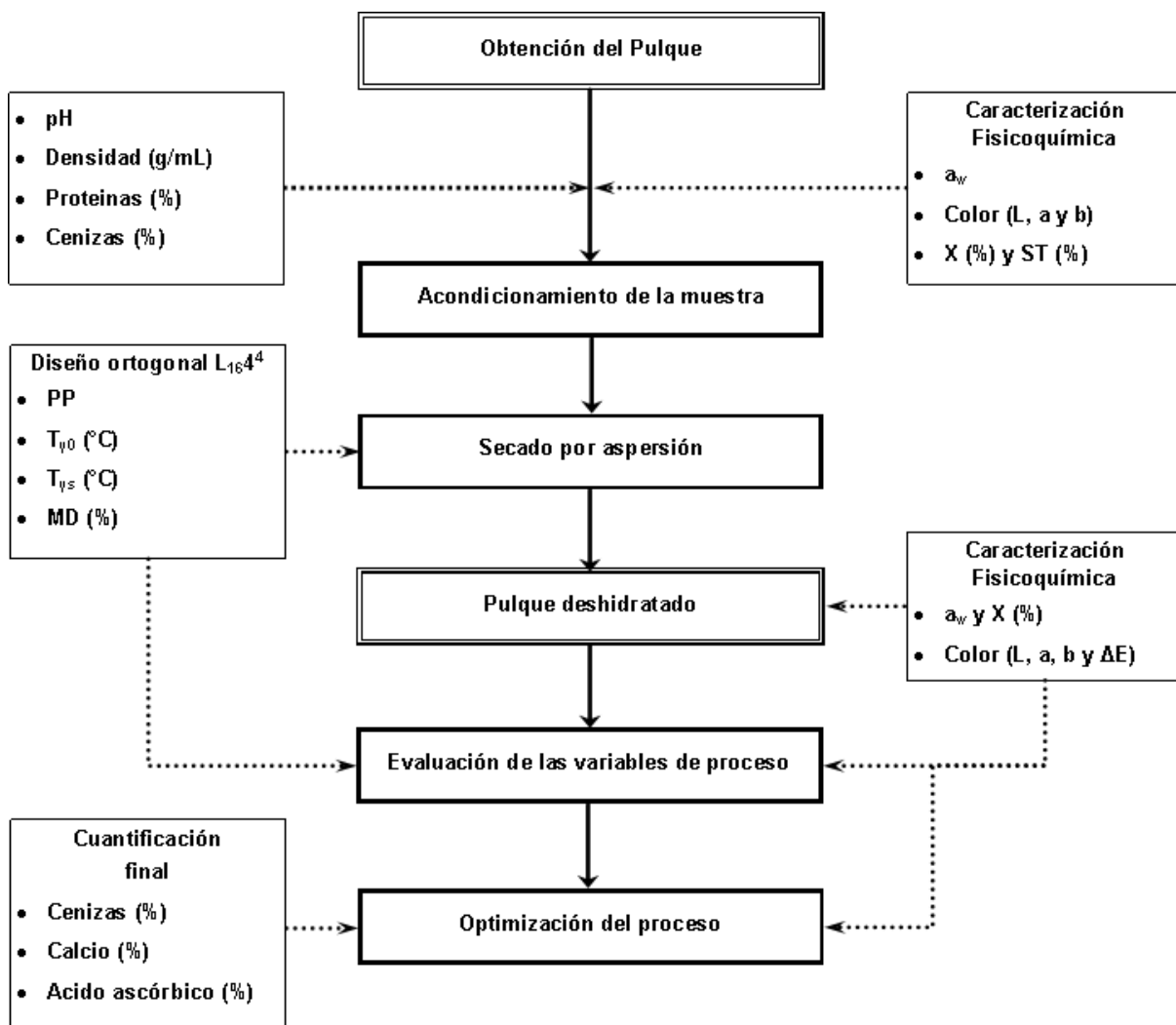


Figura 2.1 Metodología general del proceso de secado por aspersión del pulque.

## 2.2 Selección de la materia prima

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizó pulque, proveniente del *Agave salmiana*, procedente de la región de Maltrata, Veracruz, San Felipe, Puebla, San Francisco Atlautla, Estado de México y Apizaco, Tlaxcala. La materia prima que se utilizó corresponde a un pulque fresco, con un tiempo de fermentación no mayor a 72 h (Figura 2.2).



Figura 2.2 Muestras de pulque fresco.

## 2.3 Acondicionamiento de la muestra

Antes de realizar el proceso de secado por aspersión fue necesario acondicionar la muestra mediante la adición de maltodextrina ED-10 (INAMAL, IMSA) con la finalidad de controlar el contenido de sólidos presentes en las muestras, evitar la adhesión en las paredes de la cámara de secado, proteger los agentes activos (ácido ascórbico) de la degradación por efectos del ambiente exterior (humedad, calor, aire y luz), y por qué nos permiten la formación de polvos de libre flujo sin alterar el sabor original cuando son utilizadas como ingredientes en alimentos, ya que estas son incoloras y de baja viscosidad a altas concentraciones.

Para los distintos experimentos se prepararon soluciones de pulque con 5, 10, 15 y 20 % de maltodextrina. Se pesó en una balanza electrónica OHAUS SP6000 cantidades de entre 25 a 75 g de maltodextrina y fueron disueltas en 500 mL de pulque mediante agitación utilizando un agitador magnético Cimarec Thermolyne, a temperatura ambiente.

## **2.4 Proceso de secado**

Para el proceso de secado por aspersión se empleó un secador Mini Spray Dryer modelo B-290 marca Büchi, dicho proceso se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones: temperatura del aire de entrada a 160, 180, 200 y 220 °C; temperatura del aire de salida a 80, 90, 100 y 110 °C y con la adición de maltodextrina (% MD) al 5, 10, 15 y 20 %.

### **2.4.1 Secador por aspersión**

La Figura 2.3 muestra el secador por aspersión Mini Spray Dryer modelo B-290 marca Büchi ubicado en el laboratorio de Bioprocesos del Instituto Tecnológico de Orizaba que se utilizó para el secado del pulque. Este secador opera con una temperatura de entrada máxima de 220 °C, el flujo de aire máximo es de 35 m<sup>3</sup>/h, su capacidad de evaporación es de 1.0 L/h H<sub>2</sub>O, el tiempo de residencia medio va de 1 a 1.5 s y los posibles diámetros de partículas pueden variar en el rango de 1 a 25 µm.



**Figura 2.3** Mini Spray Dryer modelo B-290.

Este equipo cuenta con los siguientes accesorios:

- Bomba peristática
- Atomizador
- Disco rotatorio
- Cámara de secado
- Ciclón
- Válvula rotativa
- Ventilador



## 2.5 Diseño de experimentos

Con el objetivo de evaluar el efecto de las variables del proceso de secado por aspersión del pulque, se aplicó un diseño de experimentos ortogonal  $L_{16}4^4$  el cual nos permite variar un gran número de condiciones experimentales (factores) en diferentes niveles con un número relativamente pequeño de corridas, además, es capaz de estimar por separado los efectos de cada condición experimental sobre las variables de respuesta, como ya se mencionó en el capítulo uno. Los factores y niveles empleados para este trabajo de investigación se presentan en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1** Factores y niveles para el diseño de experimentos ortogonal  $L_{16}4^4$  del proceso de secado por aspersión del pulque.

Factores	Niveles			
	1	2	3	4
Procedencia del pulque (PP)	Veracruz	Puebla	México	Tlaxcala
Temperatura del aire de entrada ( $T_{y0}$ , °C)	160	180	200	220
Temperatura del aire de salida ( $T_{ys}$ , °C)	80	90	100	110
Adición de maltodextrina (% MD)	5	10	15	20

En la Tabla 2.2 se muestra de manera codificada cada uno de los experimentos que se realizaron, correspondiendo los valores 1, 2, 3 y 4 a los cuatro niveles de cada variable. Para cada uno de los experimentos se realizó una réplica.

**Tabla 2.2** Datos codificados para el diseño de experimentos ortogonal  $L_{16}4^4$ .

Experimento	Factores			
	PP	$T_{y0}$ (°C)	$T_{ys}$ (°C)	MD (%)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

Las variables de respuesta evaluadas durante el proceso de secado por aspersión del pulque, fueron:

- Humedad de la muestra ( $X$ ).
- Actividad de agua ( $a_w$ ).
- Diferencia de color ( $\Delta E$ ).
- Rendimiento ( $R$ ).

Para cada respuesta, fueron obtenidos los modelos polinomiales (ecuación 2.1) con la ayuda del software estadístico Minitab 17 y NCSS 2007 para Windows. El modelo polinomial de la ecuación 2.1 obtenido para cada una de las respuestas fue utilizado para obtener sus respectivas superficies de respuesta, así como los gráficos de contornos. Además mediante estos modelos podemos observar el comportamiento

de cada una de las respuestas en función de los factores procedencia del pulque ( $x_1$ ), temperatura de aire de entrada ( $x_2$ ), temperatura de aire de salida ( $x_3$ ) y adición de maltodextrina ( $x_4$ ).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{44} X_4^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \dots \\ \dots + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{14} X_1 X_4 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{24} X_2 X_4 + \beta_{34} X_3 X_4 \quad (2.1)$$

## 2.6 Caracterización fisicoquímica del pulque

Para llevar a cabo el proceso de secado por aspersión es importante considerar y evaluar algunas propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas, tanto del pulque líquido como del pulque deshidratado. Por lo tanto, se realizó el análisis fisicoquímico antes y después del proceso de secado evaluando el pH, humedad, sólidos totales, actividad de agua ( $a_w$ ), parámetros de color ( $L$ ,  $a$  y  $b$ ), densidad, cenizas, proteínas y en el producto final se determinó el contenido de cenizas, ácido ascórbico y calcio.

### 2.6.1 pH

Para realizar las mediciones de pH se utilizó un pH-metro portátil CONDUCTRONIC modelo pH100 con un electrodo P100C. Antes de determinar el pH del pulque líquido, el equipo debió ser calibrado ya que esto permite tener una mayor exactitud en las mediciones y un menor índice de error, esto se realizó con una solución Buffer pH  $7 \pm 0.02$ , a  $25^\circ\text{C}$  (HACH). Posteriormente se midió el pH de las muestras de pulque a una temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .

Un alimento con pH de 4.6 o menos se considera que tiene una alta acidez y no permite el crecimiento de esporas bacterianas, por lo tanto, estos alimentos son resistentes a la descomposición bacteriana, mientras que las levaduras pueden crecer en un rango de pH de 4 a 4.5 y los mohos a partir de 2 hasta 8.5; es por esta razón que es importante conocer el pH de los alimentos (Battcock y Azam-Ali, 1998).

### **2.6.2 Humedad y solidos totales**

Para determinar el contenido de humedad (X) y de sólidos totales (ST) de las muestras se utilizó una termobalanza de halógeno marca OHAUS, modelo MB35. La determinación se llevó a cabo colocando un platillo de aluminio dentro de la cámara de secado, donde se depositó aproximadamente 1 g de pulque (líquido o en polvo), distribuyéndose homogéneamente en el platillo, programándose a una temperatura de 65 °C y seleccionando el tiempo de secado en forma automática, al finalizar la lectura, la termobalanza proporcionó el valor de la humedad en base húmeda y por diferencia de peso se obtuvo el valor de las solidos totales.

### **2.6.3 Actividad de agua**

El contenido de agua por sí solo no es un indicador fiable de la estabilidad de los alimentos, ya que alimentos con el mismo contenido de agua difieren en su carácter perecedero. La actividad de agua es un mejor indicador del carácter perecedero de los alimentos (Bradley, 2010). La actividad de agua ( $a_w$ ) se midió con un medidor de actividad de agua marca AQUALAB serie 3, modelo TE, este instrumento utiliza la técnica de punto de rocío para la medición del  $a_w$  de una sustancia, donde la muestra se mantiene en equilibrio con el espacio principal de una cámara sellada que contiene un espejo y un medio de detección de condensación en este espejo. En equilibrio la humedad relativa del aire en la cámara equivalente a la actividad de agua de la muestra.

La medición se realizó colocando una muestra de aproximadamente 1 g de pulque (líquido o en polvo) en una capsula de polietileno, la cual es introducida en la cámara deslizable del equipo, a una temperatura de  $25 \pm 1$  °C, una vez terminada la prueba el equipo proporciona el valor de la actividad de agua.

### 2.6.4 Análisis de color

La determinación del color se realizó utilizando un colorímetro ColorQuest XE, marca HunterLab para el pulque líquido y un colorímetro MiniScan XE plus, marca HunterLab para el pulque deshidratado. La medición se efectuó depositando la muestra de pulque (líquido o deshidratado) en el interior del equipo, y mediante el programa Universal Software versión 4.10 se realizó la adquisición de los parámetros de color correspondientes a luminosidad  $L$ , cromaticidad  $a$  y  $b$ . con estos parámetros se obtuvo la diferencia de color ( $\Delta E$ ), que es un resumen matemático de los tres valores  $L$ ,  $a$  y  $b$  (ecuación 2.2) el cual indica la composición de la diferencia total de color de la muestra al final del proceso de secado comparada con respecto a un estándar (placa blanca.).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (2.2)$$

Donde:

$$\Delta L = L_{final} - L_{inicial} \quad (2.2a)$$

$$\Delta a = a_{final} - a_{inicial} \quad (2.2b)$$

$$\Delta b = b_{final} - b_{inicial} \quad (2.2c)$$

### 2.6.5 Densidad

La densidad del pulque se determinó empleando una balanza analítica Sartorius TE214S y un picnómetro Fisher. El picnómetro se lavó y se enjuagó con agua destilada, se secó en una estufa a una temperatura de 100 a 110 °C por una hora, se dejó enfriar durante media hora y se pesó, se repitió la operación hasta que el

picnómetro se encontrara a peso constante, y el dato se registró como  $M_t$ . Posteriormente se llenó totalmente el picnómetro con agua destilada a una temperatura de 20 °C teniendo cuidado que el líquido desplazado no escurriera por el capilar, se puso el tapón y se determinó su masa como  $M_a$ ; a continuación se vació el agua del picnómetro y se llenó con la muestra de pulque a una temperatura de 20 °C, cuidando que el pulque desplazado no escurriera por el capilar, absorbiéndolo con un papel filtro, y se determinó la masa como  $M_m$ .

La densidad del pulque se obtuvo utilizando la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{M_m - M_t}{M_a - M_t} \rho_{H_2O} \quad (2.3)$$

### 2.6.6 Determinación de proteínas

Para determinar la cantidad de proteínas contenidas en el pulque se utilizó un digestor de proteínas marca NOVATECH. Se aplicó el método Kjeldahl para analizar nitrógeno orgánico. En esta técnica se digieren las proteínas del pulque líquido o en polvo y otros componentes orgánicos con ácido sulfúrico en presencia de catalizadores como sulfato de potasio y sulfato de cobre. El nitrógeno orgánico total es convertido en sulfato de amonio. La mezcla digerida se neutraliza con hidróxido de sodio al 30 % y se destila posteriormente en una solución de ácido bórico al 3 %. Los aniones del borato así formados se titulan con ácido clorhídrico normalizado (HCl 0.1 N), los cuales se convierte en el nitrógeno de la muestra.

Se utilizó la ecuación (2.4) para calcular el contenido de proteína cruda del pulque líquido.

$$\% \text{ proteínas} = \frac{14 \times N \times V \times 100 \times \text{factor}}{m \times 100} \quad (2.4)$$

### 2.6.7 Determinación de cenizas

El contenido de cenizas es importante ya que representa el contenido total de minerales en los alimentos. La determinación en seco es el método más común para cuantificar la totalidad de minerales en los alimentos y se basa en la descomposición de la materia orgánica quedando solamente materia inorgánica en la muestra (Marshall, 2010).

Para determinar el contenido de cenizas se utilizó un crisol a peso constante donde se pesaron de 5 a 10 g de muestra en una balanza analítica Sartorius TE214S. Posteriormente se secó la muestra durante 2 horas a una temperatura de 200 °C y consecutivamente la muestra se calcinó en la mufla a Thermo Scientific a una temperatura de 500 °C hasta obtener cenizas de color blanco o grisáceo. El contenido de cenizas se calculó de la siguiente manera (ecuación 2.5).

$$\% \text{ cenizas (base seca)} = \frac{m_{\text{cenizas}} \times 100}{m_{\text{alimento}}} \quad (2.5)$$

### 2.7 Calculo del rendimiento

El rendimiento del pulque en el proceso de secado por aspersion se determinó realizando un balance de materia, el cual permitió calcular la cantidad teórica del pulque en polvo. El rendimiento va a estar en función principalmente de la cantidad del pulque deshidratado obtenido en los diferentes tratamientos de secado y queda expresado por la ecuación 2.6.

$$R = \left( \frac{P_{\text{exp}}}{P_{\text{calc}}} \right) \times 100 \quad (2.6)$$

## 2.8 Optimización del proceso de secado por aspersion de pulque

La optimización del proceso de secado por aspersion de pulque proveniente de *Agave salmiana* se llevó a cabo mediante la técnica de superficie de respuesta. Se utilizó un diseño experimental ortogonal  $L_{16}4^4$  donde  $L_{16}$  representa el número de experimentos realizado y  $4^4$  se refiere a que fueron empelados cuatro factores con cuatro niveles. Las corridas experimentales para este diseño se presentaron en la sección 2.5, en la Tabla 2.2. Se deben obtener diferentes superficies para las variables de respuesta humedad ( $X$ ), actividad de agua ( $a_w$ ), diferencia de color ( $\Delta E$ ) y rendimiento ( $R$ ) y se efectúa una superposición de superficies de respuesta para obtener la región del óptimo. Para llevar a cabo esto, fue necesario obtener los modelos de regresión lineal de segundo orden (ecuación 2.7). Por consiguiente, el problema de optimización fue indicado como:

$$\begin{aligned} \min X &= fX(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ \min a_w &= fa_w(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ \min \Delta E &= f\Delta E(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ \max R &= fR(x_1, x_2, x_3, x_4) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Sujeto a,

$$1 \leq x_1, x_2, x_3, x_4 \leq 4 \quad (2.8)$$

$$X = fX(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 10 \quad (2.9)$$

$$a_w = fa_w(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 0.6 \quad (2.10)$$

Estas restricciones (ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10) fueron consideradas, debido a que el valor de las variables involucradas deben estar entre los valores 1 y 4 (valores



codificados de los valores reales); además en el caso de la humedad y la actividad de agua, para que un producto deshidratado se considere estable, el contenido final de humedad y actividad de agua de dicho producto debe ser menor o igual a 10 % y 0.6, respectivamente.

## 2.9 Validación de los puntos óptimos

Para validar los puntos óptimos de las variables del proceso de secado por aspersión de pulque, se realizó el secado por aspersión del pulque a las condiciones óptimas siguiendo la metodología establecida para las corridas experimentales, la cual fue descrita en la sección 2.4 del presente capítulo. El secado por aspersión de pulque a las condiciones óptimas, se llevó por duplicado, con el fin de obtener el porcentaje de erro relativo entre el valor experimental y el predicho por el modelo para cada una de las variables de respuesta ( $X$ ,  $a_w$ ,  $\Delta E$  y  $R$ ) con la siguiente ecuación:

$$E_R = \frac{|(V_{predicho} - V_{exp})|}{V_{exp}} \times 100 \quad (2.11)$$

Además, también se cuantificó el contenido de proteínas, cenizas, calcio y vitamina C, esto con la finalidad de tener un análisis más completo del proceso de secado por aspersión de pulque en condiciones óptimas.

### 2.9.1 Contenido de calcio

El contenido de calcio se determinó preparando una solución de cenizas. Primero se obtuvieron cenizas del pulque en polvo como se describió en el apartado anterior, posteriormente se preparó la solución de cenizas agregando en el crisol que contenía la muestra 5 mL de ácido clorhídrico 1:1, se calentó la mezcla a baja temperatura hasta sequedad, pero evitando la pérdida de cenizas, se agregaron nuevamente 5 mL de ácido clorhídrico 1:1 y se calentó suavemente por 15 min. Se trasladó la

solución con ayuda de agua destilada a un matraz aforado de 100 mL y se aforó. Se tomó una alícuota de 50 mL y se transfirió a un vaso de precipitados de 500 mL. Se agregó agua destilada hasta un volumen aproximado de 150 mL.

Posteriormente se ajustó a pH 3 con hidróxido de amonio y ácido clorhídrico 1.1 y se calentó la solución suavemente hasta ebullición. Se agregaron 10 mL de solución de oxalato de amonio, se tapó el vaso de precipitado y se guardó en la oscuridad por un tiempo mínimo de 4 h. Se filtró la solución con papel Whatman No. 40 y se lavó con agua destilada, mínimo tres veces. Se tomó el papel filtro y se colocó en un vaso de precipitado, se añadieron aproximadamente 50 mL de agua destilada y se agitó suavemente. Se añadieron 7 mL de ácido sulfúrico concentrado, teniendo cuidado de no caer directamente sobre el papel filtro, se calentó suavemente hasta ebullición y se tituló con permanganato de potasio 0.05 N a 70 °C hasta la aparición de color rosa. El contenido de calcio expresado en porcentaje se calculó mediante la ecuación 2.12:

$$\%Ca = \frac{V_{KMnO4} \times N_{KMnO4} \times 20.004 \times V_t}{A \times P \times 1000} \times 100 \quad (2.12)$$

Para expresar el contenido de calcio en mg, se sabe que por cada mililitro gastado de permanganato de potasio en la titulación corresponde a un mg de calcio presente en la muestra.

### 2.9.2 Contenido de ácido ascórbico (Vitamina C)

Para la extracción del ácido ascórbico, se utilizaron aproximadamente 10 g de pulque en polvo. La muestra se pesó en un matraz volumétrico al cual se le agregaron 20 mL de ácido metafosfórico al 10 % y 50 mL de agua destilada a 55 °C, se dejó enfriar la solución y se llevó a volumen con agua destilada. La solución se filtró sobre un

filtro plegado con una velocidad de filtración media. Posteriormente se utilizó un método redox para la valoración, empleando yodo como agente oxidante.

Para la valoración se empleó yodo 0.01 N, y almidón al 1 %. De la solución extractora se tomó una alícuota de 10 mL y se agregaron 10 gotas de almidón al 1 %, se valoró la muestra con yodo hasta obtener un color azul. La cantidad de ácido ascórbico presente en las muestras se calculó con la ecuación 2.13.

$$Aa (mg / 100 g) = \frac{a \times T \times V_{total}}{v_{filtrado} \times m} \times 100 \quad (2.13)$$

## **CAPITULO 3**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## CAPITULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Caracterización fisicoquímica del pulque

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizó pulque, proveniente del *Agave salmiana*, procedente de los estados de Veracruz, Puebla, México y Tlaxcala, el cual se caracterizó fisicoquímicamente. La Tabla 3.1 muestra el promedio de los resultados obtenidos por triplicado del estudio de su caracterización.

**Tabla 3.1** Caracterización fisicoquímica del pulque.

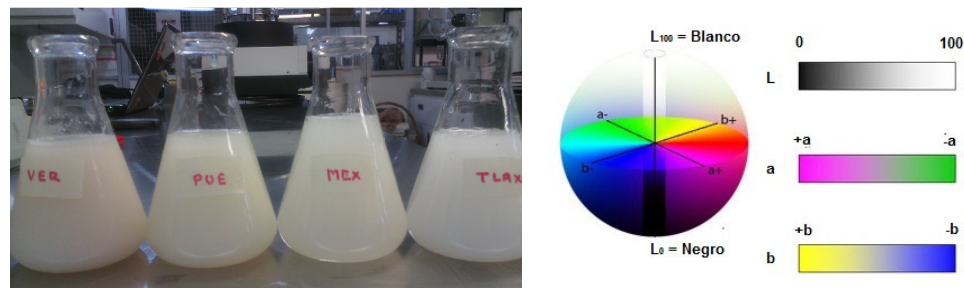
	Pulque			
	Veracruz	Puebla	México	Tlaxcala
pH	4.40±0.02	4.23±0.03	3.91±0.06	4.16±0.01
X (%)	92.27±0.43	93.64±0.42	98.23±0.69	98.87±0.26
ST (%)	7.73±0.43	6.36±0.42	1.77±0.69	1.13±0.26
$a_w$	0.995±0.003	0.989±0.003	0.996±0.001	0.999±0.001
Parámetro de color <i>L</i>	63.61±0.21	67.28±0.78	62.63±0.29	59.09±1.29
Parámetro de color <i>a</i>	2.82±0.01	1.48±0.13	1.57±0.01	1.02±0.10
Parámetro de color <i>b</i>	14.58±0.05	6.48±0.18	7.24±0.03	3.72±0.17
Densidad a 20 °C (g/mL)	1.0219±0.0011	0.9603±0.0150	0.9980±0.0017	0.9954±0.0018
<sup>a</sup> Proteínas (%)	0.1984	0.3980	0.1492	0.2560
Cenizas (%)	0.8533±0.0219	0.8851±0.0432	0.5526±0.0136	0.3424±0.0131

<sup>a</sup>Una sola medición.

De acuerdo a los resultados obtenidos se observó que el contenido de sólidos totales del pulque proveniente de los estados de Veracruz y Puebla es adecuado, para llevar a cabo un proceso de secado por aspersion propio para alimentos líquidos, sin embargo, para el Estado de México y Tlaxcala se requeriría emplear un material de pared. Aplicar el proceso de secado por aspersion al pulque resulta necesario debido a que al tener valores de  $a_w$  y X mayores a 0.9 y 90 % respectivamente, convierten al pulque en un producto propenso a reacciones deteriorativas. El valor de actividad de agua varía entre 0 y 1, por lo que los productos frescos perecederos tienen  $a_w$  altas,

normalmente superiores a 0.9, mientras que los alimentos secos tienen  $a_w$  por debajo de 0.6 y por consiguiente son estables microbiológicamente (Welty-Chanes y Vergara-Balderas, 1997; Tapia *et al.*, 2007). Aunado a esto, un alimento con pH de 4.6 o menos se considera que tiene una alta acidez y no permite el crecimiento de esporas bacterianas, por lo tanto, estos alimentos son resistentes a la descomposición bacteriana, mientras que las levaduras pueden crecer en un rango de pH de 4 a 4.5 y los mohos a partir de 2 hasta 8.5, es por esta razón que es importante conocer el pH del pulque, tomando en cuenta esto, ubicamos al pulque como una bebida que tiene una alta acidez.

Por otra parte analizando los parámetros de color se observó que la luminosidad  $L$ , y la cromaticidad  $a$  y  $b$  ubican al pulque como un líquido de color amarillo rojizo con mediana luminosidad (Figura 3.1).



**Figura 3.1** Pulque y diagrama Hunter  $L$ ,  $a$ ,  $b$ .

El contenido de proteínas del pulque proveniente del Estado de Puebla se encuentran por arriba de lo reportado por Cravioto *et al.* (1951) quienes obtuvieron un valor de 0.37 %; con respecto al contenido de cenizas estos mismos autores y la norma NMX-V-037 (Banco de Normas Mexicanas, 1972b) reportan un valor de 0.2 y 0.24 %, respectivamente, por lo que se puede observar que el contenido de cenizas en las muestras de pulque se encuentran por encima de estos valores, esto resultó de gran interés ya que indica que también hay una diferencia en el contenido de sus nutrientes principales (vitaminas y minerales) y que el proceso de secado por

aspersión permitirá obtener un producto deshidratado de calidad y que conserve estos atributos.

### **3.2 Secado por aspersión del pulque**

Las variables de respuesta durante el proceso de secado por aspersión del pulque fueron: contenido de humedad, actividad de agua, diferencia de color y rendimiento. Se buscaron los puntos óptimos del proceso de secado por aspersión del pulque y se evaluó el contenido de cenizas, calcio y ácido ascórbico.

#### **3.2.1 Humedad y actividad de agua del pulque**

En la Tabla 3.2 se observa que todos los valores de humedad (X) y actividad de agua ( $a_w$ ) se encuentran por debajo de 10 % y 0.6, respectivamente, por lo que el producto deshidratado es considerado microbiológicamente estable dado que los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de agua es menor al 10 % en peso (Tapia *et al.*, 2007). Sin embargo, generalmente es necesario reducir el contenido de humedad por debajo del 5 % en peso en los alimentos para preservar su sabor y valor nutritivo (Geankoplis, 1998).

El alto contenido de humedad en la mayoría de los alimentos frescos es en gran parte la razón por la que son perecederos, y es la causa por la cual se deterioran rápidamente como resultado de diversas reacciones microbianas, químicas y bioquímicas. Para que estas reacciones pueden proceder requieren de la abundancia del agua libre y su disponibilidad dentro del alimento para actuar como disolvente y para el transporte de moléculas a través de membranas semipermeables, esenciales para el metabolismo microbiano. Por esta razón, uno de los métodos más eficaces en conservación de alimentos es reducir el contenido de humedad hasta que la actividad de agua sea lo suficientemente baja, de tal manera que la cantidad de agua libre necesaria para llevar a cabo cualquiera de las reacciones de degradación que

podrían tener lugar no esté disponible (Figura y Teixeira, 2007). Es importante mencionar que la  $a_w$  y la humedad del pulque antes de ser sometido al proceso de secado por aspersión fue superior a 0.980 y 92 %, respectivamente, indicando el alto potencial de deterioro que tiene este alimento.

**Tabla 3.2** Valores experimentales para la variable de respuesta X y  $a_w$ .

Exp	PP	$T_{y0}$ °C	$T_{ys}$ °C	MD %	X %	$a_w$
1	1	1	1	1	2.14 $\pm$ 0.43	0.296 $\pm$ 0.055
2	1	2	2	2	1.32 $\pm$ 0.32	0.212 $\pm$ 0.029
3	1	3	3	3	1.16 $\pm$ 0.20	0.163 $\pm$ 0.012
4	1	4	4	4	1.17 $\pm$ 0.42	0.199 $\pm$ 0.075
5	2	1	2	3	1.46 $\pm$ 0.57	0.197 $\pm$ 0.015
6	2	2	1	4	1.44 $\pm$ 0.28	0.221 $\pm$ 0.024
7	2	3	4	1	1.26 $\pm$ 0.59	0.209 $\pm$ 0.039
8	2	4	3	2	2.28 $\pm$ 1.05	0.246 $\pm$ 0.074
9	3	1	3	4	0.95 $\pm$ 0.25	0.137 $\pm$ 0.004
10	3	2	4	3	1.63 $\pm$ 0.31	0.232 $\pm$ 0.007
11	3	3	1	2	1.71 $\pm$ 0.73	0.228 $\pm$ 0.051
12	3	4	2	1	2.23 $\pm$ 0.35	0.239 $\pm$ 0.016
13	4	1	4	2	2.05 $\pm$ 0.47	0.202 $\pm$ 0.057
14	4	2	3	1	1.12 $\pm$ 0.23	0.145 $\pm$ 0.022
15	4	3	2	4	1.07 $\pm$ 0.29	0.106 $\pm$ 0.029
16	4	4	1	3	1.94 $\pm$ 0.43	0.136 $\pm$ 0.018

De la Tabla 3.2 se puede observar que la mayor actividad de agua se presenta en el experimento 1, el cual presentó una  $a_w$  de 0.296 este resultado se debe a la utilización del pulque proveniente del Estado de Veracruz con temperatura de aire de entrada de 160 °C, temperatura de aire de salida de 80°C y un contenido de maltodextrina del 5 %; mientras que el experimento 8 presento la mayor humedad, la cual fue de 2.28 % este resultado se obtuvo con pulque proveniente del Estado de Puebla, temperatura de aire de entrada de 220 °C, temperatura de aire de salida de 100 °C y un contenido de maltodextrina del 10 %. Como se puede apreciar tanto la



$a_w$  como la humedad, están por debajo de los límites que podrían afectar la estabilidad del pulque deshidratado, además este producto puede preservar aun su sabor y valor nutrimental

### 3.2.1.1 Análisis estadístico del contenido de humedad

En la Tabla 3.3 se muestra el análisis de varianza de los resultados de humedad final que se obtuvieron en el proceso de secado, realizado para las variables independientes. Se observa que las cuatro variables involucradas en el proceso, no son estadísticamente significativas a un nivel del 90 % de confianza.

**Tabla 3.3** Análisis de varianza de la variable de respuesta contenido de humedad.

Factor	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de prob	Term R <sup>2</sup>
x <sub>1</sub>	3	0.081068	0.027022	0.11	0.952079	0.0270
x <sub>2</sub>	3	0.912068	0.304023	1.74	0.211475	0.3035
x <sub>3</sub>	3	0.388818	0.129606	0.59	0.630584	0.1294
x <sub>4</sub>	3	1.027219	0.342406	2.08	0.1568	0.3418
Total ajustado	15	3.005444				

\*Significativo a un nivel de confianza de 90%

### 3.2.1.2 Superficies de respuesta del contenido de humedad final

En la Tabla 3.4 se muestra el análisis de varianza para el modelo de segundo orden (ecuación 3.1), en la cual se observa que la regresión y la curvatura del modelo no son estadísticamente significativas.

Este análisis se realizó con un intervalo de confianza del 90 %, y se muestra que la R<sup>2</sup> de este modelo es alta (0.9935), es decir que los datos obtenidos en la parte experimental son representados satisfactoriamente mediante el modelo de segundo orden.

**Tabla 3.4** Análisis de varianza para el modelo de segundo orden de la variable de respuesta contenido de humedad.

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de prob	Term R <sup>2</sup>
Regresión	14	2.985997	0.2132855	10.97	0.232873	0.993530
Lineal	4	1.015885	0.2539712	13.06	0.204289	0.338015
Cuadrático	4	1.316975	0.329243	16.93	0.180065	0.438197
Interacción	6	0.653137	0.1088562	5.60	0.312730	0.217318
Error Total	1	0.019446	0.0194464			0.006470

\*Significativo a un nivel de confianza de 90%

En la ecuación 3.1 se presenta el modelo de segundo orden con los valores de los coeficientes sustituidos al realizar el análisis de regresión de los resultados experimentales para la variable de respuesta contenido de humedad en el pulque mediante el software NCSS 2007. El modelo de regresión representa la relación entre la variable de respuesta contenido de humedad (X) y las variables independientes ( $x_1$ = procedencia del pulque;  $x_2$ = temperatura de aire de entrada;  $x_3$ = temperatura de aire de salida;  $x_4$ = contenido de maltodextrina), las cuales fueron codificadas utilizando los valores 1, 2, 3 y 4 para cada uno de los niveles empleados.

$$\begin{aligned}
 X = & 3.9122 - 0.5647X_1 - 0.9217X_2 - 1.4394X_3 + 0.6044X_4 - 0.0819X_1^2 + 0.2194X_2^2 \\
 & + 0.0994X_3^2 - 0.14 * X_4^2 + 0.0546X_1X_2 + 0.3491X_1X_3 + 0.0032X_1X_4 + 0.0088X_2X_3 \\
 & + 0.02X_2X_4
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

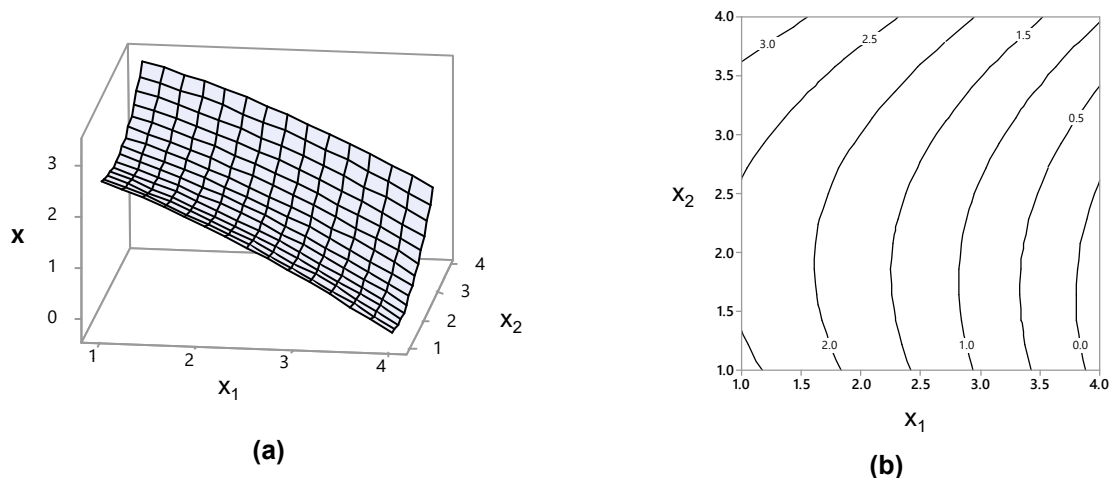
A partir de este modelo se obtuvieron las superficies de respuesta y las respectivas gráficas de contorno para la variable contenido de humedad con el software Minitab 17 (ver Figuras 3.2 a la 3.5).

De este mismo modelo se puede observar que la variable que representa un mayor efecto sobre la humedad del pulque deshidratado es la temperatura de aire de salida, puesto que el coeficiente  $\beta_3$  del modelo (ecuación 3.1) es mayor (-1.4394). El valor

negativo nos indica que la humedad del pulque disminuye conforme incrementa la temperatura de aire de salida durante el proceso de secado. Esto se ve reflejado en las gráficas de superficie de respuesta (Figuras 3.4 y 3.5), en donde se observa que existe una disminución de la humedad del pulque en polvo conforme aumenta la temperatura de aire de salida.

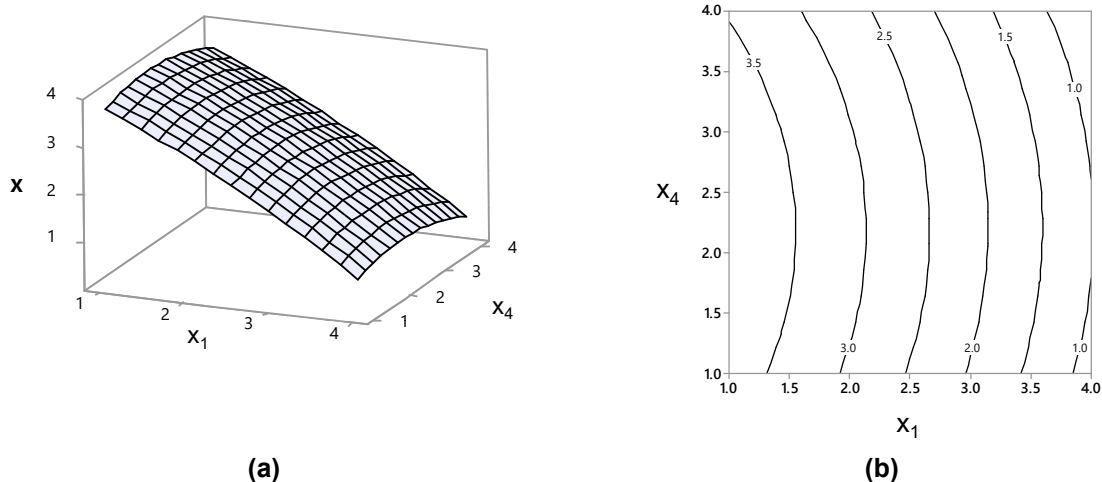
Por otro lado estas mismas gráficas permitieron realizar un análisis de regiones óptimas para cada factor, con la finalidad de obtener el mínimo contenido de humedad final (menor al 10 %), necesario para que el pulque sea un producto estable durante su almacenamiento.

En la Figura 3.2 se observa que la región donde se tiene el mínimo contenido de humedad final (menor al 1.5 %) se encuentra entre el pulque proveniente del Estado de México y Tlaxcala (valores codificados en 3 y 4, respectivamente) con temperatura de entrada de aire en el intervalo de 160 a 218 °C (valores codificados en 1 y 3.9, respectivamente).

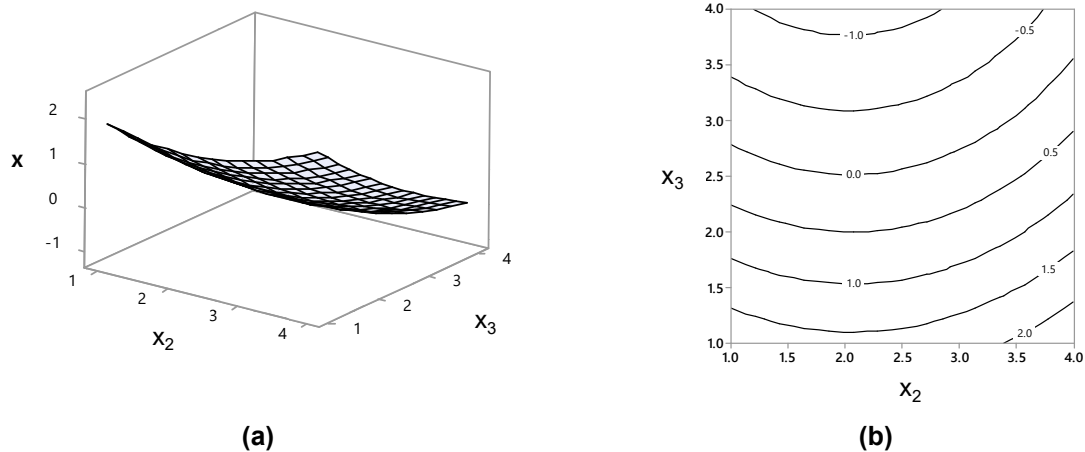


**Figura 3.2** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del contenido de humedad como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de entrada.

En la Figura 3.3 se muestra la superficie de respuesta y el gráfico de contorno obtenido para el contenido de humedad durante el proceso de secado por aspersión de pulque, en función de la procedencia del pulque y del contenido de maltodextrina. También se puede apreciar que la región e mínimo contenido de humedad se obtuvo con pulque proveniente del Estado de México y Tlaxcala (valores codificados de 3 y 4, respectivamente) y con un contenido de maltodextrina del 5 al 20 % (valores codificados de 1 a 4, respectivamente). Así mismo en la Figura 3.4 la región con el mínimo contenido de humedad se obtiene con valores de temperatura de aire de entrada de 160 a 220 °C (valor codificado de 1 y 4, respectivamente) y de temperatura de aire de salida de 83 a 95 °C (valores codificados en 1.3 y 2.5, respectivamente).

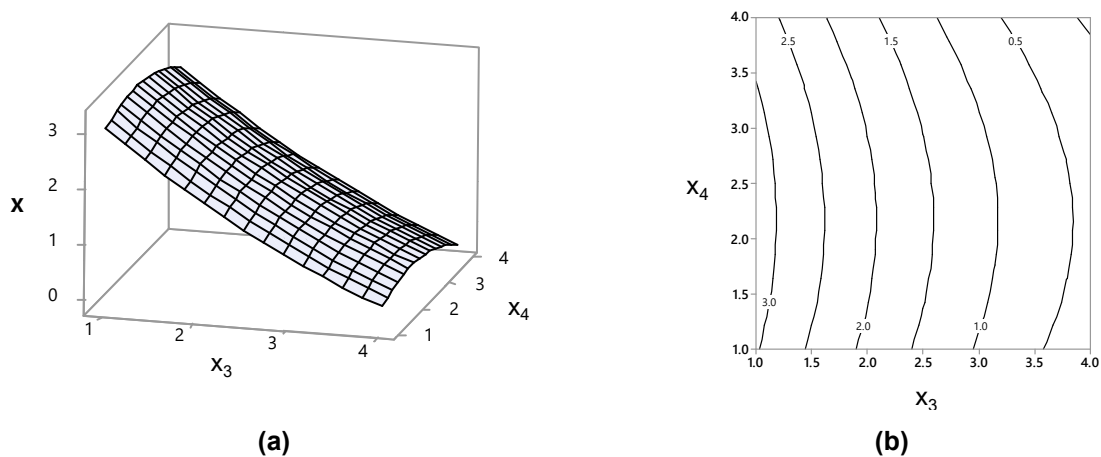


**Figura 3.3** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del contenido de humedad como una función de la procedencia del pulque y el contenido de maltodextrina.



**Figura 3.4** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del contenido de humedad como una función de la temperatura de aire de entrada y la temperatura de aire de salida.

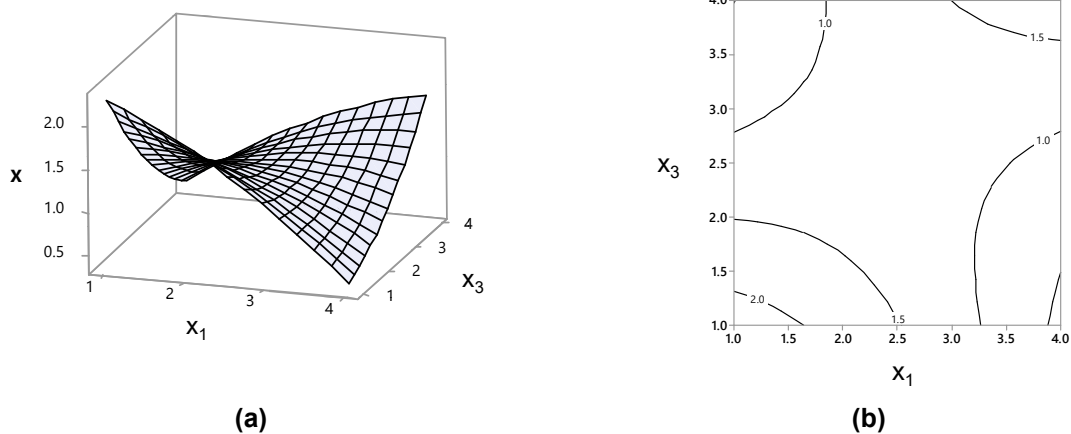
En la Figura 3.5 se puede observar que el mínimo contenido de humedad obtenido con valores de temperatura de aire de salida de 94 y 108 °C (valores codificados con 2.4 y 3.8, respectivamente) y con un contenido de maltodextrina del 5 a 20 % (valores correspondientes del 1 al 4, respectivamente).



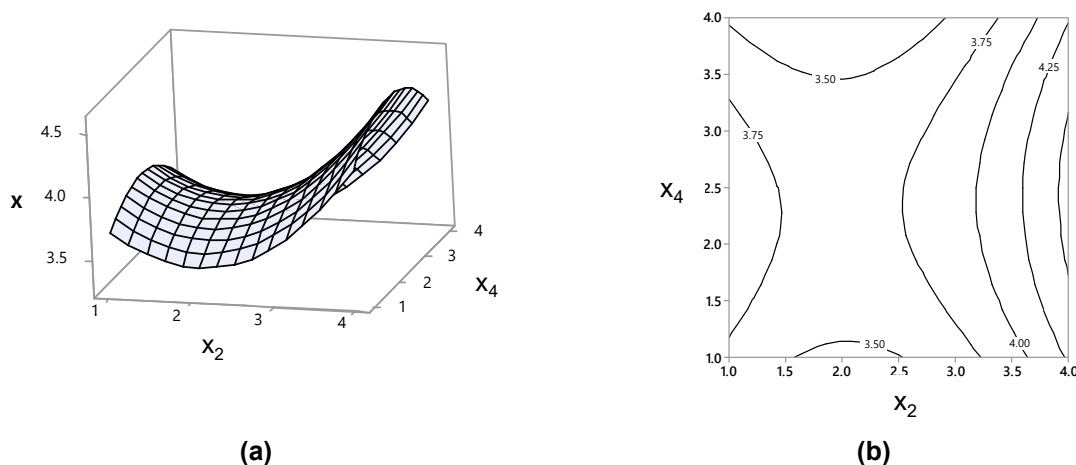
**Figura 3.5** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del contenido de humedad como una función de la temperatura de aire de salida y el contenido de maltodextrina.

En las superficies de respuesta para la variable de respuesta contenido de humedad, se pueden observar dos puntos de silla (Figura 3.6 y 3.7). Esto se debe a que la

humedad no solo está en función de la procedencia del pulque, la temperatura de aire de entrada, la temperatura de aire de salida y de la adición de maltodextrina, sino también del tiempo de secado y de las condiciones ambientales externas. Estas últimas variables son variables que no se pueden fijar en diferentes niveles, debido a que son no controlables. Debido a estos puntos de silla es muy difícil dar una interpretación, ya que no se tiene una región en donde se presente un mínimo o un máximo.



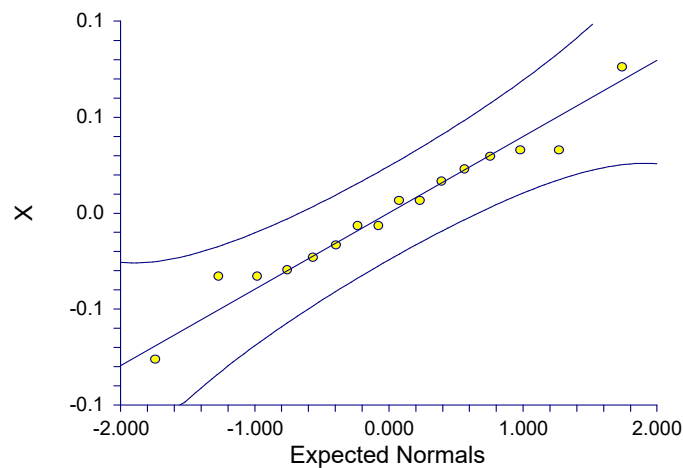
**Figura 3.6** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del contenido de humedad como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida



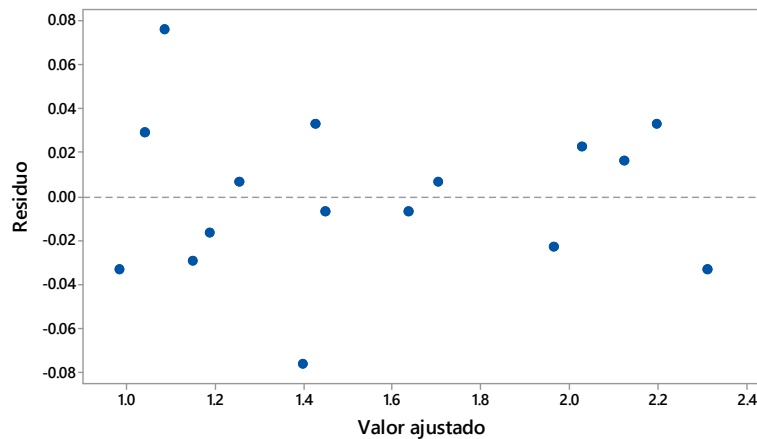
**Figura 3.7** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del contenido de humedad como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida

Por lo tanto, el menor contenido de humedad está presente en las muestras de pulque en polvo secadas a temperaturas de aire de salida más altas, este mismo resultado fue observado durante el secado por aspersión de semillas de *Ginkgo biloba* (Zhang *et al.*, 2010).

En la Figura 3.8 y 3.9 se muestran la gráfica de probabilidad normal de residuos y la gráfica de residuos contra valores ajustados. En estas figuras se observa que no existe algo anormal en los datos experimentales, ya que en la Figura 3.8 no se observa ningún patrón inusitado, debido a que la varianza es homogénea; además los residuos en la Figura 3.9 están distribuidos normalmente con media cero y varianza ( $\sigma^2$ ). Ambos gráficos nos demuestran que el modelo empleado cumple con los supuestos de idealidad y corroboran que la falta de ajuste obtenida en el análisis de varianza es no significativa.



**Figura 3.8** Gráfica de distribución normal de residuos de la variable de respuesta contenido de humedad.



**Figura 3.9** Gráfica de residuos vs valores ajustados de la variable de respuesta contenido de humedad.

### 3.2.1.3 Análisis estadístico de la actividad de agua

En la Tabla 3.5 se muestra el análisis de varianza de los resultados de la actividad de agua final que se obtuvieron en el proceso de secado, realizado para las variables independientes. Las cuatro variables involucradas en el proceso no son estadísticamente significativas a un nivel del 90 % de confianza.

**Tabla 3.5** Análisis de varianza de la variable de respuesta actividad de agua.

Factor	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de prob	Term R <sup>2</sup>
x <sub>1</sub>	3	0.0139575	0.0046491	2.47	0.112314	0.3814
x <sub>2</sub>	3	0.002526	0.000842	0.30	0.827062	0.0691
x <sub>3</sub>	3	0.0055165	0.001838	0.71	0.564145	0.1508
x <sub>4</sub>	3	0.0098405	0.003280	1.47	0.271492	0.2691
Total ajustado	15	0.036572				

\*Significativo a un nivel de confianza de 90%



### 3.2.1.4 Superficies de respuesta de la actividad de agua final

En la Tabla 3.6 se muestra el análisis de varianza para el modelo de segundo orden (ecuación 3.2) para la variable de respuesta  $a_w$ , en la cual se observa que la regresión y la curvatura del modelo no son estadísticamente significativas.

**Tabla 3.6** Análisis de varianza para el modelo de segundo orden de la variable de respuesta actividad de agua.

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de prob	Term R <sup>2</sup>
Regresión	14	0.036282	0.002591	8.94	0.257000	0.992074
Lineal	4	0.019108	0.004777	16.48	0.182454	0.522478
Cuadrático	4	0.010149	0.002537	8.75	0.247654	0.277494
Interacción	6	0.007025	0.001170	4.04	0.363498	0.192102
Error Total	1	0.000289	0.000289			0.007926

\*Significativo a un nivel de confianza de 90%

Este análisis se realizó con un intervalo de confianza del 90 %, y se muestra que la R<sup>2</sup> de este modelo es alta (0.9920), es decir que los datos obtenidos en la parte experimental son representados satisfactoriamente mediante este modelo.

En la ecuación 3.2 se presenta el modelo de segundo orden con los valores de los coeficientes sustituidos para la actividad de agua en el pulque en polvo, los cuales fueron obtenidos mediante el software NCSS 2007.

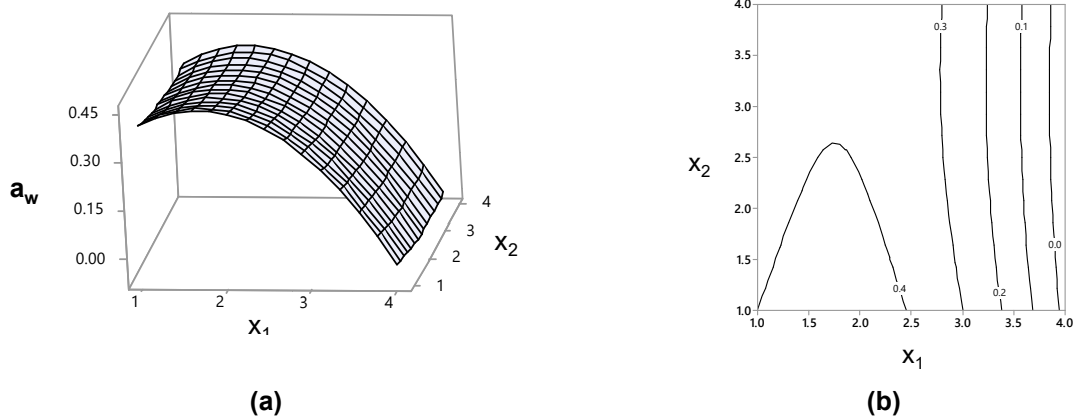
$$\begin{aligned}
 a_w = & 0.2357 + .3093X_1 - 6.5659E - 02X_2 + 0.1636X_3 - 0.3162X_4 - 0.0906X_1^2 \\
 & + 0.0085X_2^2 - 0.0201X_3^2 + 0.0254X_4^2 + 3.1618E - 03X_1X_2 + 3.2557E - 02X_1X_3 \\
 & - 2.1594E - 03X_1X_4 - 0.0588X_2X_3 + 0.0750X_2X_4 - 1.9939E - 13X_3X_4
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Las variables independientes que presentan un mayor efecto sobre la  $a_w$  del pulque deshidratado es la procedencia del pulque y el contenido de maltodextrina, puesto

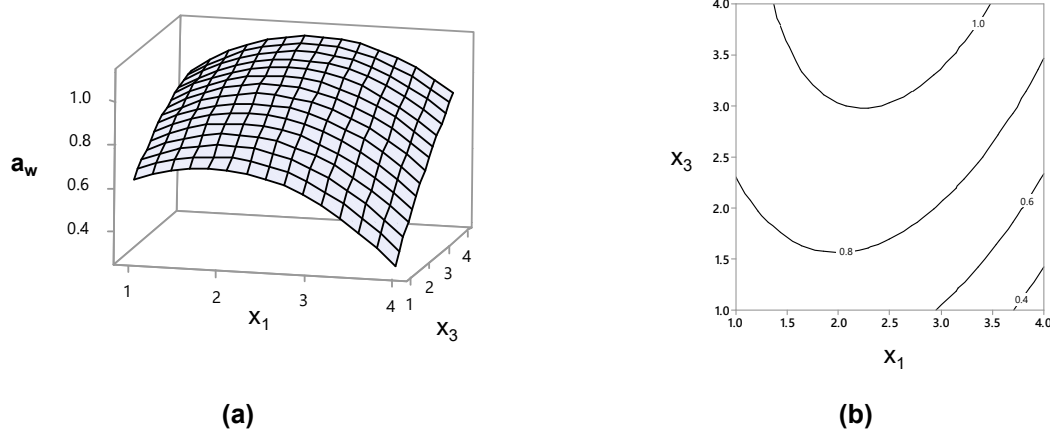
que los coeficientes  $\beta_1$  y  $\beta_4$  del modelo presentado (ecuación 3.2) son mayores (0.3093 y -0.3162).

En las Figuras 3.10 a 3.15 se presentan las gráficas de superficie de respuesta y contornos para la variable de respuesta  $a_w$  como función de la procedencia del pulque ( $x_1$ ), temperatura de aire de entrada ( $x_2$ ), temperatura de aire de salida ( $x_3$ ) y contenido de maltodextrina ( $x_4$ ). Se observa que para el pulque procedente de los estados de México y Tlaxcala con contenido de maltodextrina alto se obtiene un menor contenido de  $a_w$ , no mostrándose el mismo efecto para los mismos estados con contenidos de maltodextrina bajos. Esto se debe a que la  $a_w$  está directamente relacionada con el contenido de humedad de las muestras y a menor contenido de maltodextrina, baja el contenido de sólidos totales y por tanto existe una mayor evaporación de agua.

Por otro lado, tenemos que en la Figura 3.10 se muestra que para la  $a_w$ , se obtuvieron regiones de valores mínimos (menor a 0.6) con pulque procedente del Estado de Veracruz a Tlaxcala (valores codificados del 1 al 4) y una temperatura de aire de entrada en el intervalo de 160 a 220 °C (valores codificados del 1 al 4). En la Figura 3.11 se muestra la superficie de respuesta y la gráfica de contornos de la  $a_w$  en función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida. En esta figura se puede observar que la menor  $a_w$  (por debajo de 0.6) se obtuvo para el pulque proveniente del Estado de México y Tlaxcala (valores codificados en 3 y 4) y con temperatura de aire de salida de 80 a 84 °C (valores codificados de 1 a 1.4)

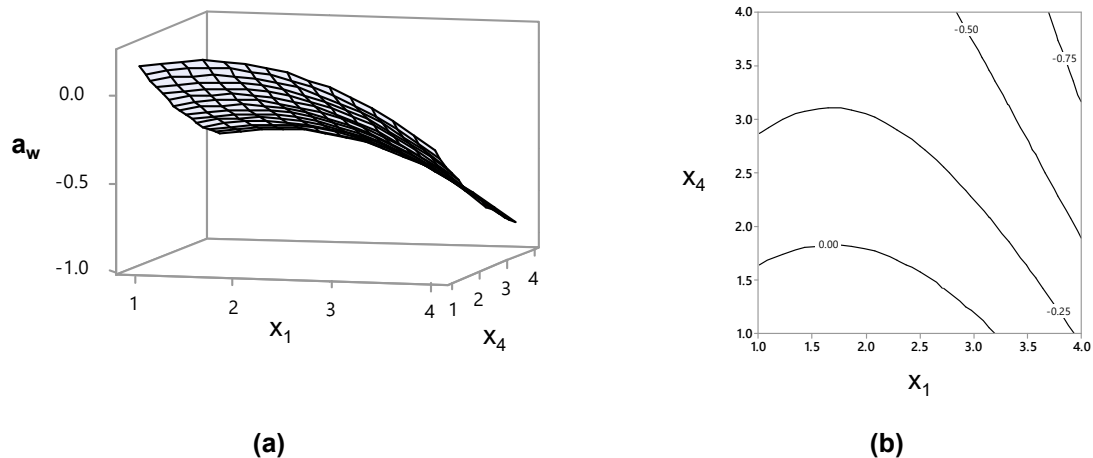


**Figura 3.10** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la actividad de agua como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida.

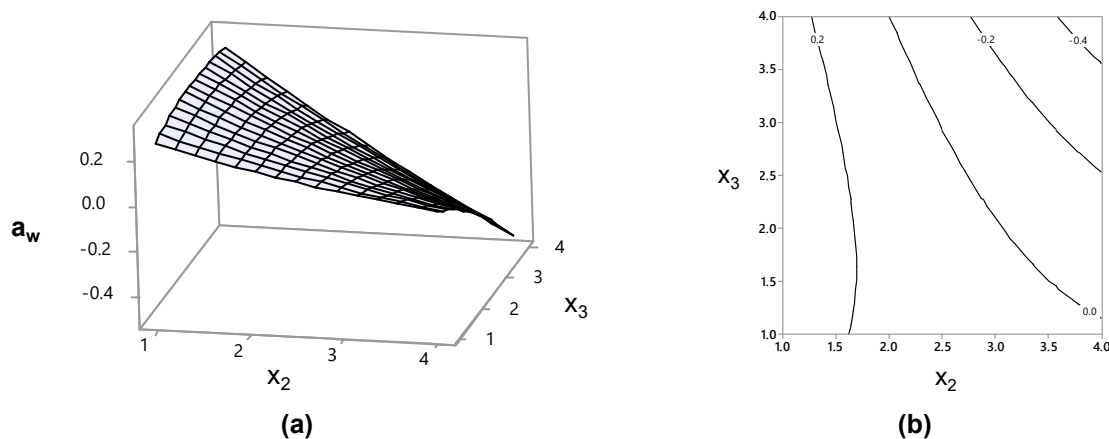


**Figura 3.11** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la actividad de agua como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida.

En la Figura 3.12 se puede observar que la mínima  $a_w$  se obtiene con pulque procedente del Estado de Veracruz a México (valores codificados de 1 a 3) y con un contenido de maltodextrina del 5 al 8 % (valores codificados de 1 a 1.6). Los gráficos de la  $a_w$  en función de la temperatura de aire de entrada y de la temperatura de aire de salida se presentan en la Figura 3.13 y se puede apreciar que la región donde se presenta la mínima  $a_w$  es obtenida con una temperatura de aire de entrada de secado de 160 a 184 °C (valores codificados de 1 a 2.2) y con una temperatura de aire de salida de 80 a 110 °C (valores codificados de 1 a 4).

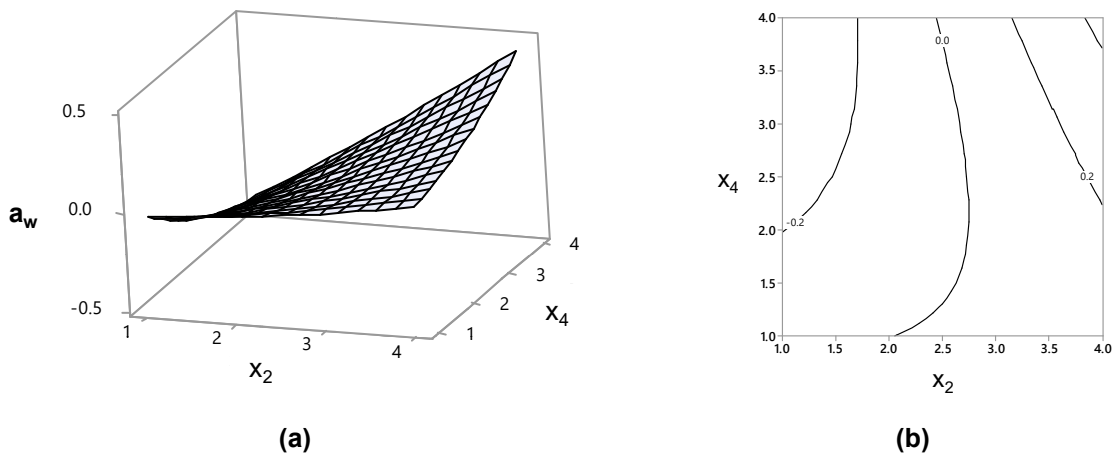


**Figura 3.12** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la actividad de agua como una función de la procedencia del pulque y el contenido de maltodextrina.

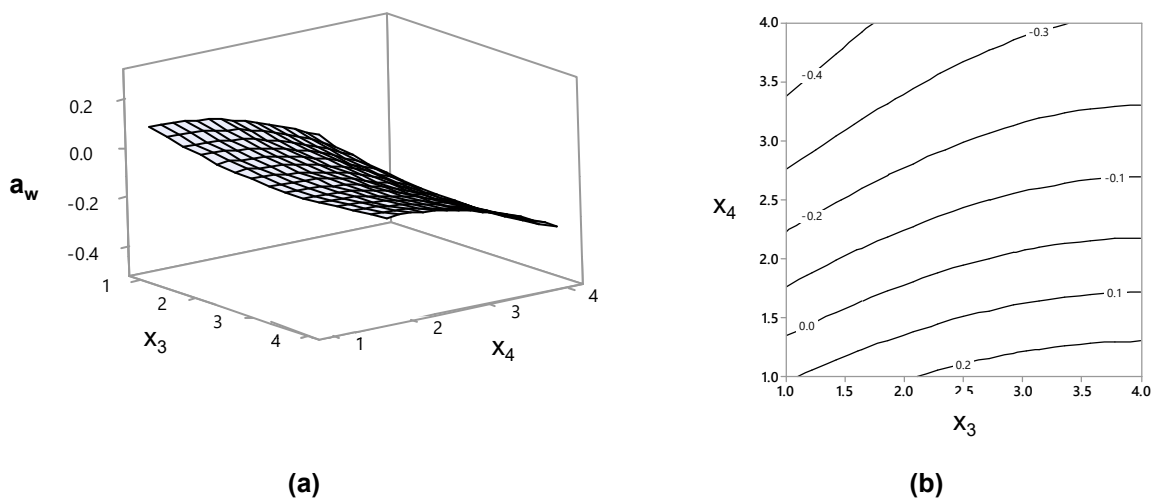


**Figura 3.13** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la actividad de agua como una función de la temperatura de aire de entrada y la temperatura de aire de salida.

Así mismo, en la Figura 3.14 se puede observar que la actividad de agua es mínima para una temperatura de aire de entrada de secado en el intervalo de 160 a 190 °C (valores codificados en 1 y 2.5) con un contenido de maltodextrina del 5 al 20 % (valores codificados del 1 a 4). En la Figura 3.15 se observa que la región donde se obtiene la mínima actividad de agua (por debajo de 0.6) es para el intervalo de 80 a 110 °C para la temperatura de aire de salida (valores codificados del 1 al 4) con un contenido de maltodextrina del 5 al 7 % (valores codificados en 1 y 1.4).



**Figura 3.14** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la actividad de agua como una función de la temperatura de aire de entrada y el contenido de maltodextrina.



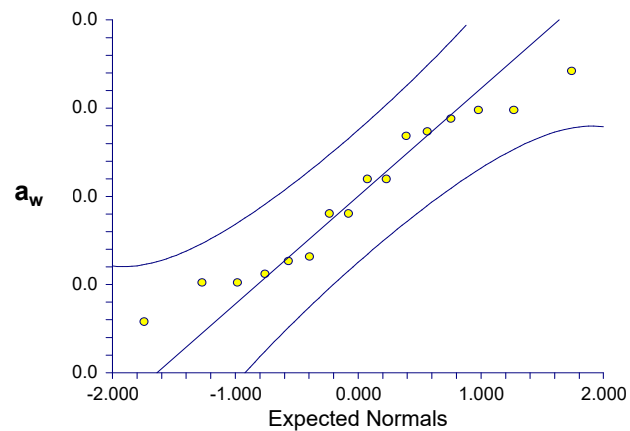
**Figura 3.15** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la actividad de agua como una función de la temperatura de aire de salida y el contenido de maltodextrina.

Por lo tanto, se encontró que la actividad de agua del pulque en polvo disminuyó conforme aumenta la concentración de maltodextrina. Estos resultados fueron consistentes con los encontrados en secado por aspersión de la pulpa de tomate y de sandía (Goula *et al.*, 2004; Quek *et al.*, 2007).

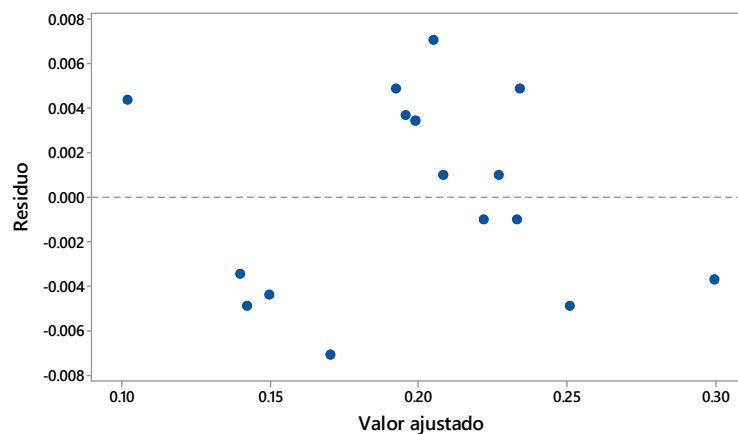
Adicionalmente, se presenta la gráfica de probabilidad normal de los residuos (Figura 3.16) en la cual se observa que los residuos se distribuyen en forma normal NID (0,

$\sigma^2$ ), lo que corrobora que la falta de ajuste del modelo no es significativa. Se presenta también, la gráfica de residuos contra valores ajustados (Figura 3.17), en donde se muestra que los residuos se distribuyen normalmente, lo que significa que los datos experimentales no presentan falta de ajuste.

Con estas dos gráficas, se demuestra que la obtención de los datos experimentales fue de manera adecuada y no existen datos inusitados; por tanto, el modelo de segundo orden empleado para optimizar la actividad de agua fue el modelo correcto.



**Figura 3.16** Gráfica de distribución normal de residuos de la variable de respuesta actividad de agua.



**Figura 3.17** Gráfica de residuos vs valores ajustados de la variable de respuesta actividad de agua.

### 3.2.3 Parámetros de color del pulque

El color es uno de los atributos importantes en la calidad de los alimentos. Aunque no refleja necesariamente un valor nutricional o funcional, determina la aceptabilidad del producto por los consumidores. En la Tabla 3.7 se muestran los valores de  $L$ ,  $a$  y  $b$  para cada uno de los tratamientos con sus correspondientes condiciones de secado.

**Tabla 3.7** Valores experimentales para la variable de respuesta  $L$ ,  $a$ ,  $b$ .

Exp	PP	T <sub>γ0</sub> °C	T <sub>γs</sub> °C	MD %	$L$	$a$	$b$
1	1	1	1	1	64.28±0.22	1.29±0.08	7.25±0.26
2	1	2	2	2	67.88±0.69	-0.20±0.05	6.36±0.47
3	1	3	3	3	68.16±0.41	-0.36±0.07	4.09±0.52
4	1	4	4	4	68.89±0.74	-0.42±0.15	3.62±0.38
5	2	1	2	3	69.73±0.56	-0.44±0.18	5.21±0.80
6	2	2	1	4	70.82±0.49	-0.54±0.11	6.03±0.57
7	2	3	4	1	66.05±0.82	1.51±0.21	6.06±0.96
8	2	4	3	2	68.44±0.44	0.38±0.10	6.04±0.54
9	3	1	3	4	73.63±1.76	-1.10±0.63	8.31±1.80
10	3	2	4	3	72.04±2.68	-0.89±0.47	8.06±1.34
11	3	3	1	2	70.37±0.88	-0.46±0.12	5.28±0.44
12	3	4	2	1	67.45±0.73	-0.62±0.10	5.66±0.64
13	4	1	4	2	66.63±2.47	0.45±0.70	3.27±0.76
14	4	2	3	1	65.53±1.27	0.07±0.14	2.25±0.88
15	4	3	2	4	61.93±1.19	0.13±0.05	1.32±0.51
16	4	4	1	3	69.03±1.93	-0.27±0.17	2.48±1.23

Con estos resultados se define un espacio cartesiano en el que  $L$  corresponde a la luminosidad, estableciéndose una máxima luminosidad (100) hasta el negro, mínima luminosidad (0), y  $a$ ,  $b$  a la cromaticidad. Específicamente  $a$  define el componente 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. Tomando en cuenta esto, la mayoría de las muestras de pulque deshidratado presentaron un color que está definido por el verde y el amarillo.

Los valores de los parámetros de color para las muestras de pulque fresco, antes de iniciar el proceso de secado fueron:  $L = 59.09$  a  $67.28$ ,  $a = 1.02$  a  $2.82$  y  $b = 3.72$  a  $14.58$ . Comparando estos valores con los mostrados en la Tabla 3.7 se observa que el valor  $L$  aumento ligeramente en valores de  $61.93$  a  $73.63$ , aumentando con ello la luminosidad del pulque deshidratado. El parámetro  $a$  disminuyó en valores de  $-1.10$  a  $1.29$ , lo que significa que existe un cambio de color entre el pulque fresco y el pulque deshidratado, pasando de tonalidades rojizas a verdosas, sin embargo, este cambio no puede ser observado fácilmente por el ojo humano. Así mismo, el parámetro  $b$  presentó una disminución mostrando valores de  $1.32$  a  $8.31$ , por lo que hubo una disminución en la tonalidad amarilla.

### 3.2.3.1 Análisis estadístico para los parámetros de color

En la Tabla 3.8 se muestra el análisis de varianza para los parámetros de color  $L$ ,  $a$  y  $b$ , el cual fue realizado con un nivel de confianza del 90 %.

En esta tabla se puede observar que la procedencia del pulque fue estadísticamente significativa para el parámetro  $L$ , por lo que la temperatura de aire de entrada y salida, así como el contenido de maltodextrina no afectan la luminosidad del pulque deshidratado. En el caso del parámetro  $a$ , el contenido de maltodextrina fue estadísticamente significativa, esta es la razón por la cual las muestras de pulque deshidratado presentaron tonalidades rojizas y verdosas. Con lo que respecta al parámetro  $b$  la procedencia del pulque fue estadísticamente significativa, lo que explica la disminución en la tonalidad amarilla.



**Tabla 3.8** Análisis de varianza de la variable de respuesta parámetro de color (*L*, *a* y *b*).

Factor	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de prob	Term R <sup>2</sup>
<b>Parámetro L</b>						
X <sub>1</sub>	3	56.46383	18.82128	3.12	0.066402*	0.4380
X <sub>2</sub>	3	13.68927	4.563091	0.48	0.705352	0.1062
X <sub>3</sub>	3	11.50873	3.836242	0.39	0.760948	0.0893
X <sub>4</sub>	3	33.58702	11.19567	1.41	0.288122	0.2605
Total ajustado	15	128.92222				
<b>Parámetro a</b>						
X <sub>1</sub>	3	2.488319	0.8294396	1.92	0.180674	0.3240
X <sub>2</sub>	3	0.867668	0.289222	0.51	0.683203	0.1130
X <sub>3</sub>	3	0.544918	0.181639	0.31	0.820963	0.0710
X <sub>4</sub>	3	3.029419	1.009806	2.61	0.99994*	0.3945
Total ajustado	15	7.680044				
<b>Parámetro b</b>						
X <sub>1</sub>	3	44.99512	14.99837	9.40	0.001786*	0.7016
X <sub>2</sub>	3	9.649519	3.216506	0.71	0.565285	0.1505
X <sub>3</sub>	3	1.066069	0.3553562	0.07	0.976084	0.0166
X <sub>4</sub>	3	0.6297187	0.2099063	0.04	0.988918	0.0098
Total ajustado	15	64.13269				

\*Significativo a un nivel de confianza de 90%

### 3.2.3 Diferencia de color del pulque

Cuando se usan técnicas de medición de color visuales, los objetos pueden ser descritos como que tienen el mismo color cuando no muestran ninguna diferencia observable en el color bajo idénticas condiciones de iluminación. Por esta razón, las técnicas visuales implican observar el color de una muestra comparándola con estándares de color definidos en idénticas condiciones de iluminación (Sahin y Gülüm, 2006; Figura y Teixeira, 2007). Por tal motivo, es importante mencionar que las muestras de pulque deshidratado fueron comparadas con un estándar de placa blanca ( $L = 93.21$ ,  $a = -1.11$  y  $b = 2.04$ ) para evaluar la diferencia de color con

respecto a un blanco puro, por lo que los valores de  $\Delta E$  denotan un cambio significativo. En la Tabla 3.9 se muestran los resultados de la diferencia de color para el pulque deshidratado.

**Tabla 3.9** Valores experimentales para la variable de respuesta  $\Delta E$ .

Exp	PP	$T_{Y0}$ °C	$T_{Ys}$ °C	MD %	$\Delta E$
1	1	1	1	1	25.43 $\pm$ 0.10
2	1	2	2	2	22.06 $\pm$ 0.21
3	1	3	3	3	21.05 $\pm$ 0.29
4	1	4	4	4	20.36 $\pm$ 0.56
5	2	1	2	3	20.11 $\pm$ 0.34
6	2	2	1	4	19.25 $\pm$ 0.24
7	2	3	4	1	23.54 $\pm$ 0.45
8	2	4	3	2	21.33 $\pm$ 0.25
9	3	1	3	4	18.16 $\pm$ 0.34
10	3	2	4	3	19.31 $\pm$ 1.22
11	3	3	1	2	19.40 $\pm$ 0.64
12	3	4	2	1	22.02 $\pm$ 0.46
13	4	1	4	2	22.36 $\pm$ 2.17
14	4	2	3	1	23.19 $\pm$ 1.04
15	4	3	2	4	26.45 $\pm$ 1.07
16	4	4	1	3	20.17 $\pm$ 1.63

Estos resultados muestran que la mayor  $\Delta E$  la presentaron los experimentos 5 y 6 que corresponden al pulque proveniente del Estado de Puebla a una temperatura del aire de entrada de 160 y 180 °C, una temperatura del aire de salida de 80 y 90 °C, con un 15 y 20 % de maltodextrina. Esta diferencia puede deberse principalmente a la adición de maltodextrina al pulque fresco antes de someterlo al proceso de secado por aspersión. La menor diferencia de color con respecto al estándar de placa blanca se presentó en el experimento 9 correspondiente al pulque procedente del Estado de México, con una temperatura de aire de entrada de 160 °C, temperatura de aire de

salida de 100 °C y con un 20 % de maltodextrina, por lo que se obtuvo un producto deshidratado con una blancura aceptable.

### 3.2.3.1 Análisis estadístico de la diferencia de color

A los resultados de  $\Delta E$  del pulque deshidratado obtenidos de los experimentos se les realizó un análisis de varianza (Tabla 3.10) para comprobar si alguna variable independiente afectaba a la variable de respuesta  $\Delta E$ .

**Tabla 3.10** Análisis de varianza de la variable de respuesta diferencia de color.

Factor	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de prob	Term R <sup>2</sup>
x <sub>1</sub>	3	25.03872	8.34624	1.86	0.190513	0.3172
x <sub>2</sub>	3	7.249669	2.416556	0.40	0.752496	0.0918
x <sub>3</sub>	3	7.480219	2.493406	0.42	0.742877	0.0948
x <sub>4</sub>	3	24.88097	8.293656	1.84	0.193469	0.3152
Total ajustado	15	78.94264				

\*Significativo a un nivel de confianza de 90%

En esta tabla se puede observar que la procedencia del pulque, la temperatura de aire de entrada, la temperatura de aire de salida y el contenido de maltodextrina no afectaron significativamente a la  $\Delta E$  del pulque deshidratado a un nivel de confianza del 90 %.

### 3.2.3.2 Superficies de respuesta para la diferencia de color final

En la Tabla 3.11 se presenta el análisis de varianza para el modelo de segundo orden (ecuación 3.3) para la variable de respuesta rendimiento obtenido en el proceso de secado de pulque, donde se pudo observar que la regresión y la curvatura del modelo no son estadísticamente significativas.

**Tabla 3.11** Análisis de varianza para el modelo de segundo orden de la variable de diferencia de color.

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de prob	Term R <sup>2</sup>
Regresión	14	72.2458	5.160415	0.77	0.726255	0.915168
Lineal	4	15.14205	3.785511	0.57	0.745732	0.191811
Cuadrático	4	32.53083	8.132707	1.21	0.584501	0.412082
Interacción	6	24.57294	4.095489	0.61	0.751781	0.311276
Error Total	1	6.696839	6.696839			0.084832

\*Significativo a un nivel de confianza de 90%

Este análisis se realizó con un intervalo de confianza del 90 %, y para este modelo la R<sup>2</sup> tiene un valor de 0.9152, por lo que los datos obtenidos en la parte experimental son representados adecuadamente mediante este modelo.

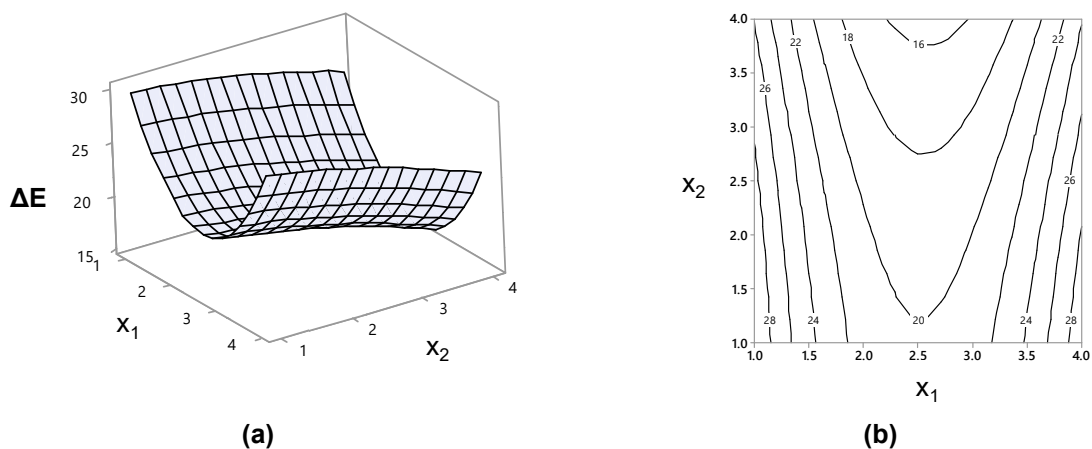
La ecuación 3.3 presenta el modelo de segundo orden con los valores de los coeficientes sustituidos para la diferencia de color ( $\Delta E$ ) del pulque deshidratado obtenido al realizar el análisis de regresión. Con dicho modelo se obtuvieron las gráficas de superficie de respuesta y de contornos para la variable de respuesta diferencia de color, las cuales se presentan en las Figuras 3.18 a la 3.23.

$$\begin{aligned} \Delta E = & 46.7498 - 20.9334X_1 + 0.2533X_2 - 17.1846X_3 + 10.6136X_4 + 4.2019X_1^2 \\ & - 0.2694X_2^2 + 1.2556X_3^2 - 1.1875X_4^3 - 0.1934X_1X_2 + 0.4600X_1X_3 + 0.9238X_1X_4 \\ & + 3.9514X_2X_3 - 3.08X_2X_4 + 9.3417E - 12X_3X_4 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Se puede observar en la ecuación anterior que las variables independientes que tienen un mayor efecto sobre la diferencia de color del pulque deshidratado son la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida, puesto que los correspondientes coeficientes  $\beta_1$  y  $\beta_3$  del modelo presentado son mayores (-20.9334 y -17.1846, respectivamente). El valor negativo indicó que la diferencia de color disminuye conforme cambia la procedencia del pulque y aumenta la temperatura de

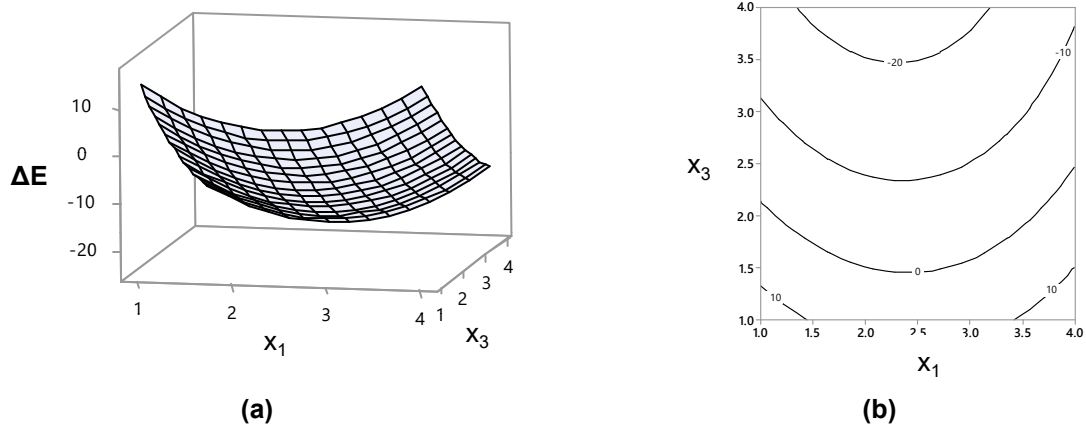
aire de salida durante el proceso de secado. Esto se ve reflejado en las gráficas de superficie de respuesta (Figura 3.19), en donde se observa que existió una disminución en la diferencia de color del pulque en polvo conforme variaba la procedencia del pulque y aumentaba la temperatura de aire de salida.

Por otro lado, la Figura 3.18 muestra que para la variable de respuesta diferencia de color, se obtuvieron valores mínimos (menor a 20) con pulque proveniente del Estado de Puebla y México (valores codificados en 2 y 3) y con una temperatura de aire de entrada de 164 a 220 °C (valores codificados de 1.2 a 4).



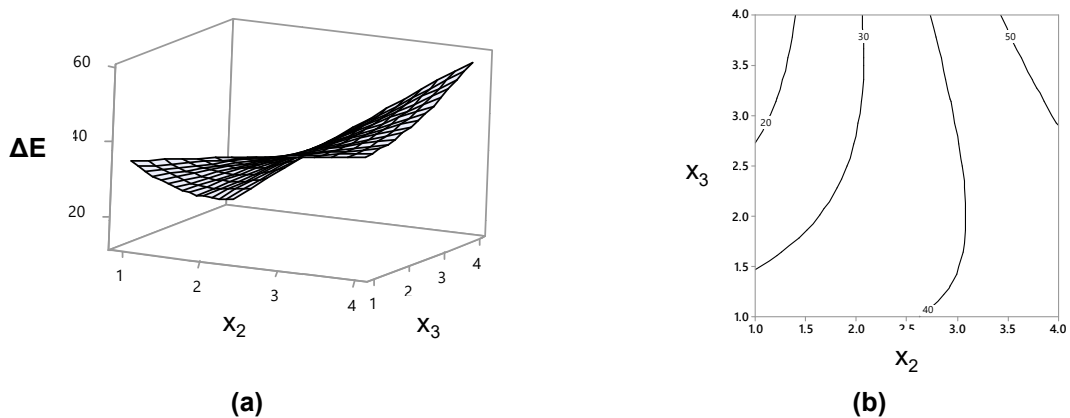
**Figura 3.18** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la diferencia de color como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de entrada.

En la Figura 3.19 se observa que esta mínima diferencia se presenta para los cuatro tipos de pulque (valores codificados de 1 a 4) con temperatura de aire de salida de 80 a 92 °C (valores codificados de 1 a 2.2).



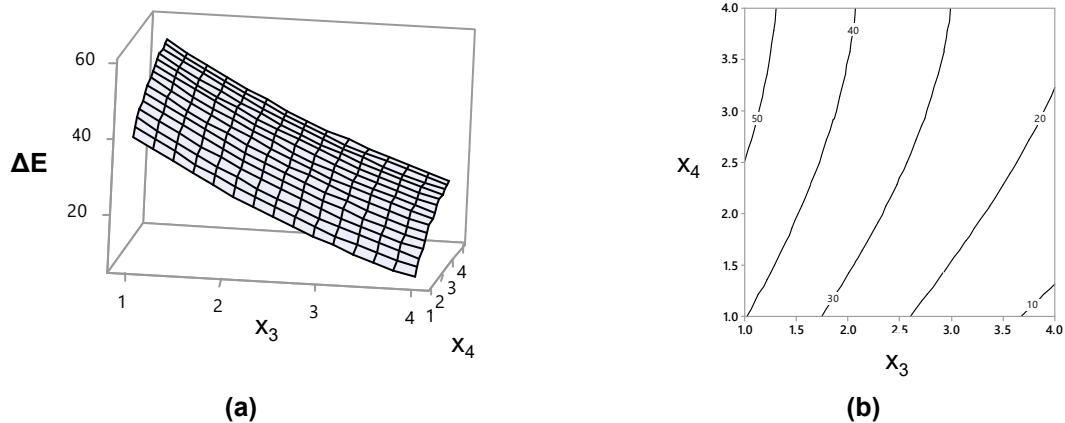
**Figura 3.19** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la diferencia de color como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida.

La diferencia de color es mínima (Figura 3.20) cuando se trabaja con una temperatura de aire de entrada de 160 a 180 °C (valores codificados en 1.0 y 2.0) y una temperatura de aire de salida de 97 a 110 °C (valores codificados en 2.2 y 4).



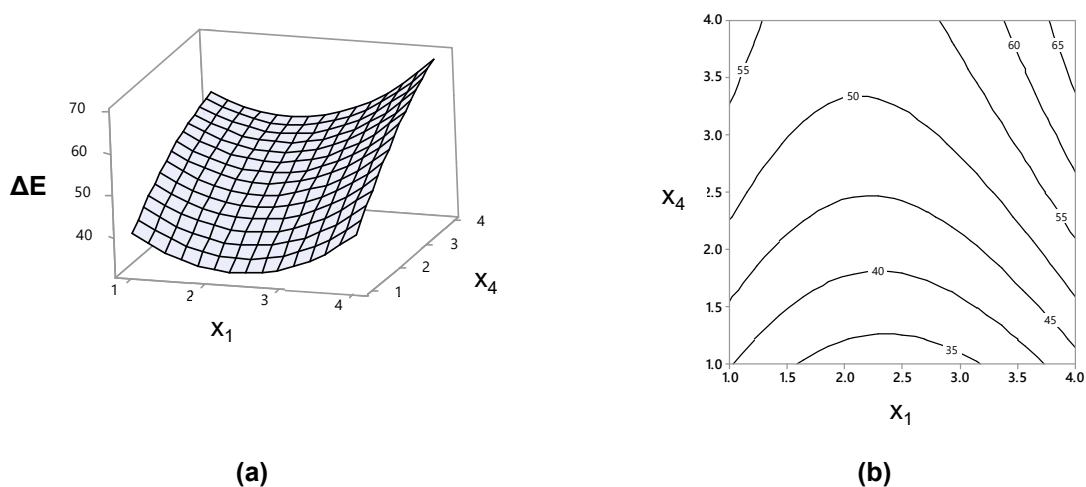
**Figura 3.20** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la diferencia de color como una función de la temperatura de aire de entrada y la temperatura de aire de salida.

Se puede apreciar en la Figura 3.21, que la temperatura de aire de salida en un intervalo de 95 a 110 °C (valor codificados en 2.5 y 4) con un contenido de maltodextrina de 5 a 16.5 % (valor codificados en 1 y 3.3) se obtiene la mínima diferencia de color.

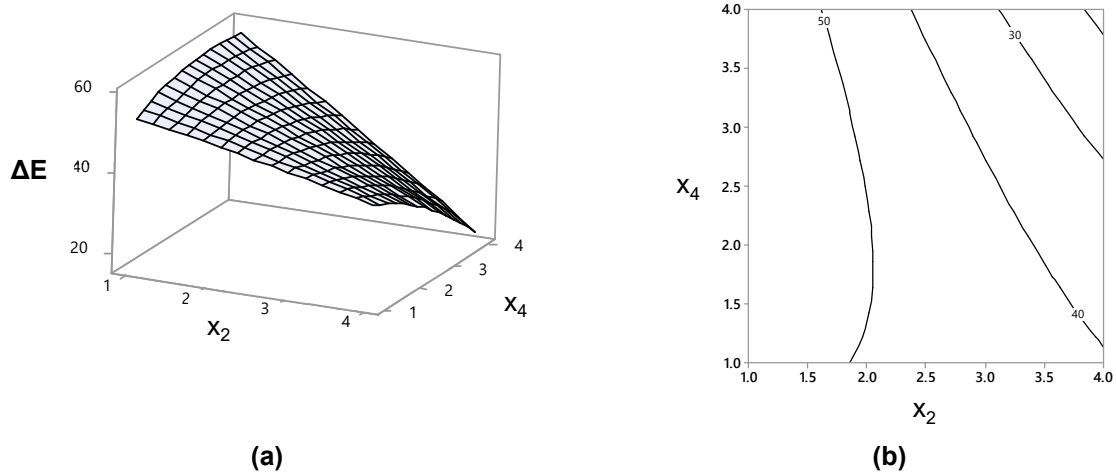


**Figura 3.21** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la diferencia de color como una función de la temperatura de aire de salida y el contenido de maltodextrina.

En las superficies de respuesta de la Figura 3.22 y 3.23 se pueden observar que para el caso de la procedencia de pulque con el contenido de maltodextrina y para la temperatura de aire de entrada con el contenido de maltodextrina, no se obtienen valores de diferencia de color por debajo de 20, esto puede ser debido principalmente al contenido de maltodextrina, ya que esta variable independiente afecta la luminosidad y la cromaticidad de las muestras de pulque en polvo.

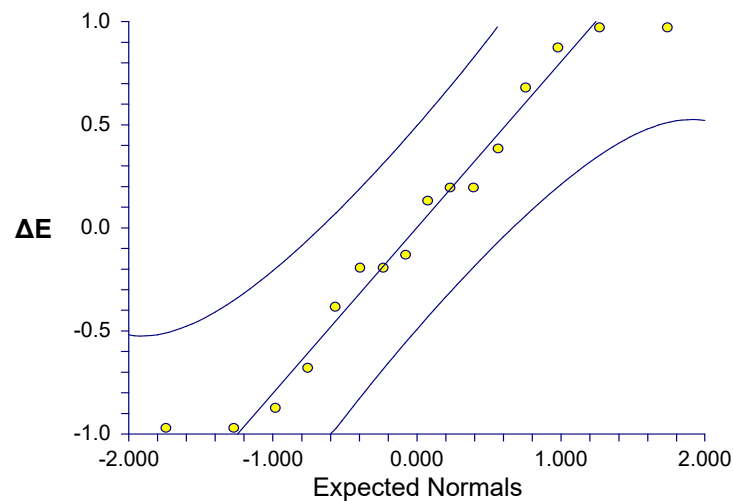


**Figura 3.22** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la diferencia de color como una función de la procedencia del pulque y el contenido de matodextrina.



**Figura 3.23** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos de la diferencia de color como una función de la temperatura de aire de entrada y el contenido de matodextrina.

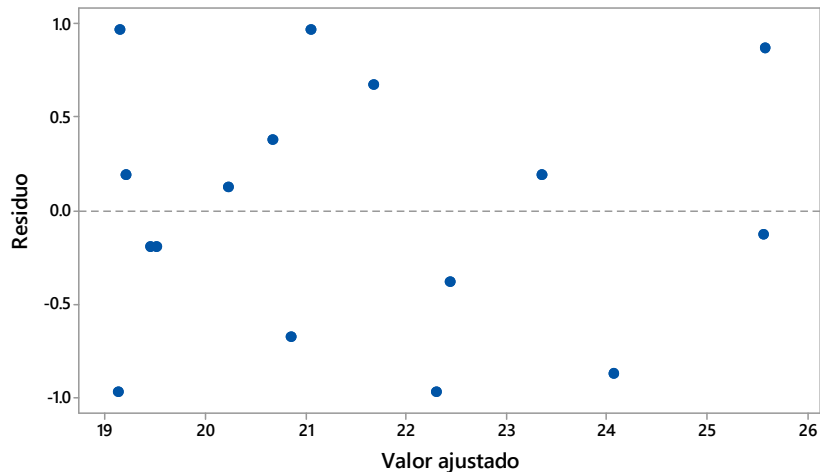
En general la diferencia de color se puede deber a la sensibilidad de los pigmentos de color durante el proceso de calentamiento y al efecto de dilución del color debido a la adición de maltodextrina. Resultados similares encontraron para el secado por aspersión del jugo de nopal, de mora y de granada (Rodríguez-Hernández *et al.*, 2005; Ferrari *et al.*, 2012; Horuz *et al.*, 2012).



**Figura 3.24** Gráfica de distribución normal de residuos de la variable de respuesta diferencia de color.



En la Figura 3.24 y 3.25 se observan las gráficas de probabilidad normal de los residuos y la gráfica de residuos contra los valores ajustados. En ambas graficas se puede observar que los residuos presentan un comportamiento normal.



**Figura 3.25** Gráfica de residuos vs valores ajustados de la variable de respuesta diferencia de color.

### 3.2.4 Rendimiento del pulque

En la Tabla 3.12 se presentan los resultados del rendimiento del pulque durante el proceso de secado por aspersión. Para obtener estos resultados se obtuvo la cantidad de pulque teórico mediante un balance de materia y así el rendimiento experimental se obtuvo del proceso de secado por aspersión del pulque deshidratado de cada experimento.

En estos datos se puede observar que el rendimiento se encuentra en un intervalo del 22.44 al 73.81 %; en donde el valor del 22.44 % se obtuvo para el Estado de Puebla, con una temperatura de entrada de aire de 180 °C, temperatura de aire de salida de 80 °C y un contenido de maltodextrina del 20 %; mientras que el valor de 73.81 % se obtuvo para el Estado de Veracruz con una temperatura de aire de entrada de 160 °C, temperatura de aire de salida de 80 °C y un contenido de

maltodextrina del 5 %. Cabe señalar que no se recupera en su totalidad la cantidad de pulque seco debido a que este se adhiere en la cámara de secado, en el ciclón y en el separador sólido-gas en algunas de las condiciones de secado que se estudiaron.

**Tabla 3.12** Valores experimentales para la variable de respuesta R.

Exp	PP	T <sub>y0</sub> °C	T <sub>ys</sub> °C	MD %	R %
1	1	1	1	1	73.81 <sup>±6.40</sup>
2	1	2	2	2	59.20 <sup>±1.81</sup>
3	1	3	3	3	60.59 <sup>±8.95</sup>
4	1	4	4	4	54.31 <sup>±5.47</sup>
5	2	1	2	3	25.96 <sup>±4.53</sup>
6	2	2	1	4	22.44 <sup>±0.35</sup>
7	2	3	4	1	44.94 <sup>±16.14</sup>
8	2	4	3	2	32.15 <sup>±10.63</sup>
9	3	1	3	4	64.58 <sup>±5.35</sup>
10	3	2	4	3	62.58 <sup>±1.36</sup>
11	3	3	1	2	34.72 <sup>±5.51</sup>
12	3	4	2	1	50.53 <sup>±3.82</sup>
13	4	1	4	2	73.29 <sup>±3.83</sup>
14	4	2	3	1	51.32 <sup>±0.23</sup>
15	4	3	2	4	35.07 <sup>±4.66</sup>
16	4	4	1	3	52.73 <sup>±5.63</sup>

### 3.2.4.1 Análisis estadístico del rendimiento

En la Tabla 3.13 se presenta el análisis de varianza para la variable rendimiento, donde se puede observar que la procedencia del pulque afecta significativamente a esta variable de respuesta a un nivel de confianza del 90 %.

**Tabla 3.13** Análisis de varianza de la variable de respuesta rendimiento.

<b>Factor</b>	<b>GL</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media de cuadrados</b>	<b>Prueba F</b>	<b>Nivel de prob</b>	<b>Term R<sup>2</sup></b>
x <sub>1</sub>	3	2038.583	679.5277	4.52	0.024260*	0.5305
x <sub>2</sub>	3	537.6625	179.2208	0.65	0.597569	0.1399
x <sub>3</sub>	3	606.9849	202.3283	0.75	0.542892	0.1579
x <sub>4</sub>	3	246.0993	82.03309	0.27	0.843239	0.0640
Total ajustado	15	3842.9				

\*Significativo a un nivel de confianza de 90%

### 3.2.4.2 Superficies de respuesta para el rendimiento final

En la Tabla 3.14 se presenta el análisis de varianza para el modelo de segundo orden de la variable diferencia de color, donde se puede observar que no existen diferencias significativas en el término lineal y cuadrático de la regresión, esto con un intervalo de confianza del 90 %.

**Tabla 3.14** Análisis de varianza para el modelo de segundo orden de la variable de diferencia de color.

<b>Fuente de variación</b>	<b>GL</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media de cuadrados</b>	<b>Prueba F</b>	<b>Nivel de prob</b>	<b>Term R<sup>2</sup></b>
Regresión	14	3715.884	265.4203	2.09	0.499607	0.966948
Lineal	4	1013.958	253.4894	2.00	0.481904	0.263852
Cuadrático	4	1234.416	308.6039	2.43	0.443918	0.321220
Interacción	6	1467.51	244.5851	1.93	0.501763	0.381876
Error Total	1	127.0161	127.0161			0.033052

\*Significativo a un nivel de confianza de 90%

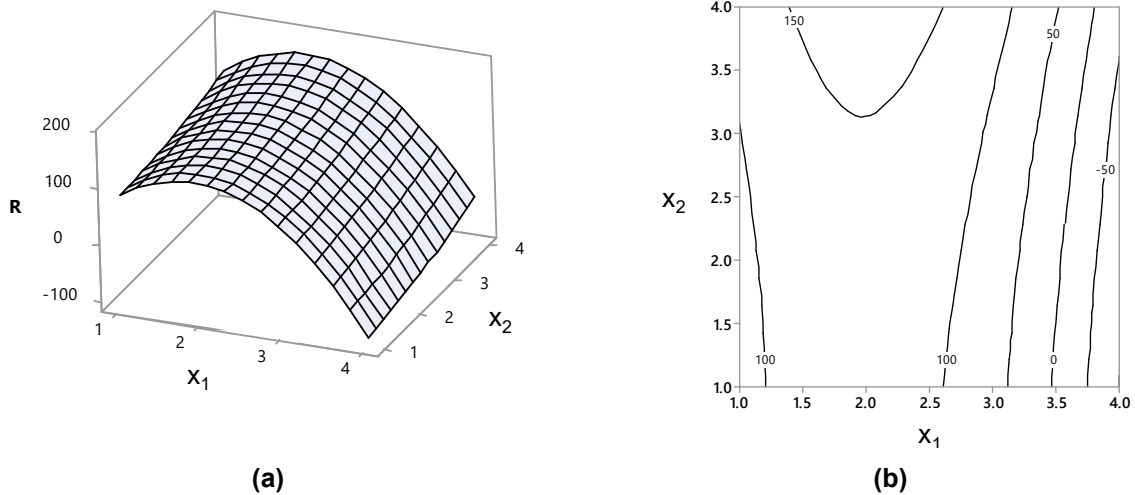
Así mismo se puede apreciar que para este modelo la R<sup>2</sup> tiene un valor de 0.9669, por lo que los datos obtenidos en la parte experimental son representados adecuadamente mediante este modelo.

La ecuación 3.4 representa el modelo de segundo orden con los coeficientes sustituidos al realizar el análisis de regresión de los resultados experimentales para el rendimiento, el cual permitió obtener las superficies de respuesta y las respectivas gráficas de contorno, las cuales se presentan en las figuras 3.26 a 3.31.

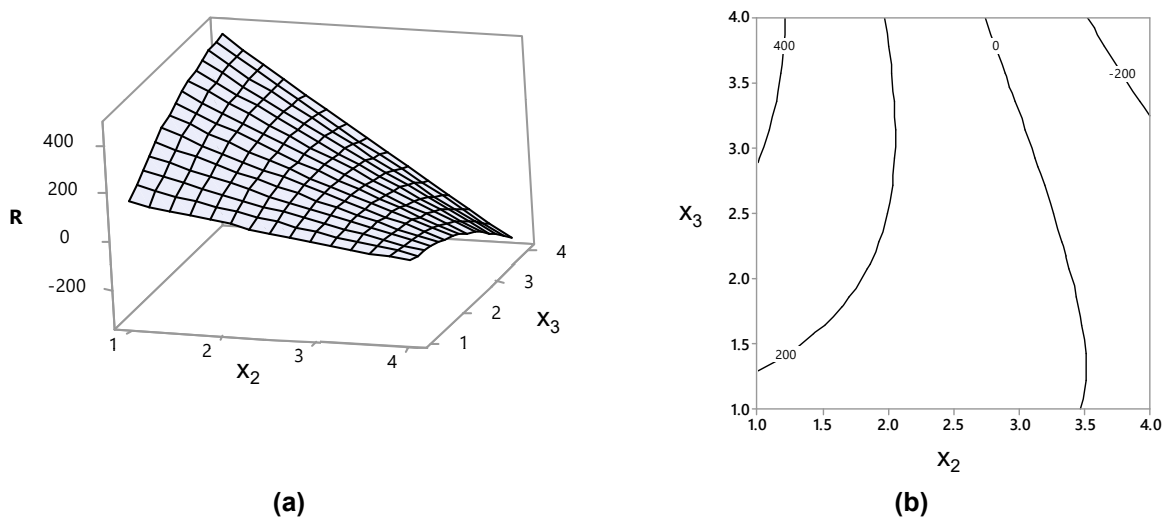
$$\begin{aligned}
 R = & -57.8362 + 194.806X_1 - 9.1592X_2 + 305.8952X_3 - 318.4936X_4 \\
 & - 51.81875X_1^2 + 3.53125X_2^2 - 27.2712X_3^2 + 33.12X_4^2 + 3.111237X_1X_2 \\
 & + 2.1500X_1X_3 + .9793X_1X_4 - 66.7675X_2X_3 + 59.47X_2X_4 - 1.6032E - 10X_3X_4 \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

De la ecuación anterior se puede observar que las variables independientes temperatura de aire de salida y contenido de maltodextrina tuvieron un mayor efecto sobre el rendimiento del pulque, puesto que los coeficientes  $\beta_3$  y  $\beta_4$  del modelo presentado son mayores (305.8952 y -318.4936, respectivamente). Por lo que, el rendimiento aumenta conforme disminuye la temperatura de aire de salida y aumenta el contenido de maltodextrina, esto se ve reflejado en las gráficas de superficie de respuesta (Figura 3.19), en donde se observa que existió un aumento en el rendimiento del pulque en polvo conforme disminuye la temperatura de aire de salida y aumenta el contenido de maltodextrina durante el proceso de secado.

Así mismo en la Figura 3.26 se aprecia que el máximo rendimiento con pulque proveniente del Estado de Puebla y México (valores codificados en 2 y 3) y temperatura de aire de entrada de 10 a 220 °C (valores codificados de 1 a 4). Por otro lado, en la figura 3.27 se observa el máximo rendimiento puede obtenerse con temperatura de aire de entrada de 180 a 200 °C (valores codificados en 2 y 3) con temperatura de aire de salida de 80 a 110 °C (valores codificados en 1 y 4).

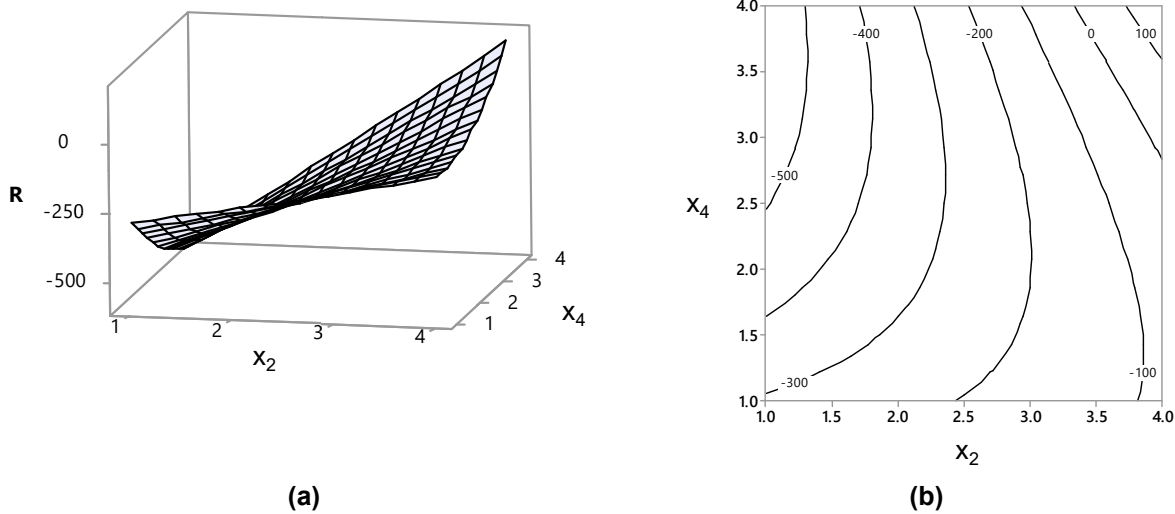


**Figura 3.26** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del rendimiento como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de entrada.



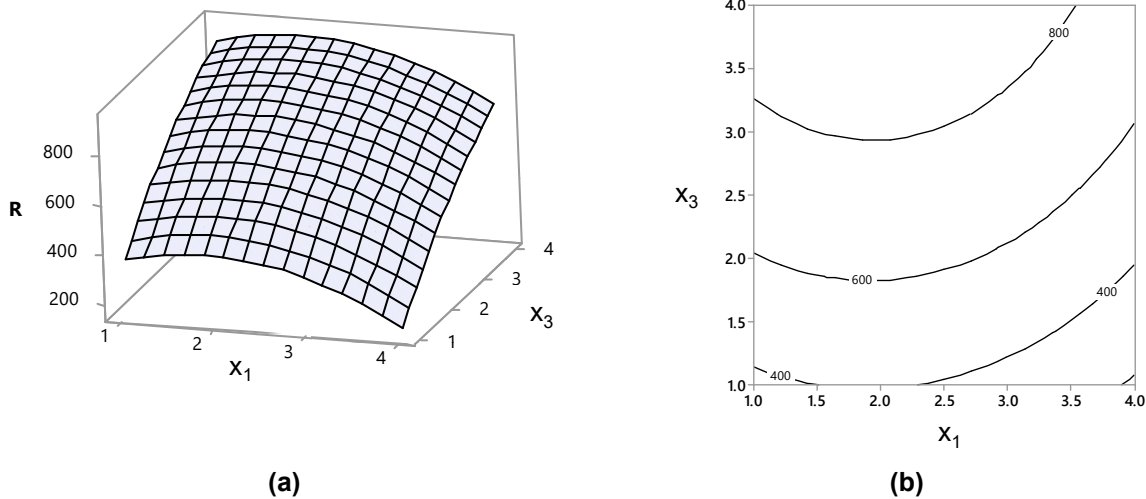
**Figura 3.27** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del rendimiento como una función de la temperatura de aire de entrada y la temperatura de aire de salida.

La Figura 3.28 muestra que el máximo rendimiento se obtiene trabajando con temperatura de aire de entrada de 214 a 220 °C (valores codificados en 3.7 y 4.0) con un contenido de maltodextrina del 17.5 al 20 % (valores codificados en 3.5 y 4).

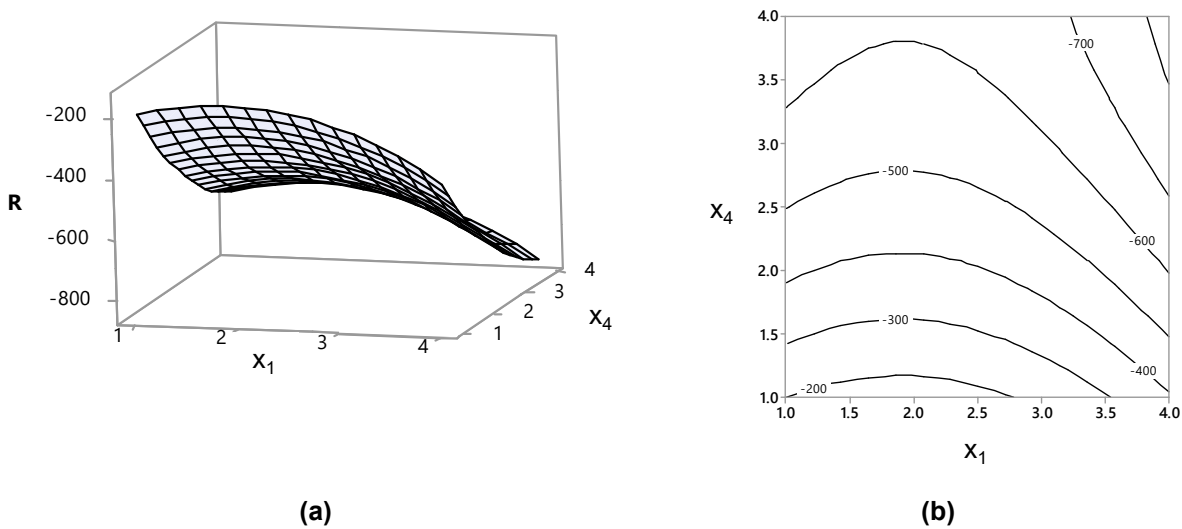


**Figura 3.28** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del rendimiento como una función de la temperatura de aire de entrada y el contenido de maltodextrina.

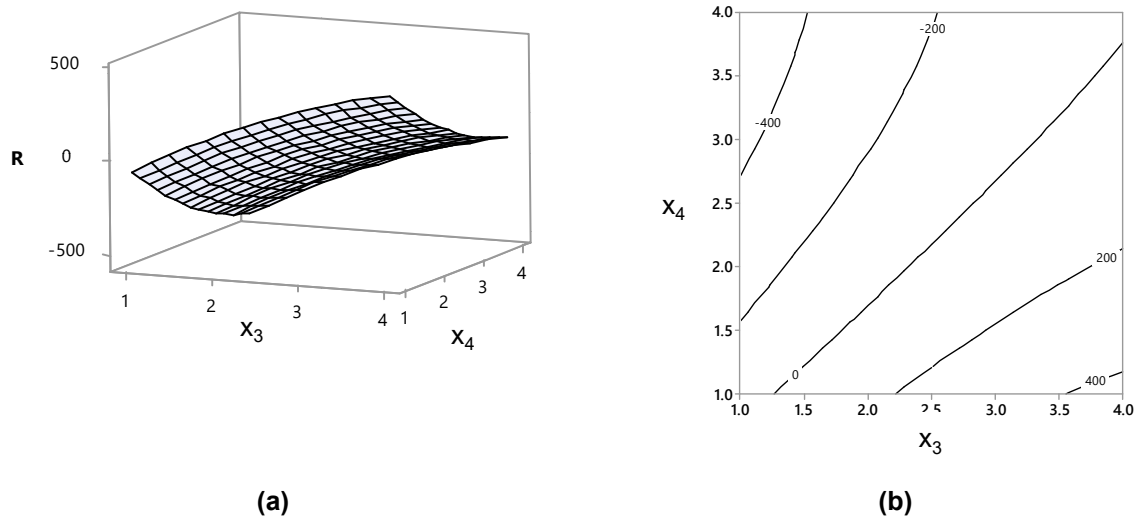
En las superficies de respuesta de las Figuras 3.29, 3.30 y 3.31 se puede observar que al relacionar la procedencia del pulque, la temperatura de aire de salida y el contenido de maltodextrina con el rendimiento, se obtienen valores por debajo o por arriba del 100 %, esto puede ser debido principalmente a que el pulque de las cuatros zonas tiene contenido de solidos totales diferentes y al agregar la maltodextrina para acondicionar el pulque y se pueda llevar a cabo el proceso de secado por aspersión no se tienen una solución pulque-maltodextrina con un porcentaje de humedad constante, sino que también son variables, además de que la temperatura de aire de salida influye en la adherencia del producto en polvo en la cámara de secado, en el ciclón y el filtro, evitando tener una recuperación total del producto.



**Figura 3.29** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del rendimiento como una función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida.



**Figura 3.30** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del rendimiento como una función de la procedencia del pulque y el contenido de maltodextrina.

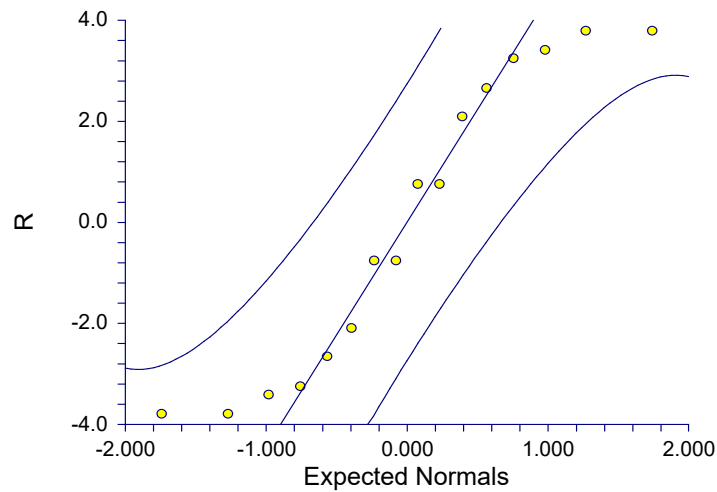


**Figura 3.31** (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contornos del rendimiento como una función de la temperatura de aire de salida y el contenido de maltodextrina.

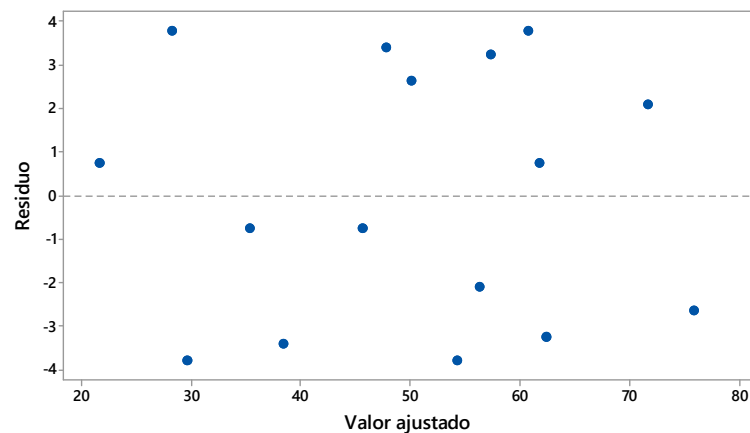
En general el rendimiento del producto se incrementó con el aumento del contenido de maltodextrina en la mezcla y con la disminución de la temperatura de aire de entrada, con este mismo efecto se reportó para el proceso de secado por aspersión de la granada donde se obtuvieron los valores más altos y más bajos de rendimiento de las muestras con el más alto y el más bajo contenido de maltodextrina (Horuz *et al.*, 2012), también en el secado por aspersión de jugo de pasas se encontró que el rendimiento aumentó al incrementar el porcentaje de maltodextrina en la mezcla de alimentación (Papadakis *et al.*, 2006). Esto está de acuerdo con el estudio realizado para el secado por aspersión el pulque.

El análisis de residuos y la gráfica de residuos contra valores ajustados se presentan en la Figura 3.32 y 3.33, observándose que en general se obtuvo un buen comportamiento y distribución de los residuos.





**Figura 3.32** Gráfica de distribución normal de residuos de la variable de respuesta rendimiento.



**Figura 3.33** Gráfica de residuos vs valores ajustados de la variable de respuesta rendimiento.

### 3.3 Optimización del proceso de secado

En esta sección se llevó a cabo la optimización del proceso de secado por aspersión del pulque para cada una de las variables de respuesta. Para efectuar la optimización se utilizó la técnica de superposición de los gráficos de contorno y se empleó el Software Minitab 17.

Cabe señalar que para las variables de respuesta humedad, actividad de agua y diferencia de color se buscan los valores de las variables independientes en donde los valores de la respuesta sean mínimos; mientras que para la variable de respuesta rendimiento, se busca que los valores de las variables independientes en donde el valor de la variable de respuesta sea máximo.

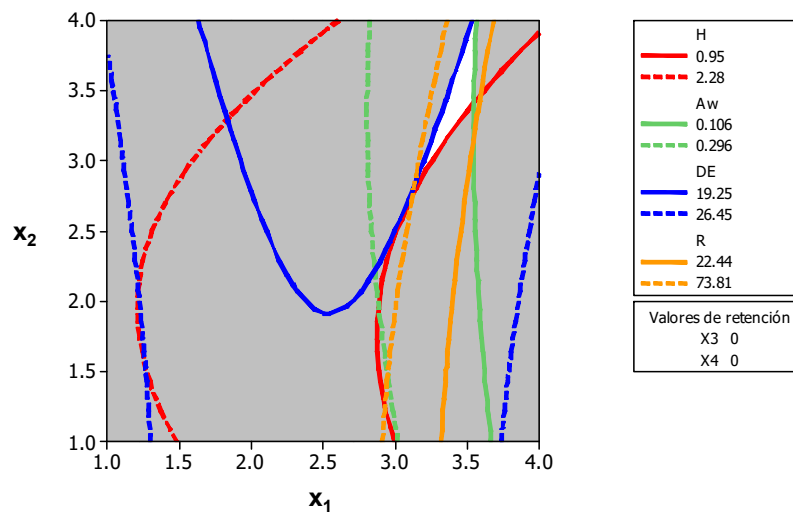
### 3.3.1 Análisis de las gráficas de contorno

En la Figura 3.34 se muestra la gráfica de superposición de contornos de las gráficas de contornos construidas con las variables independientes procedencia de pulque y temperatura de aire de entrada. En esta gráfica se puede observar que el área óptima está en la región correspondiente al pulque proveniente del Estado de México (valor codificado en 3) con una temperatura de aire de entrada en el intervalo de 160 a 220 °C (valor codificado de 1 a 4).

Para obtener los valores óptimos de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de entrada, se determinó el centroide del área óptima. Las coordenadas correspondientes al centroide son aproximadamente: pulque procedente del Estado de México (valor codificado en 3) y temperatura de aire de entrada de 206 °C (valor codificado en 3.30). Con estos valores de las variables de independientes se obtuvieron los siguientes valores para las respuestas estudiadas:

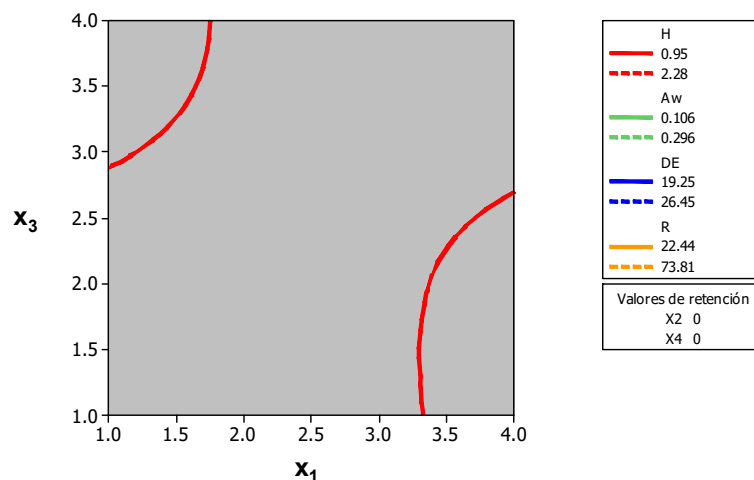
**Tabla 3.15** Valores óptimos estimados para las variables de respuesta en función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de entrada.

Variable de respuesta	Valor estimado
Humedad (%)	1.0426
Actividad de agua	0.1628
Diferencia de color	19.6132
Rendimiento (%)	54.3372

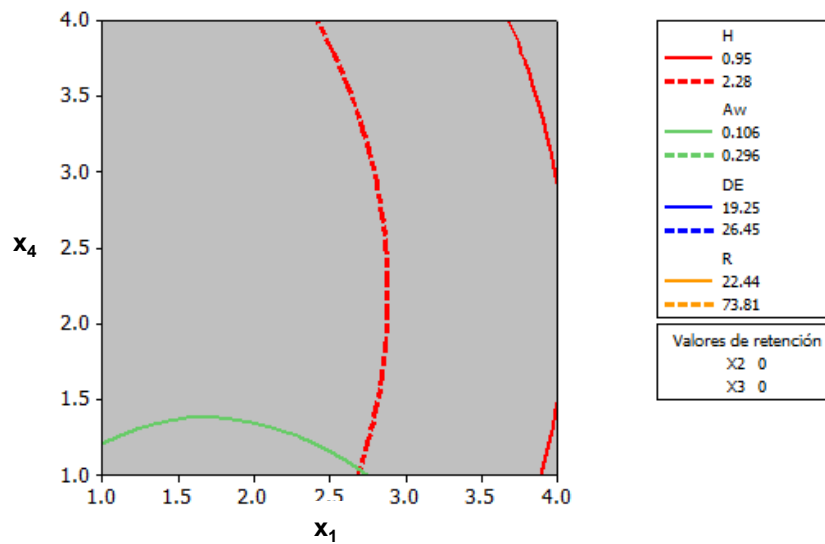


**Figura 3.34** Región óptima obtenida después de superponer las gráficas de contornos de las respuestas como función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de entrada.

En la Figura 3.35 y 3.36 se muestran las gráficas de superposición de contornos de las gráficas de contornos construidas con las variables independientes procedencia de pulque con temperatura de aire de salida y contenido de maltodextrina, donde se puede observar que no se puede obtener una región óptima.

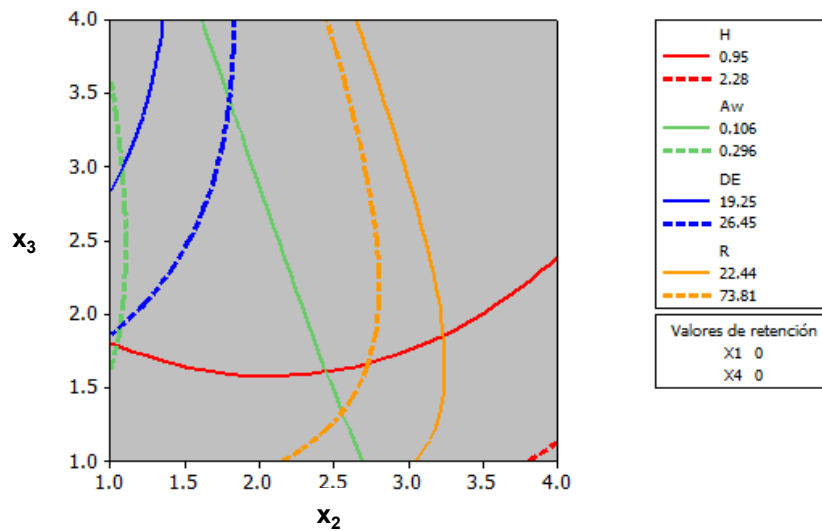


**Figura 3.35** Región obtenida después de superponer las gráficas de contornos de las respuestas como función de la procedencia del pulque y la temperatura de aire de salida.



**Figura 3.36** Región obtenida después de superponer las gráficas de contornos de las respuestas como función de la procedencia del pulque y el contenido de maltodextrina.

En la Figura 3.37 se muestran las gráficas de superposición de contornos en función de la temperatura de aire de entrada y la temperatura de aire de salida, donde se encontró una región factible la cual sugiere trabajar con valores de temperatura de aire de entrada en un intervalo de 160 a 190 °C (valores codificados de 1 a 2.5) y temperatura de aire de salida de 80 a 97 °C (valores codificados de 1 a 2.7); donde el cálculo del centroide da como resultado los valores factibles de las variables independientes temperatura de aire de entrada y salida: una temperatura de aire de entrada de 186.2 °C (valor codificado en 2.31) y una temperatura de aire de salida de 81 °C (valor codificado en 1.10). Dando estos valores de las variables independientes los siguientes resultados para las diferentes respuestas (Tabla 3.16).



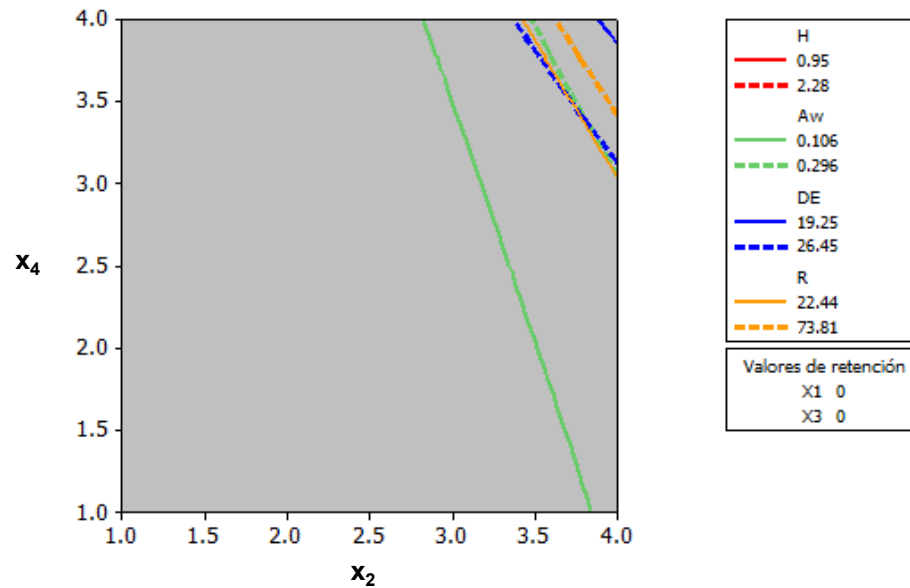
**Figura 3.37** Región factible obtenida después de superponer las gráficas de contornos de las respuestas como función de la temperatura de aire de entrada con la temperatura de aire de salida.

**Tabla 3.16** Valores factibles estimados para las variables de respuesta en función de la temperatura de aire de entrada y la temperatura de aire de salida

Variable de respuesta	Valor estimado
Humedad (%)	1.5106
Actividad de agua	0.1356
Diferencia de color	38.5462
Rendimiento (%)	73.8063

La Figura 3.38 muestra la superposición de las gráficas de contornos en función de las variables independientes temperatura de aire de entrada y contenido de maltodextrina. Se obtuvo un área factible con valores de temperatura de aire de entrada de 210 a 220 °C (valores codificados de 3.5 y 4.0, respectivamente) y contenido de maltodextrina del 15 al 20 % (valores codificados de 3.0 a 4.0, respectivamente); donde el cálculo del centroide da como resultado factibles de las variables independientes temperatura de aire de entrada y contenido de maltodextrina: temperatura de aire de entrada de 212 °C (valor codificado de 3.60) y contenido de maltodextrina de 19.65 % (valor codificado en 3.93). Dando estos

valores de las variables independientes los siguientes resultados para las diferentes respuestas (Tabla 3.17).



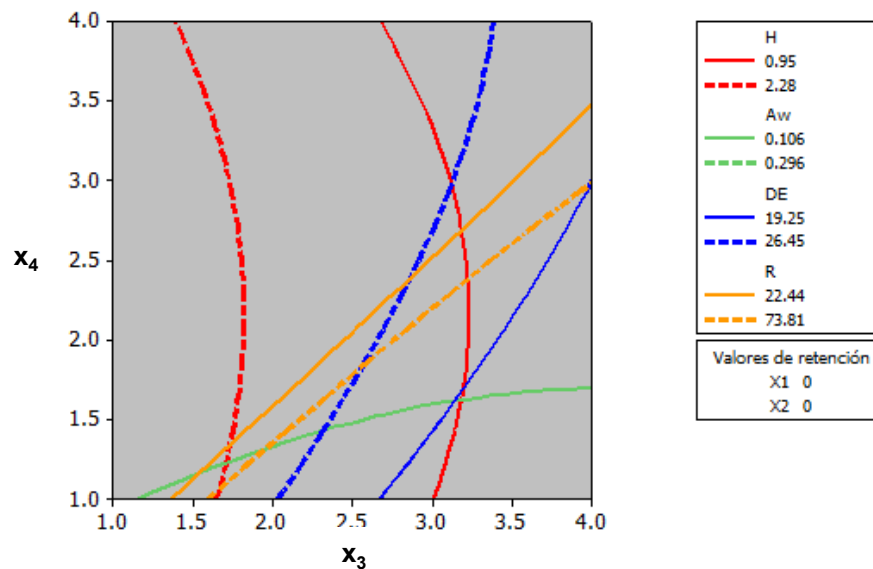
**Figura 3.38** Región factible obtenida después de superponer las gráficas de contornos de las respuestas como función de la temperatura de aire de entrada con el contenido de maltodextrina.

**Tabla 3.17** Valores factibles estimados para las variables de respuesta en función de la temperatura de aire de entrada y contenido de maltodextrina.

Variable de respuesta	Valor estimado
Humedad (%)	3.9277
Actividad de agua	0.3190
Diferencia de color	23.9756
Rendimiento (%)	55.8875

La Figura 3.39 muestra la superposición de las gráficas de contornos en función de las variables independientes temperatura de aire de salida y contenido de maltodextrina. Se obtuvo un área factible con valores de temperatura de aire de salida de 80 a 95 °C (valores codificados de 1.0 y 2.5, respectivamente) y contenido de maltodextrina del 5 al 11.5 % (valores codificados de 1.0 a 2.3, respectivamente);

donde el cálculo del centroide da como resultado factibles de las variables independientes temperatura de aire de salida y contenido de maltodextrina: temperatura de aire de salida de 83.5 °C (valor codificado de 1.35) y contenido de maltodextrina de 9.44 % (valor codificado en 1.88). Dando estos valores de las variables independientes los siguientes resultados para las diferentes respuestas (Tabla 3.18).



**Figura 3.39** Región factible obtenida después de superponer las gráficas de contornos de las respuestas como función de la temperatura de aire de entrada con el contenido de maltodextrina.

**Tabla 3.18** Valores factibles estimados para las variables de respuesta en función de la temperatura de aire de entrada y contenido de maltodextrina.

Variable de respuesta	Valor estimado
Humedad (%)	2.1081
Actividad de agua	0.092
Diferencia de color	30.9316
Rendimiento (%)	53.0168

Analizando los resultados anteriores, se observa que se obtuvieron regiones óptimas y factibles para cada variable independiente. Estas regiones son: pulque procedente del Estado de México, temperatura de aire de entrada de 160 a 212 °C, temperatura de aire de salida de 80 a 95 °C y contenido de maltodextrina del 5 al 19.65 %.

Con estos valores y con la ayuda del Software Minitab 17, se buscó la mejor combinación mediante cuales las respuestas fueran óptimas. Se obtuvieron los siguientes valores para las variables independientes:

Procedencia de pulque: Estado de México.

Temperatura de aire de entrada: 183 °C

Temperatura de aire de salida: 84 °C

Contenido de maltodextrina: 5 %

Con estos valores de las variables independientes, se obtuvieron los siguientes valores para cada respuesta (Tabla 3.19).

**Tabla 3.19** Valores óptimos estimados para las variables de respuesta.

Variable de respuesta	Valor estimado
Humedad (%)	0.936
Actividad de agua	0.227
Diferencia de color	19.30
Rendimiento (%)	73.6

### 3.4 Validación de los puntos óptimos

La validación se realizó como se describió en la sección 2.9 del capítulo 2. Para ello se realizaron dos corridas experimentales con los valores obtenidos de las variables independientes mediante la optimización. Con estas condiciones se obtuvieron los siguientes valores para las respuestas (Tabla 3.20).



**Tabla 3.20** Resultados de la validación de las variables de respuesta.

<b>Variable de respuesta</b>	<b>Valor experimental</b>
Humedad (%)	4.31 $\pm$ 0.63
Actividad de agua	0.435 $\pm$ 0.041
Diferencia de color	23.40 $\pm$ 1.22
Rendimiento (%)	41.26 $\pm$ 4.51

Se obtuvo el error relativo para cada respuesta mediante la ecuación 2.10. Los resultados del error relativo para cada respuesta se presentan en la Tabla 3.21.

**Tabla 3.21** Resultados del error relativo para las variables de respuesta.

<b>Variable de respuesta</b>	<b>Error relativo (%)</b>
Humedad	78.28
Actividad de agua	47.59
Diferencia de color	17.52
Rendimiento	78.43

Se pudo observar que el error relativo para la humedad, la actividad de agua y el rendimiento fue mayor al 20 %, esto es debido a que el proceso de secado por aspersión se vio afectado por la humedad relativa ambiental, la cual es un factor externo que no se puede controlar. La humedad relativa en la ciudad de Orizaba varía con respecto a la época del año, en los meses de mayo-julio se presenta una humedad relativa promedio del 65 % por lo que las variables de respuesta generadas del proceso de secado por aspersión no se ven muy afectadas, mientras, que en los meses de agosto a septiembre la humedad relativa promedio varía del 85 al 100 % afectando así el funcionamiento del equipo, por lo que se obtienen humedades y actividades de agua altas y rendimientos bajos (SMN, 2015).

### 3.5 Cuantificación de cenizas, calcio y ácido ascórbico

Para obtener los resultados del contenido de cenizas, calcio y ácido ascórbico del pulque en polvo se siguió la metodología planteada en el capítulo 2 y se emplearon las muestras procedentes de la validación de los puntos óptimos. Esto se realizó con la finalidad de analizar si hubo degradación en los principales componentes nutricionales con respecto al pulque fresco. En la Tabla 3.22 se muestran los resultados obtenidos de estos parámetros, los resultados se realizaron por duplicado.

**Tabla 3.22** Resultados para el contenido de cenizas, calcio y ácido ascórbico en el pulque en polvo.

Parámetro	
Cenizas (%)	1.1955 <sup>±0.2341</sup>
Calcio (mg / 100 g)	47.5 <sup>±1.70</sup>
Ácido ascórbico (mg /100 g)	38.06 <sup>±5.05</sup>

El contenido de cenizas del pulque en polvo fue mayor con respecto al pulque fresco (0.6583 % en promedio) por lo que hubo un incremento en el contenido de minerales, esto probablemente se debe a la adición de maltodextrina. Se encontró que el pulque en polvo contiene 47.5 mg de calcio (1.9611 %) y 38.06 mg de ácido ascórbico por cada 100 g de pulque en polvo, lo cual resultó de gran interés, ya que no hubo evidencia de degradación de estos componentes durante el proceso de secado por aspersión.

**CONCLUSIONES**

**Y**

**RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se logró determinar las condiciones de secado por aspersión de pulque procedente de *Agave salmiana* y se evaluaron las propiedades fisicoquímicas (humedad, actividad de agua, parámetros de color) antes y después del proceso de secado por aspersión.

El contenido de sólidos totales varió estadísticamente de acuerdo a su estado de procedencia, por lo que se requirió emplear un material de pared para incrementar sus sólidos. Efectuar el secado por aspersión del pulque resultó necesario debido a que al tener valores de  $a_w$  y  $X$  mayores a 0.9 y 90 % respectivamente, convierten al pulque en un producto propenso a reacciones deteriorativas.

Las variables de respuesta de humedad y actividad de agua del pulque deshidratado no fueron afectadas significativamente por la procedencia del pulque,  $T_{V0}$ ,  $T_{Vs}$  y el contenido de maltodextrina, obteniéndose valores de  $a_w$  y humedad en el intervalo de  $0.106 < a_w < 0.296$  y  $0.95 \% < X < 2.28 \%$ , respectivamente, lo que asegura que el producto es estable y no presentará crecimiento de microorganismos ni habrá desarrolló de reacciones deteriorativas.

La procedencia del pulque, la temperatura de aire de entrada, la temperatura de aire de salida y el contenido de maltodextrina no afectaron significativamente a la diferencia de color; por lo que la menor diferencia de color con respecto al estándar de placa blanca se presentó en el experimento correspondiente al pulque procedente del Estado de México, con una temperatura de aire de entrada de 160 °C, temperatura de aire de salida de 100 °C y con un 20 % de maltodextrina, obteniéndose un producto deshidratado con una blancura aceptable.

El pulque deshidratado procedente del Estado de Veracruz con una temperatura de aire de entrada de 160 °C, temperatura de aire de salida 80 °C y un contenido de

maltodextrina el 5 % mostró un rendimiento del 73.81 %, lo cual resulta de interés ya que al operar el equipo de manera continua el rendimiento tenderá a incrementarse.

Mediante la superposición de contornos se observó que los mejores resultados se obtuvieron al efectuar el secado con pulque procedente del Estado de México, a una temperatura de aire de entrada de 183 °C, temperatura de aire de salida de 84 °C y un contenido de maltodextrina del 5 %. Con estas condiciones óptimas, se obtuvieron valores de humedad de 0.936 %, con una actividad de agua 0.22, una diferencia de color de 19.30, teniendo el proceso de secado un rendimiento del 73.6 %.

Las condiciones óptimas fueron validadas experimentalmente y se obtuvo un error relativo mayor al 20 % para el contenido de humedad, la actividad de agua y el rendimiento. Parte de este error es debido a que actualmente no se puede controlar la humedad relativa contenida en el aire de entrada del secador, ya que esta varía dependiendo de las condiciones meteorológicas y de la época del año.

Se encontró que el pulque en polvo contiene 1.1955 % de cenizas, 47.5 mg de calcio (1.9611 %) y 38.06 mg de ácido ascórbico por cada 100 g de pulque en polvo, no manifestando degradación de estos componentes durante el proceso de secado por aspersion.

Por lo anterior, se recomienda efectuar el proceso de secado por aspersion de pulque procedente del Estado de México, con una temperatura de aire de entrada de 183 °C, temperatura de aire de salida de 84 °C y un contenido de maltodextrina del 5 %. Con estas condiciones de secado se debe obtener un producto final (pulque en polvo) con el menor contenido final de humedad (0.936 %), la menor actividad de agua (0.227), la menor diferencia de color (19.30) y el mayor rendimiento (73.6 %).

Los cambios que se presentan en la humedad ambiental entre las diferentes estaciones y regiones, afecta el proceso de secado por aspersion, es por esta razón

que se recomienda adquirir un deshumidificador que permita acondicionar tanto el aire de entrada al secador como el aire comprimido empleado en la etapa de atomización.

Se recomienda realizar pruebas de almacenamiento, solubilidad y evaluación sensorial del pulque en polvo para evaluar el efecto del almacenamiento sobre las características fisicoquímicas del producto deshidratado.

El pulque presenta una amplia población microbiana por lo que se recomienda realizar pruebas microbiológicas para evaluar el efecto que tuvo el proceso de secado por aspersión sobre estas.

**REFERENCIAS**

**BIBLIOGRÁFICAS**

---

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arilla, F.E. 1999. Vitaminas hidrosolubles. En: Tratado de nutrición. Hernández, R.M. y Sastre, G.A. (Editores). Ediciones Díaz de Santos. Madrid. p. 153-175.

Ayala, G.L. 2010. Inducción de embriogénesis somática en cultivo in vitro de *Agave atrovirens* Karw Ex. Salmdyck. Tesis de Grado. Maestría en Biotecnología Aplicada. Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Instituto Politécnico Nacional. México.

Ayala, R.G. y Ruíz, S.G. 1996. Usos del maguey pulquero *Agave salmiana* en México. Ciencia Nicolaita, Revista Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. **11**:105-111.

Badui, D.S. 2006. Química de los alimentos. 4ta. Edición. Pearson Educación. México.

Banco de Normas Mexicanas. 1972a. NMX-V-022-1972: Aguamiel. Normas Mexicanas. Dirección General de Normas. México.

Banco de Normas Mexicanas. 1972b. NMX-V-037-1972: Pulque manejado a granel. Normas Mexicanas. Dirección General de Normas. México.

Backstrad, J.R., Allen, L.H., Martínez, E. y Pelto, G.H. 2001. Maternal consumption of pulque, a traditional central mexican alcoholic beverage: relationships to infant growth and development. Public Health Nutrition. **4**(4):883-891.

Backstrad, J.R., Allen, L.H., Black, A.K., de Mata, M. y Pelto, G.H. 2002. Diet and iron status of nonpregnant women in rural Central Mexico. Am J Clin Nutr. **76**:156-164.



Backstrad, J.R., Goodman, A.H., Allen, L.H. y Pelto, G.H. 2004. Pulque intake during pregnancy and lactation in rural Mexico: alcohol and child growth from 1 to 57 month. *European Journal of Clinical Nutrition*. **58**:1626-1634.

Barbosa-Cánovas, G.V. y Vega-Mercado, H. 1996. Dehydration of foods. Chapman & Hall. New York.

Barreiro, M.J.A. y Sandoval, B.A.J. 2006. Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas. Editorial Equinoccio. Caracas, Venezuela.

Battcock M. y Azam-Ali S. 1998. Fermented fruits and vegetables. A global perspective. FAO Agricultural Services, Bulletin No. 134. Roma.

Bhuyan, M. 2007. Measurement and control in food processing. CRC Press. Raton, FL. p. 105-122.

Bolboacă S.D y Jäntschi L. 2007. Design of experiments: Useful orthogonal arrays for number of experiments from 4 to 6. *Entropy*. **9**:198-232.

Bradley, R.L. 2010. Moisture and total solids analysis. En: Food analysis. Nielsen, S.S (Editor). 4th Ed. Springer Science + Business Media, Inc. New York.

Calvo, C. 2004. Optical properties. En: Handbook of food analysis: Physical characterization and nutrient analysis. Nollet, L.M.L (Editor). CRC. Press. Boca Raton, FL. p. 1-19.

Castillo, Q.D., Villareal, Q.J.A. y Cano, P.A. 2007. El género *Agave* L. bajo cultivo: taxonomía, distribución y usos. *Rev. Ciencia Forestal en México*. **32**(101):57-70.

Castro, R.B., Castells, E.P. y Martínez de Victoria, M.E. 2010. Nutrición, cocina y gastronomía. En: Tratado de nutrición: nutrición humana en el estado de salud. Gil, H.A., Martínez de Victoria, M.E. y Maldonado, L.J. (Editores). Editorial Médica Panamericana. 2ª Edición. Volumen III. Madrid. p. 397-422.

Cervantes-Contreras, M. y Pedroza, A.M. 2008. Caracterización microbiológica del pulque y cuantificación de su contenido de etanol mediante espectroscopia Raman. *Superficies y Vacío*. **20**(3):1-5.

Chen, X.D. 2008. Food drying fundamentals. En: Drying technologie in food processing. Chen, X.D y Mujumdar, A.S (Editores). John Wiley & Sons. p. 1-54.

Cravioto, R.O., Massieu, H.G., Guzmán, G.J. y Calvo, J. 1951. Composición de alimentos mexicanos. *Revista Hispano Americana de Ciencias Puras y Aplicadas*. **5-6**(XI):129-155.

Cybulska, E.B. y Doe, P.E. 2007. Water and food quality. En: Chemical and functional properties of food components. Sikorski, Z.E (Editor) 3rd Edition. CRC Pres. Boca Raton, FL. p. 29-60.

Del Razo. 2004. Valor nutritivo del pulque. [www.pulqueazteca.com](http://www.pulqueazteca.com). (Consultada en octubre, 2014).

Domínguez-Niño, A. 2013. Proceso de secado por aspersion de suero de leche. Tesis de grado. Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

Escalante, A., Rodríguez, M.E., Martínez, A., López-Munguía, A., Bolívar, F. y Gosset, G. 2004. Characterization of bacterial diversity in pulque, a traditional

mexican alcoholic fermented beverage, as determined by 16S rDNA analysis. FEMS Microbiology Letters. **235**:273-279.

Escalante, A., Giles-Gómez, M., Hernández, G., Córdoba-Aguilar, M.S., López-Munguía, A., Gosset, G. y Bolívar, F. 2008. Analysis of bacterial community during the fermentation of pulque, a traditional Mexican alcoholic beverage, using a polyphasic approach. International Journal of Food Microbiology **124**:126-134.

Escalante, A., Giles-González, M., Esquivel, F.G., Matus, A.V., Moreno-Terrazas, R., López-Munguía, A. y Lappe-Oliveras, P. 2012. Pulque fermentation. En: Handbook of plant-based fermented food and beverage technology. Hui, Y.H. (Editor). 2nd Edition. CRC Press. Boca Raton, FL. p. 691-704.

Farré, R.R. y Frassetto, P.I. 1999. Calcio, fósforo y magnesio. En: Tratado de nutrición. Hernández, R.M. y Sastre, G.A. (Editores). Ediciones Díaz de Santos. Madrid. p. 217-228.

Ferrari, C.C., Germer, S.P.M y de Aguirre, J.M. 2012. Effect of spray drying conditions on the physicochemical properties of blackberry powder. Drying Technology. **30**(2):154-163.

Figura, L.O. y Teixeira, A.A. 2007. Food physics: physical properties-measurement and applications. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.

Geankoplis, C.J. 1998. Proceso de transporte y operaciones unitarias. 3ra Edición. Compañía Editorial Continental.

Gentry, H.S. 1982. Agaves of continental North America. University of Arizona Press. USA.

Godoy, A., Herrera, T. y Ulloa, M. 2003. Bebidas alcohólicas no destiladas indígenas de México. UNAM.

Gong, Z., Zhang, M., Mujumdar, A.S. y Sun, J. 2008. Spray drying and agglomeration of instant bayberry powder. *Drying Technology*. **26**:116-121.

Goula, A.M., Adomopoulos, K.G. y Kazakis, N.A. 2004. Influence of spray drying conditions on tomato powder properties. *Drying Technology*. **22**(5):1129-1151.

Horuz, E., Altan, A. y Maskan, M. 2012. Spray drying and process optimization of unclarified pomegranate (*Punica granatum*) juice. *Drying Technology*. **30**(7):787-798.

Ibarz, A. y Barbosa-Cánovas, G.V. 2010. Unit operations in food engineering. CRC Press. USA.

Karel, M. y Lund, D.B. 2005. Physical principles of food preservation. Second Edition. Taylor and Francis. New York.

Kennedy, J.F., Knill, C.J. y Taylor, D.W. 1995. Maltodextrin. En: Handbook of starch hydrolysis products and their derivatives. Kearsley, M.W. y Dziedzic, S.Z. (Editores). Springer Science and Business Media. p. 65-82.

Khosrow, D. 1989. Quality control, robust design and the Taguchi method. Wadsworth & Brooks/Cole. Statistics/Probability Series. Pacific Grove, California.

Lappe-Oliveras, P., Moreno-Terrazas, R., Arrizón-Gaviño, J., Herrera-Suárez, T., García-Mendoza, A. y Gschaedler-Mathis, A. 2008. Yeast associated with the production of mexican alcoholic nondistilled and distilled Agave beverages. *FEMS Yeast Research*. **8**:1037-1052.

León-de la O, D., Méndez-Colín, D., Rodríguez-Padilla, D., Puente-Hurle, L., García-Sorrondegui, F. y Salgado-Brito, R. 2012. Análisis bromatológico y aislamiento de microorganismos con potencial probiótico del pulque. *Investigación Universitaria Multidisciplinaria*. **11**(11):115-122.

León-Vázquez, N., Campos, A.G., Enríquez-del Valle, J.R., Velasco, V.V, Marini, Z.F. y Rodríguez O.G. 2013. Diversidad de especies de agave en San Miguel Tilquiapan; Ocotlán, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. **6**:1185-1195.

McKay, M., Buglass, A.J. y Gook, L.C. 2010. Fermented beverages: beers, ciders, wines and related drinks. Cereal-based and other fermented drinks of Asia, Africa and Central/South America. En: Handbook of alcoholic beverages technical, analytical and nutritional aspects. Buglass, A.J (Editor). John Wiley & Sons. p. 211-229.

Manrique, D.R. 2013. Caracterización y conservación de inóculos tradicionales para la producción de pulque. Tesis de grado. Licenciatura en Química de Alimentos. Facultad de Química. Universidad Autónoma Nacional de México. México.

Marshall, M.R. 2010. Ash analysis. En: Food analysis. Suzanne, N.S (Editor). 4th Edition. Springer. New York. p. 105-116.

Martínez, S.M., Mata, G.R., Granados, S.D. y Gómez, C.M. 2013. Caracterización ecológica y socioeconómica del maguey verde (*Agave salmiana* ssp. *Crassispina*). En: Ecología y usos de especies forestales de interés comercial de las zonas áridas de México. Martínez, S.M (Editor). 1ra Edición. INIFAP. México. p. 95-125.

Massieu, G.H., Guzmán, J., Cravioto, R.O. y Calvo, J. 1949. Determination of some essential amino acids in several uncooked and cooked mexican foodstuffs. *The Journal of Nutrition*. 293-304.

Masters, K. 1991. Spray Drying Handbook. 5th Edition. Longman Group Limited, UK.

Moreno-de LeBlanc, A., Todorov, S.D., Vignolo, G., Savoy-de Giori, G. y LeBlanc, J.G. 2014. Indigenous Fermented Foods of Latin America. En: Microorganisms and Fermentation of Traditional Foods. Ray, R.C y Montet, D. (Editores). CRC Press, Food Biology Series. 1st Edition. Boca Raton, FL. p. 312-340.

Mujumdar, A.S. 2004. Guide to Industrial Drying: Principles, Equipment and New Developments. Colour Publications Pvt. Ltd. Mumbai, India.

Mujumdar, A.S. 2015. Principles, Classification, and Selection of Dryers. En: Handbook of industrial drying. Mujumdar, A.S. (Editor). 4th Edition. CRC Press. Boca Raton, FL. p. 3-30.

Muñoz-López, C. 2013. Proceso de secado por charolas y liofilización de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.). Tesis de grado. Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

Nava-Cruz, N.Y., Medina-Morales, M.A., Martínez, J.L., Rodríguez, R. y Aguilar, C.N. 2014. Agave biotechnology: an overview. Crit. Rev. Biotechnol. **Early Online**:1-14.

Olvera, C.C., Ávila, F. A., Bustillo, A.G.R. y López-Munguía, A. 2015. Processing of fructans and oligosaccharides from agave plants. En: Processing and impact on active components in food. Preedy, V.R (Editor). Academic Press, Elsevier. USA.

Papadakis, E.S., Gardeli, C. y Tzia, C. 2006. Spray drying of raisin juice concentrate. *Drying Technology*. **24**(2):173-180.

Parra, N.L., Del Villar, Q.P. y Prieto R.A. 2010. Extracción de fibras de agave para elaborar papel y artesanías. *Acta Universitaria de la Universidad de Guanajuato*. **20(3):77-83**.

Pegg, R.B. y Shahidi, F. 2007. Encapsulation, stabilization, and controlled release of food ingredients and bioactives. En: Handbook of food preservation. Rahman, M.S. (Editor). 2nd Edition. CRC Press. Boca Raton, FL. p. 509-567.

Quek, S.Y., Chok, N.K. y Swedlund, P. 2007. The physicochemical properties of spray-dried watermelon powder. *Chemical Engineering and Processing*. **46(5):386-392**.

Rahman, M.S. 2009. Food properties: An overview. En: Food properties handbook. Rahman, M.S (Editor). 2nd Edition. CRC Press. Boca Raton, FL. p. 1-8.

Rahman, M.S., Sablani S. 2009. Water activity measurement methods of foods. En: Handbook of food preservation. Rahman, M.S (Editor). 2nd Edition. CRC Press. Boca Raton, FL. pp. 9-30.

Ramírez, J.F., Sánchez-Marroquín A., Álvarez M.M., Valyasebi R. 2004. Industrialization of mexican pulque. En: Industrialization of Indigenous Fermented Foods. Steinkraus K. (Editor). 2nd Edition. Marcel Dekker. New York. p. 548–575.

Reynoso, S.R., García, M.J., López, B.W. y López, L.A. 2012. Identificación taxonómica de las especies de agave utilizadas para la elaboración del licor Comiteco en Chiapas. 1ra. Edición. INIFAP. México.

Rodríguez-Hernández, G.R., González-García, R., Grajales-Lagunes, A. y Ruíz-Cabrera, M.A. 2005. Spray-drying of cactus pear juice (*Opuntia streptacantha*): Effect

on the physicochemical properties of powder and reconstituted product. *Drying Technology*. **23**(4):955-973.

Roy, R.K. 2001. Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement. John Wiley & Sons.

Sahin, S. y Gülüm, S.S. 2006. Physical properties of foods. Springer. New York.

Sánchez-Marroquín, A. 1977. Mexican pulque a fermented drink from Agave juice. Symposium on Indigenous Fermented Foods, Bangkok, Thailand.

Santos, P.H.S. y Silva, M.A. 2008. Retention of vitamin C in drying processes of fruits and vegetables: A review. *Drying Technology*. **26**(12):1421-1437.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2015. Cierre de la producción agrícola por cultivo para el año 2014. [www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/](http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/) (Consultada en octubre, 2015).

Smith, G.F. y Figueiredo, E. 2012. A further species of *Agave* L., *A. salmiana* Otto ex Salm-Dyck (*subsp. almiانا*) var. *salmiana* (*Agavaceae*), naturalized in the Eastern Cape Province of South Africa. *Bradleya*. **30**:179.186.

SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2015. <http://smn.cna.gob.mx/> (Consultada en noviembre, 2015).

Solval, K.M., Sundararajan, S., Alfaro, L. y Sathivel, S. 2012. Development of cantaloupe (*Cucumis melo*) juice powders using spray drying technology. *Food Science and Technology*. **46**:287-293.



Steinkraus, K.H. 1979. Nutritionally significant indigenous foods involving and alcoholic fermentation. En: Fermented Food beverages in nutrition. Gastineau, C.G., Darvy, W.J y Turner, T.B. (Editores). The Nutrition Foundation Series. Academic Press. USA.

Tapia, M.S., Alzamora, S.M., y Chirife, J. 2007. Effects of water activity ( $a_w$ ) on microbial stability: As a hurdle in food preservation. En: Water activity in foods. Barbosa-Cánovas, G.V., Fontana, A.J., Schmidt, S.J. y Labuza, T.P. (Editores). 1st Edition. IFT Press. Iowa, USA. p. 239-272.

Thompson, J.L., Manore, M.M. y Vaughan, L.A. 2008. Nutrición. Pearson Educación. Madrid.

Troller, J.A. 2012. Water activity and food. Food science and technology. Elsevier. USA.

Verduzco-Martínez, J., Predo-Rojas, C., Mercado-Hernández, R. 2009. Caracterización e identificación taxonómica del maguey. *Revista Salud Pública y Nutrición*. **2**:75-99.

Wandrey, C., Bartkowiak, A. y Harding, S.E. 2010. Materials for encapsulation. En: Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing. Zuidam, N.J. y Nedovic, V.A (Editores). Springer. p. 31-101.

Welty-Chanes, J. y Vergara-Balderas, F. 1997. Actividad de agua: conceptos y aplicación en alimentos con alto contenido de humedad. En: Temas en tecnología de alimentos. Aguilera, J.M. (Editor). Vol. 1. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología (CYTED). Instituto Politécnico Nacional. México, D.F.

Wu, H. 2013. Application of orthogonal experimental design for the automatic software testing. Proceeding of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering. Atlantis Press. Paris, France. p. 2298-2303.

Zhang, H.C., Huang, L.X., Wang, C.P. y Mujumdar, A.S. 2010. Experimental and numerical investigation of spray-drying parameters on the dried powder properties of *Ginkgo biloba* seeds. *Drying Technology*, **28**(3):380-388.

Zuidam, N.J. y Shimoni, E. 2010. Overview of microencapsulates for use in food products or processes and methods to make them. En: Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing. Zuidam, N.J. y Nedovic, V.A (Editores). Springer. p. 3-20.