

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO  
DE QUESO FRESCO Y SUERO DE LECHE  
APLICANDO LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE  
DE RESPUESTA”.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
DOCTOR EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

*M. C. Alfredo Domínguez Niño*

DIRECTOR DE TESIS:

*Dra. Guadalupe Luna Solano*

CODIRECTOR DE TESIS:

*Dr. Isaac Andrade Gonzáles*





FECHA: 27/02/2018  
DEPENDENCIA: POSGRADO  
ASUNTO: Autorización de Impresión  
OPCIÓN: I

C. ALFREDO DOMINGUEZ NIÑO  
CANDIDATO A GRADO DE DOCTOR EN:  
CIENCIAS DE LA INGENIERIA

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:

"OPTIMIZACION DEL PROCESO DE SECADO DE QUESO FRESCO Y SUERO DE LECHE APLICANDO LA METODOLOGIA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA".

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

  
RUBÉN POSADA GÓMEZ

JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO

C.A. TITULACIÓN



SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA  
INSTITUTO  
TECNOLÓGICO  
DE ORIZABA

ggc



"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

FECHA : 19/01/2018

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

**C. RUBEN POSADA GOMEZ**  
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. :

**ALFREDO DOMINGUEZ NIÑO**

la cual lleva el título de:

**"OPTIMIZACION DEL PROCESO DE SECADO DE QUESO FRESCO Y SUERO DE LECHE  
APLICANDO LA METODOLOGIA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA".**







Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DRA. GUADALUPE LUNA SOLANO  
SECRETARIO : DR. ANDRADE GONZALES ISAAC  
PRIMER VOCAL : DR. GALO RAFAEL URREA GARCIA  
SEGUNDO VOCAL : DR. DENIS CANTU LOZANO  
TERCER VOCAL : DR. ALBERTO ALFONSO AGUILAR LASSERRE  
VOCAL SUP. : DR. JUAN MANUEL MENDEZ CONTRERAS

EGRESADO(A) DEL DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

OPCION: I Tesis

  
FIRMA  
  
FIRMA  
  
FIRMA  
  
FIRMA  
  
FIRMA  
  
FIRMA



## *Agradecimientos*

*Doctora Lupita son casi siete años que he tenido la oportunidad de convivir con usted tanto experiencias personales como profesionales. Muchas gracias por el 80 que me puso en la materia de programación cuando cursé el propedéutico para ingresar a la maestría, ya que de no haber sido así, ni la maestría hubiera hecho. Gracias porque aunque vio que no era bueno en programación, se dio cuenta que poseía otras cualidades las cuales usted me ayudó a descubrir. Ahora al final de esta etapa de doctorado le doy las gracias y me siento orgulloso de haber sido formado por usted y como alguna vez alguien dijo que somos el reflejo de nuestros asesores espero siempre reflejar la sencillez y el éxito que usted nos transmitió.*

*A mi comité revisor integrado por el Dr. Isaac Andrade González, Dr. Galo Rafael Urrea García, Dr. Denis Cantú Lozano, Dr. Alberto Aguilar Lasserre, Dr. Juan Manuel Méndez Contreras; les agradezco las aportaciones realizadas para la elaboración del trabajo de tesis que ayudaron significativamente al mejoramiento del trabajo de investigación.*

*Al Señor Juan Lara Por proporcionar la materia prima necesaria para el desarrollo del trabajo de tesis y por tener siempre la disposición para ayudar.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento del proyecto con el nombre de "Fortalecimiento del cuerpo académico en procesos alimentarios a través de la adquisición de equipos especializados de secado", con número de registro IFR3-2011-03. Además de la beca otorgada con número de registro 437294 para la obtención de grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería que se imparte en esta institución.*

## **DEDICATORIAS**

### ***A Dios***

*Por eso doblo mis rodillas ante el Padre, de quien toma nombre toda familia en el cielo y en la tierra, y conocer el amor de Cristo, que excede a todo conocimiento, para que os vayáis llenando hasta la total plenitud de Dios.*

*A Aquél que tiene poder para realizar todas las cosas incomparablemente mejor de lo que nosotros podemos pedir o pensar, conforme al poder que actúa en nosotros, a él la gloria en la iglesia y en Cristo Jesús por todas las generaciones y todos los tiempos. Amén.*

**Efesios 3, 14-21**

### ***A MIS PADRES***

*Ustedes son quienes hicieron de mí lo que ahora soy. Me han acompañado en todas las etapas de mi vida personal y profesional. Muchas gracias por apoyarme en todos los sentidos. Son los mejores padres que Dios me ha dado.*

### ***A MI ESPOSA***

*Diana te agradezco infinitamente por ser mi apoyo, por haber estado siempre a mi lado en todo momento, por confiar en mí y por ayudarme a alcanzar esta meta. Sabes que en cada artículo que logré publicar tú fuiste quién me acompañó paso a paso. Estoy seguro que vienen más triunfos y bendiciones que vamos a vivir juntos para siempre.*

### ***A MONSERRAT Y JOSÉ***

*Ustedes son la bendición más hermosa que Dios me ha dado, son quienes me impulsan cada día a buscar siempre más. Tengan siempre presente que en cada triunfo alcanzado ustedes fueron parte fundamental para lograrlos.*

### ***A MIS HERMANOS***

*Riquin, Anel y Víctor, gracias por haberme apoyado incondicionalmente en todos los sentidos durante todas las etapas de mi vida.*

### ***A BETITO Y KAREN***

*Mis sobrinos favoritos que hacían cada fin de semana divertido.*

### ***A MIS ABUELOS***

*Fidel, Carmen, Adolfo y Rosita les agradezco haber cuidado de mí en mi niñez, pero sobre todo les doy las gracias por haberme dado a unos padres maravillosos.*

### ***A MIS AMIGOS DEL LABORATORIO***

*Cinthia, Rosy, Alejandra, Josefina, Camilo, Calix, Alain, Paulina, Mario, Mariana, Tere, Yesica, Adriana, Bety, Yesenia, por haber creado el mejor ambiente de trabajo en el aula y en el laboratorio.*

### ***A MIS AMIGOS DE LA IGLESIA***

*Aris, Valentín, Dulce, José Luis, Rocío, Aldo. Con ustedes viví mi primer encuentro con Dios, y tantas aventuras incomparablemente mejor como Dios las sabe hacer.*

## *A MIS AMIGOS DEL LABORATORIO*

*Es difícil escribir estas palabras para quienes convivieron a mi lado tantos momentos divertidos que sin duda hicieron de la maestría y del doctorado la mejor etapa de mi vida. Lo que más me gustó fue que entre todos nos ayudábamos a salir juntos de cualquier proyecto que se nos presentara, empleamos nuestras habilidades para hacer de lo bueno algo mejor, las correcciones que nos hacíamos entre nosotros las tomábamos de la mejor manera y supimos ser humildes reconociendo cuales eran nuestras limitaciones. Todo trabajo en armonía rinde frutos, vivimos congresos nacionales e internacionales, logramos publicar artículos científicos en revistas indizadas, ganamos reconocimientos de las mejores ponencias y cuando algo no salía como lo esperábamos siempre le encontrábamos el lado positivo. El éxito de cualquiera de nosotros siempre lo tomamos como propio, siempre fue un gusto ver a nuestros amigos triunfar y alcanzar sus objetivos. Alejandra y Rosy, aunque les prometí una hoja en blanco (porque no tengo palabras para grandes seres humanos) les escribo estas pequeñas líneas, fue imposible no hacer clic con ustedes, su alegría y entusiasmo crearon un ambiente muy ameno en el laboratorio que se vio reflejado en todos los éxitos que logramos juntos, aunque ya no están con nosotros las recuerdo en cada una de las anécdotas que sin duda disfrutamos. Camilo, Calix y Alain tuve la fortuna de conocerlos desde su servicio social, son unas personas muy inteligentes y sencillas, gracias por alegrar cada mañana con sus pláticas y vivencias, les deseo éxito en todo lo que emprendan, estoy seguro que lo van a lograr. Mario, Mariana y Paulina, fue poco tiempo el que hemos convivido pero ha sido lo suficiente para disfrutarlo al máximo con ustedes, les deseo que alcancen todas las metas que se propongan, pero sobre todo que disfruten cada momento. Josecita cómo olvidar tus frases “no, cállate o súper cállate” que me hacían pasar momentos alegres pero “a muerte” jajaja. Tere, Adriana, Yesica y Bety, gracias por dejar bonito el laboratorio, por estar siempre disponibles y actuar con sencillez en todas las actividades, estoy seguro que vienen grandes éxitos para ustedes. Cinthia, gracias por tu amistad, apoyo, y por la competencia sana que creamos en el laboratorio la cual hizo que los primeros alumnos de doctorado de la Dra. Lupita dejaran índices de productividad elevados, esto lo digo con toda la humildad pero también con orgullo y satisfacción de haber logrado muchos éxitos con nuestra asesora. Antes de terminar, les pido disculpas si en algún momento les hice sentir mal por mis comentarios siguientes: a) ser el consentido de la doctora Lupita (aunque era cierto), b) autoproclamarme “el buen Alfred reconocido internacionalmente”, c) “ser el dueño de toda la mesa uno y de medio laboratorio de bioprocesos”. Muchas gracias amigos, los llevaré en mis recuerdos y aunque obtenga el grado de Doctor, para ustedes siempre seré el buen Alfred, su amigo. (Nos vemos el lunes). Jajajaja.*

## RESUMEN

**Domínguez-Niño Alfredo.** Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Instituto Tecnológico de Orizaba. Febrero 2018. **Optimización del proceso de secado de queso fresco y suero de leche empleando la metodología de superficie de respuesta.** Asesores: Dra. Guadalupe Luna Solano, Dr. Isaac Andrade González.

El suero de queso es el sub producto de la producción de queso o caseína, y es de gran importancia en la industria láctea debido al gran volumen producido y a su composición nutricional. La producción mundial de suero se estima en aproximadamente  $185 \times 10^6$  toneladas/año; de esta cantidad, sólo se procesan  $92.5 \times 10^6$  toneladas/año. Por otro lado, el queso fresco artesanal es elaborado a base de cuajo a partir de leche cruda de vaca en un proceso artesanal. El queso artesanal es frecuentemente salado y susceptible a cambios causados por enzimas y microorganismos de descomposición, generando alteraciones en el producto a nivel sensorial y nutricional. Por esta razón, el secado por aspersión y el secado por lecho fluidizado fueron empleados como alternativas eficaces para la conservación de alimentos perecederos. Los objetivos de este trabajo fueron optimizar los procesos de secado por aspersión y lecho fluidizado para obtener un producto deshidratado con propiedades deseables a un menor consumo de energía y costo de producción. La optimización fue realizada empleando la metodología de superficie de respuesta. Se utilizó un diseño central compuesto  $2^3+2(3)+1$  para establecer las condiciones de secado. Para el proceso de secado por aspersión, las variables independientes investigadas fueron la temperatura de aire de entrada (180-220 °C), temperatura del aire de salida (80 a 100 °C) y sílice y maltodextrina (DE-10) como material de pared a 2 y 5%, respectivamente. Los factores investigados para el secado por lecho fluidizado fueron tiempo de secado (60, 90 y 120 min), temperatura de aire de secado (50, 60 y 70 °C), y tamaño de partícula (0.5, 2 y 3.5 cm). La región factible fue

obtenida por superposición de contornos. Las condiciones óptimas para el secado por aspersión fueron temperatura de entrada de 180 °C, temperatura de aire de salida 84.91 °C y 2.91% de material de pared. Bajo estas condiciones, se obtuvieron 0.1008 kg/h de producto seco, con un contenido de humedad de 2.85% y actividad de agua de 0.239, y el costo fue de 19.7095 \$/kg de producto con un consumo de energía de 2.1274 kW·h/kg de producto seco. Las mejores condiciones para el secado por lecho fluidizado fueron tamaño de partícula de 1.7 cm, temperatura de secado de 55 °C y tiempo de secado de 72 min. Los resultados obtenidos para las condiciones óptimas fueron muy cercanos a los valores predichos para la optimización. Se obtuvo 0.047 kg/h de producto seco, con un contenido de humedad de 0.77% y actividad de agua de 0.36, y 6.66 log UFC de lactobacilos, con un contenido de proteína y cloruro de sodio de 30.79 y 2.46%, respectivamente.



## ABSTRACT

**Domínguez-Niño Alfredo.** Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Instituto Tecnológico de Orizaba. February 2018. **OPTIMIZATION OF DRYING PROCESS OF FRESH CHEESE AND CHEESE WHEY USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY.** Advisors: Guadalupe Luna Solano and Isaac Andrade Gonzalez.

Cheese-whey is the by-product of cheese or casein production, and it is of relative importance in the dairy industry due to the large volumes produced and its nutritional composition. Worldwide whey production is estimated at approximately  $185 \times 10^6$  tons/year; of this amount, only  $92.5 \times 10^6$  tons/year is processed. On the other hand, the artisanal fresh cheese is a rennet-set cheese made with raw cow's milk in an artisan process. Artisan Mexican fresh cheese is often salted and susceptible to changes caused by enzymes and spoilage microorganisms, generating alterations in the product at the sensory and nutritional level. For this reason, the spray drying and fluidized bed drying were employed as efficient alternatives to preserve perishable food. The aims of this work were to optimize the spray drying and fluidized bed drying processes in order to obtain a dehydrated product with desirable properties at a lower energy consumption and production cost. The optimization was made by using response surface methodology. A  $2^3$  rotatable central composite design was used to establish optimum drying conditions. For the spray drying process, the independent variables investigated were the inlet air temperature (180 to 220 °C), outlet air temperature (80 to 100 °C) and silica and maltodextrina (DE-10) as wall material at 2 and 5%, respectively. For the fluidized bed drying the factors investigated were the drying time (60, 90 and 120 min), drying air temperature (50, 60 and 70 °C), and particle size (0.5, 2 and 3.5 cm). By superimposing the contour plots was obtained the feasible region. The optimum spray drying conditions were the inlet air temperature of 180 °C, outlet air temperature of 84.91 °C and 2.91 % of wall material.

Under these conditions, 0.1008 kg/h of dried product was obtained, with a moisture content of 2.85% and water activity of 0.2390, and the product cost was \$ 19.7095 kg with an energy consumption of 2.1274 kW·h/kg of dry product. The best fluidized bed drying conditions were the particle size of 1.7 cm, drying temperature of 55 °C and drying time of 72 min. The results obtained for the optimum conditions were close to the predicted values obtained from the optimization. 0.047 kg/h of dried product was obtained, with a moisture content of 0.77% and water activity of 0.36, and the count of lactobacilli was 6.66 log CFU with protein and sodium chloride content of 30.79 and 2.46, respectively.

Esta tesis forma parte del proyecto global “Optimización del proceso de secado de queso fresco y suero de leche aplicando la metodología de superficie de respuesta” (ORZ-PYR-2015-0132), que se desarrolló en el Instituto Tecnológico de Orizaba durante el periodo de Enero-2014 a Enero-2018. Con la finalidad de que los resultados de esta investigación sean fuente de información para futuros trabajos, se enlistan las publicaciones y congresos derivados de este estudio.

## **PUBLICACIONES**

- 2018 A. Domínguez-Niño, D. Cantú-Lozano, I. Andrade-González, J.A. Ragazzo-Sánchez y G. Luna-Solano. Energy requirements and production cost of the spray drying process of cheese whey. *Drying Technology*. 36 (5) 597-608
- 2016 A. Domínguez-Niño, A.N. Buendía-González, D. Cantú-Lozano, I. Andrade-González y G. Luna-Solano. Efecto del secado por lecho fluidizado sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas de queso fresco mexicano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 15 (3) 869-881

## **PRESENTACIÓN EN CONGRESOS**

- 2017 Aplicación del proceso de secado en alimentos lácteos. I Foro Estudiantil de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Orizaba, Veracruz, México.
- 2017 Evaluación de las características fisicoquímicas de queso jarocho deshidratado durante su almacenamiento. Coloquio de Investigación Multidisciplinaria. Orizaba, Veracruz, México.
- 2016 Effect of fluidized bed drying on physicochemical and microbiological properties of Mexican fresh cheese. Attended in IFT16. Chicago, Illinois, USA.
- 2016 Efecto del almacenamiento sobre las características fisicoquímicas de queso jarocho deshidratado. I. Encuentro de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería. Tuxtepec, Oaxaca, México.
- 2016 Optimización del proceso de secado por aspersion de suero de queso empleando la metodología de superficie de respuesta. I. Encuentro de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería. Tuxtepec, Oaxaca, México.
- 2015 Energy requirements and production cost of spray drying of milk serum. Attended in 29<sup>th</sup> EFFoST International Conference. Athens, Greece.
- 2015 Efecto de las variables del proceso de secado por lecho fluidizado sobre el queso

fresco. Coloquio de Investigación Multidisciplinaria. Orizaba, Veracruz, México

2015 Spray drying process of milk serum. Jornadas de Actualización en Investigación y Desarrollo de Alimentos. Veracruz, Veracruz, México

# CONTENIDO

	Página
RESUMEN	i
LISTA DE TABLAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	4
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	5
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	5
<b>1. SINTESIS BIBLIOGRÁFICA</b>	6
1.1. Leche	7
1.1.1. Caseína	9
1.1.2. Seroproteínas	10
1.2. Queso	13
1.3. Suero de leche	14
1.4. Secado	16
1.4.1. Descripción del proceso de secado por aspersión	18
1.4.2. Descripción del proceso de secado por lecho fluidizado	19
1.5. Material aditivo	21
1.6. Optimización	24
1.7. Superposición de contornos	26
1.8. Síntesis de antecedentes	27
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	30
2.1. Metodología general	31
2.2. Materia prima	34
2.3. Acondicionamiento de la muestra	34
2.4. Descripción del secador por aspersión	35
2.5. Descripción del secador por lecho fluidizado	36
2.6. Secado por aspersión de suero de leche	37
2.6.1. Diseño de experimentos	37
2.7. Secado por lecho fluidizado de queso fresco	38
2.7.1. Diseño de experimentos	39
2.8. Análisis microbiológicos	40
2.8.1. Bacterias aerobias mesofílicas	40
2.8.2. Determinación de coliformes totales	41

2.8.3. Determinación de lactobacilos	41
2.8.4. Determinación de hongos y levaduras	41
2.9. Análisis fisicoquímicos	42
2.9.1. Humedad	42
2.9.2. Actividad de agua	42
2.9.3. Color	42
2.9.4. Grasa	43
2.9.5. Proteínas	43
2.9.6. Densidad	43
2.9.7. pH	44
2.10. Almacenamiento de queso deshidratado	44
2.10.1. Diseño experimental	45
2.10.2. Empaque de queso deshidratado	45
2.11. Medición del consumo de energía durante el proceso de secado por aspersión y secado por lecho fluidizado	45
2.12. Cálculo de la producción de suero de leche en polvo y queso deshidratado	46
2.13. Cálculo del costo	46
2.14. Cálculo del rendimiento	47
2.15. Optimización del proceso de secado por aspersión de suero de leche y secado por lecho fluidizado de queso fresco	48
2.16. Validación de los puntos óptimos	49

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN** 50

#### **PARTE I. Resultados experimentales del proceso de secado por aspersión de suero de leche** 52

3.1. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de suero de leche	52
3.2. Humedad, actividad de agua y rendimiento del suero de leche	54
3.3. Diferencia de color ( $\Delta E$ )	55
3.4. Consumo de energía, producción y costo del suero de leche	59
3.5. Contenido de proteínas	60
3.6. Superficie de respuesta	61
3.6.1. Humedad	62
3.6.2. Actividad de agua	64
3.6.3. Diferencia de color	65
3.6.4. Energía	67
3.6.5. Producción	69
3.6.6. Costo	70
3.6.7. Proteínas	72
3.7. Gráficas de contorno	74
3.7.1. Humedad	74
3.7.2. Actividad de agua	75

3.7.3. Rendimiento	77
3.7.4. Diferencia de color	78
3.7.5. Energía	79
3.7.6. Producción	81
3.7.7. Costo	82
3.7.8. Proteínas	83
3.8. Gráficas de superposición de contornos	85
3.9. Validación de las condiciones óptimas del proceso de secado por aspersión de suero de leche	88
<b>PARTE II. Resultados experimentales del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco</b>	<b>91</b>
3.10. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de queso fresco	91
3.11. Humedad, actividad de agua y diferencia de color	93
3.12. Proteínas, cloruro de sodio, grasa y viabilidad	95
3.13. Energía, producción y costo	97
3.14. Superficie de respuesta	98
3.14.1. Humedad	98
3.14.2. Actividad de agua	100
3.14.3. Diferencia de color	102
3.14.4. Proteínas	104
3.14.5. Cloruro de sodio	105
3.14.6. Grasa	107
3.14.7. Viabilidad	108
3.14.8. Energía	110
3.14.9. Producción	112
3.14.10. Costo	113
3.15. Gráficos de contornos	115
3.15.1. Humedad	115
3.15.2. Actividad de agua	116
3.15.3. Diferencia de color	118
3.15.4. Cloruro de sodio	119
3.15.5. Grasa	120
3.15.6. Viabilidad	122
3.15.7. Proteínas	123
3.15.8. Energía	124
3.15.9. Producción	126
3.15.10. Costo	127
3.16. Gráficas de superposición de contornos	128
3.17. Validación de las condiciones óptimas del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco	132
3.18. Almacenamiento de queso deshidratado	133
3.18.1. Contenido de humedad	134
3.18.2. Actividad de agua	137

3.18.3. Diferencia de color	139
3.18.4. Contenido de proteínas, cloruro de sodio y grasa	141
3.18.5. Análisis microbiológicos	143
<b>CONCLUSIONES</b>	145
<b>REFERENCIAS</b>	148



# LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
<b>1.1</b>	Composición química de la leche de vaca	8
<b>1.2</b>	Composición del suero de leche	15
<b>2.1</b>	Factores y niveles evaluados en el proceso de secado por aspersión de suero de leche	37
<b>2.2</b>	Corridas experimentales del proceso de secado por aspersión de suero de leche	38
<b>2.3</b>	Factores evaluados en el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco	39
<b>2.4</b>	Corridas experimentales del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco	40
<b>3.1</b>	Caracterización fisicoquímica y microbiológica de suero de leche	52
<b>3.2</b>	Valores experimentales para la variable de respuesta humedad, $a_w$ y rendimiento	55
<b>3.3</b>	Valores experimentales para la variable de respuesta $\Delta E$	57
<b>3.4</b>	Valores experimentales para la variable de respuesta consumo de energía, producción y costo	59
<b>3.5</b>	Valores experimentales para la variable de respuesta proteínas	61
<b>3.6</b>	Puntos óptimos de operación	85
<b>3.7</b>	Respuestas óptimas del proceso de secado por aspersión de suero de leche	88
<b>3.8</b>	Resultados de la validación experimental del proceso de secado por aspersión de suero de leche	89
<b>3.9</b>	Caracterización fisicoquímica y microbiológica de queso fresco	91
<b>3.10</b>	Resultados experimentales de humedad, actividad de agua y diferencia de color de queso deshidratado por lecho fluidizado	93
<b>3.11</b>	Resultados experimentales de proteínas, cloruro de sodio, grasa y viabilidad del queso deshidratado por lecho fluidizado	95
<b>3.12</b>	Resultados experimentales de energía, producción y costo de queso deshidratado por lecho fluidizado	97
<b>3.13</b>	Puntos óptimos de operación	129
<b>3.14</b>	Respuestas óptimas del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco	133
<b>3.15</b>	Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del queso deshidratado al final del periodo de almacenamiento	142

# LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Fraccionamiento de las proteínas de la leche	10
1.2	Secador por aspersion de ciclo abierto	19
1.3	Secador por lecho fluidizado Retsch TG-200	21
2.1	Metodología general para el proceso de secado por aspersion del suero de leche	32
2.2	Metodología general para el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco	33
2.3	Queso fresco y suero de leche	34
2.4	Cortes de queso fresco: a) 0.5, b) 2, y c) 3.5 cm	34
2.5	Soluciones de suero de leche: a) 2% sílica, y b) 5% maltodextrina	35
2.6	Mini spray dryer B-290	36
2.7	Secador por lecho fluidizado Retsch TG-200	36
3.1	Suero de leche y diagrama de Hunter $L, a, b$	53
3.2	Muestras de suero de leche deshidratado	58
3.3	Superficie de respuesta de humedad como una función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	62
3.4	Superficie de respuesta de $a_w$ como una función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	64
3.5	Superficie de respuesta de $\Delta E$ como una función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	66
3.6	Superficie de respuesta de energía como una función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	68
3.7	Superficie de respuesta de producción como una función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	69
3.8	Superficie de respuesta de costo como una función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	71
3.9	Superficie de respuesta de contenido de proteínas como una función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	73
3.10	Gráficas de contornos del contenido de humedad en función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	75
3.11	Gráficas de contornos de actividad de agua en función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	76
3.12	Gráficas de contornos de rendimiento en función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	78
3.13	Gráficas de contornos de diferencia de color en función de	79

	$T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	
<b>3.14</b>	Gráficas de contornos de energía en función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	80
<b>3.15</b>	Gráficas de contornos de producción en función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	82
<b>3.16</b>	Gráficas de contornos de costo en función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	83
<b>3.17</b>	Gráficas de contornos de proteínas en función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	84
<b>3.18</b>	Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función de $T_{\gamma 0}$ , $T_{\gamma s}$ y material de soporte	87
<b>3.19</b>	Suero de leche y diagrama de Hunter $L$ , $a$ , $b$	92
<b>3.20</b>	Muestras de queso deshidratado por lecho fluidizado	94
<b>3.21</b>	Superficie de respuesta de humedad como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado	98
<b>3.22</b>	Superficie de respuesta de actividad de agua como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado	101
<b>3.23</b>	Superficie de respuesta de diferencia de color como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado	102
<b>3.24</b>	Superficie de respuesta de proteínas como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado	104
<b>3.25</b>	Superficie de respuesta de cloruro de sodio como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado	106
<b>3.26</b>	Superficie de respuesta de contenido de grasa como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado	107
<b>3.27</b>	Superficie de respuesta de viabilidad como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado	109
<b>3.28</b>	Superficie de respuesta de energía como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado	110
<b>3.29</b>	Superficie de respuesta de producción como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado	112
<b>3.30</b>	Superficie de respuesta de costo como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado	114
<b>3.31</b>	Gráficas de contornos de humedad en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado	116
<b>3.32</b>	Gráficas de contornos de actividad de agua en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado	117
<b>3.33</b>	Gráficas de contornos de actividad de agua en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado	119
<b>3.34</b>	Gráficas de contornos de cloruro de sodio en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado	120
<b>3.35</b>	Gráficas de contornos de contenido de grasa en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado	121

<b>3.36</b>	Gráficas de contornos de viabilidad en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado	123
<b>3.37</b>	Gráficas de contornos de proteínas en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado	124
<b>3.38</b>	Gráficas de contornos de energía en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado	125
<b>3.39</b>	Gráficas de contornos de producción en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado	127
<b>3.40</b>	Gráficas de contornos de costo en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado	128
<b>3.41</b>	Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado	130
<b>3.42</b>	Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado	131
<b>3.43</b>	Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado	131
<b>3.44</b>	Evolución del contenido de humedad del queso deshidratado en función del tiempo de almacenamiento: a) bolsa de polietileno (aire), b) bolsa de polietileno (vacío), c) bolsa de aluminio (aire) y bolsa de aluminio (vacío)	136
<b>3.45</b>	Evolución del contenido de actividad de agua del queso deshidratado en función del tiempo de almacenamiento: a) bolsa de polietileno (aire), b) bolsa de polietileno (vacío), c) bolsa de aluminio (aire) y bolsa de aluminio (vacío)	138
<b>3.46</b>	Evolución de la diferencia de color del queso deshidratado en función del tiempo de almacenamiento: a) bolsa de polietileno (aire), b) bolsa de polietileno (vacío), c) bolsa de aluminio (aire) y bolsa de aluminio (vacío)	140

---

## INTRODUCCIÓN

El suero de leche es el subproducto de la producción de queso o caseína, y es de gran importancia en la industria láctea debido a los grandes volúmenes producidos y a su composición nutricional. A nivel mundial la producción de suero de leche estimada es de  $185 \times 10^6$  toneladas/año; de esta cantidad, sólo  $92.5 \times 10^6$  toneladas/año es procesada, lo que representa el 50% que es tratada y transformada en diversos productos alimenticios. Aproximadamente la mitad de esta cantidad es utilizada directamente en su forma líquida, 30% en forma deshidratada, 15% como lactosa y subproductos, y el resto es utilizada como concentrados de suero de leche (Spalatelu, 2012). Las proteínas del suero de leche corresponden aproximadamente del 18-20% (g/v) del total de las proteínas de la leche. Los mayores componentes entre las proteínas del suero de leche son  $\beta$ -lactoalbúmina,  $\alpha$ -lactoalbúmina, albúmina, e inmunoglobulinas, representando el 50, 20, 10, y 10% (g/v) de la fracción de suero, respectivamente (Badui, 2006; Anandharamakrishnan *et al.* 2007). Por esta razón, las proteínas del suero de leche son utilizadas como suplemento, en forma deshidratada, en aditivos para panadería, cereales, bebidas, sopas, etc. Las proteínas del suero de leche tienen el mayor valor nutritivo (1.0), el cual es un indicador de su capacidad para proveer al cuerpo la mayoría de los aminoácidos esenciales (Anandharamakrishnan *et al.* 2007). Por todo lo anterior, el suero de leche puede ser utilizado como una fuente económica de proteínas de alta calidad con muchas otras propiedades promotoras de salud. El secado por aspersión es un método bien establecido para convertir alimentos líquidos en productos en polvo. Durante el proceso de secado por aspersión, el alimento líquido primero es atomizado, y al entrar en contacto con aire caliente, la evaporación tiene lugar para producir partículas secas, las cuales son separadas de la corriente de aire por una variedad de métodos (Anandharamakrishnan *et al.* 2007; Luna-Solano *et al.* 2005). Actualmente, la fabricación industrial de productos deshidratados, es realizada casi exclusivamente por liofilización, lo que resulta en bajos rendimientos, y demanda de tiempo y energía (Páez *et al.* 2013). El secado por aspersión no solamente tiene ventaja sobre la liofilización en términos de costo sino también es un método atractivo para prolongar la vida de anaquel de los alimentos y la continua producción en cortos periodos de tiempo. Se han realizado muchos estudios para el secado por aspersión de

---

proteínas incluyendo, proteínas de suero, proteínas de leche, proteínas de carne de pollo (Anandharamakrishnan *et al.* 2010; Kurozawa *et al.* 2011; Taneja *et al.* 2015). Sin embargo, el efecto de las variables de proceso sobre la producción del suero de leche deshidratado ha sido pasado por alto. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue estudiar la influencia de las condiciones del proceso de secado por aspersion sobre la energía requerida, costo de producción y características fisicoquímicas del suero de leche y optimizar dicho proceso para obtener un producto deshidratado a un bajo costo de producción.

El queso fresco es el producto obtenido por la coagulación de la caseína de la leche con cuajo, gérmenes lácticos o enzimas apropiadas. Mediante este proceso se logra preservar el valor nutritivo de la mayoría de los componentes de la leche, incluidos las grasas, proteínas y constituyentes menores, generando un sabor especial y una consistencia sólida o semisólida en el producto obtenido (Ramírez-López *et al.* 2012). El queso es uno de los principales productos agrícolas del mundo, de acuerdo con la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) se produce anualmente 20, 220 000 toneladas; siendo Estados Unidos el mayor productor de queso con 5, 093 000 toneladas, seguido por Alemania y Egipto con 2, 029 000 y 664, 000 toneladas. En América Latina y el Caribe, México ocupa la segunda posición en la producción anual de queso con 154 000 toneladas, de las cuales 56 095 toneladas corresponden a la producción de queso fresco (FAO, 2013). Los quesos frescos son los más reconocidos dentro de los quesos latinoamericanos y los más probados por los consumidores (Hnosko *et al.* 2009). Sin embargo, los quesos frescos tienen corta vida de anaquel debido a su pH, cercano a la neutralidad, alta actividad de agua y bajo contenido de sal. Generalmente, la vida de anaquel de un queso fresco bajo refrigeración es de siete días (Del Caro *et al.* 2012; Faccia *et al.* 2012). El secado convectivo es una de las operaciones más empleadas para la deshidratación de alimentos. Se han realizado muchas investigaciones sobre diferentes métodos de secado tales como secado por lecho fluidizado, secado por charolas, liofilización, secado de tambor, y deshidratación osmótica (Villegas-Santiago *et al.* 2011). Como regla, la liofilización genera productos alimenticios de mayor calidad que cualquier otro método de secado. La liofilización de alimentos y materiales biológicos también tiene la ventaja de mínimas pérdidas de sabor y aroma. Sin embargo, la liofilización es un método

---

costoso para la deshidratación de alimentos debido a que la velocidad de secado es lenta y al uso de vacío (Liapis y Brutini, 2014). El secado por aspersion no solamente tiene ventajas de costo sobre la liofilización como una herramienta tecnológica para extender la vida útil de los alimentos, sino también permite la producción continua de grandes cantidades de producto seco en periodos cortos de tiempo. Sin embargo, el secado por aspersion también presenta limitaciones tales como los costos de instalación y las incrustaciones del producto en la cámara de secado (Páez *et al.* 2012), además siendo aplicado en alimentos líquidos no es factible emplearlo para deshidratar alimentos sólidos como el queso fresco. Por esta razón, el secado por lecho fluidizado es una alternativa para la preservación de los alimentos mediante la reducción del contenido de humedad por efecto de la temperatura. Comúnmente reconocido por sus ventajas el secado por lecho fluidizado, incluye una tasa alta de remoción de humedad, alta eficiencia térmica, fácil transporte de material dentro del secador y bajos costos de mantenimiento (Law y Mujumdar, 2014). Se han desarrollado muchos trabajos sobre las condiciones de secado de diferentes vegetales como semillas de pimienta, arroz, trigo, grosella, mango, papa, brócoli (Kozanoglu *et al.* 2012; Tuyen *et al.* 2009; Vázquez-Chávez y Vizcarra-Mendoza, 2008; Murthy y Joshi, 2007; Villegas-Santiago *et al.* 2011; Lozano-Acevedo *et al.* 2011; Reyes *et al.* 2012). Sin embargo, no se han encontrado reportes directamente relacionados con el estudio sobre la deshidratación de queso fresco por lecho fluidizado. En este contexto, el objetivo del presente trabajo es estudiar el efecto del proceso de secado por lecho fluidizado sobre las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del queso fresco y optimizar dicho proceso para obtener queso deshidratado a bajo costo de producción

---

## **JUSTIFICACIÓN**

Los quesos frescos son productos altamente perecederos debido a que su contenido de humedad es elevado, no tienen técnicas de conservación y están expuestos al medio ambiente y transporte; por estas causas pueden desarrollar alteraciones microbiológicas que afectan la calidad del producto. Por lo tanto, su periodo de vida es corto y debe ser consumido en poco tiempo. Por otro lado, el suero de leche producido durante el proceso de fabricación de queso es de gran importancia debido a su composición nutricional y a los altos volúmenes generados; sin embargo, gran parte del volumen generado es desechado a drenajes y suelos. Por todo lo anterior, el proceso de secado es presentado como una alternativa para la preservación de estos productos perecederos por naturaleza. Durante la deshidratación el contenido de humedad es reducido significativamente con el objetivo de lograr estabilidad en el producto deshidratado.



---

## **OBJETIVO GENERAL**

Optimizar el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco y secado por aspersión de suero de leche, para obtener un producto deshidratado de bajo costo de producción.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar microbiológicamente y fisicoquímicamente el queso fresco y el suero de leche.
- Establecer las condiciones del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco y secado por aspersión del suero de leche.
- Relacionar matemáticamente con un modelo empírico las características fisicoquímicas del queso fresco y suero de leche con las variables del proceso de secado por lecho fluidizado y secado por aspersión.
- Determinar y validar los valores óptimos de las condiciones de operación que maximicen la producción y minimicen el costo del proceso de secado por lecho fluidizado y secado por aspersión de suero de leche.
- Evaluar el efecto del almacenamiento del queso deshidratado sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas.

---

# **CAPÍTULO I**

## **SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA**

## I. SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA

### 1.1. Leche

Debido a su alto valor nutritivo, las leches en general, representan el alimento más balanceado y apropiado para las crías. Además de proporcionar prácticamente todos los nutrientes necesarios, también contienen diferentes sustancias que actúan como parte fundamental de los sistemas inmunológico y de protección de un recién nacido (Badui, 2006). La leche está constituida de proteínas (caseínas y proteínas del suero de queso), lípidos, lactosa, minerales (solubles e insolubles), componentes minoritarios (enzimas, aminoácidos libres, péptidos) y agua (Tabla 1.1). La fracción de caseína coexiste con los minerales insolubles como un complejo de fosfato-caseína de calcio. El agua y sus constituyentes solubles (lactosa, proteínas nativas del suero, algunos minerales, ácido cítrico y componentes minoritarios) son referidos como suero. Durante la fabricación de queso, la leche está sujeta a una deshidratación parcial, que involucra una expulsión controlada de suero y concentración de grasa, caseínas y algunos de los minerales. Aunque el procedimiento de elaboración de muchos tipos de queso ya está definido, se pueden presentar variaciones en la calidad del queso debido al tratamiento que se realice en la leche, además de la variación de la composición y calidad de la leche generada por las estaciones del año (Guinee y O'Brien 2010).

**Tabla 1.1** Composición característica de la leche de vaca

Característica	Media	Rango
Materia seca (g 100 g <sup>-1</sup> )	12.04	11.52-12.44
Grasa (g 100 g <sup>-1</sup> )	3.55	3.24-3.90
Lactosa (g 100 g <sup>-1</sup> )	4.42	4.21-4.56
Proteínas totales (g 100 g <sup>-1</sup> )	3.25	2.99-3.71
Caseína (g 100 g <sup>-1</sup> )	2.51	2.29-2.93
Proteína de suero (g 100 g <sup>-1</sup> )	0.54	0.48-0.64
Urea (mg 100 g <sup>-1</sup> )	27.60	22.00-37.50
Ceniza (g 100 g <sup>-1</sup> )	0.74	0.71-0.77
Calcio (mg 100 g <sup>-1</sup> )	118	108-137
Hierro (mg 100 g <sup>-1</sup> )	976	460-1490
Magnesio (mg 100 g <sup>-1</sup> )	107	96-117
Calcio (mg 100 mL <sup>-1</sup> )	118	108-137
B-Caroteno (µg g <sup>-1</sup> grasa)	3.18	0.48-8.37
Tiamina (µg mL <sup>-1</sup> )	0.18	0.009-0.35
Vitamina A (µg g <sup>-1</sup> grasa)	9.41	2.18-27.85
Vitamina E (µg g <sup>-1</sup> grasa)	25.56	6.84-42.15

Las proteínas de la leche han sido divididas en dos grandes grupos, de acuerdo con su estado de dispersión: las caseínas que representan 80% del total, y las proteínas del suero o seroproteínas, con el 20% restante. Debido a que las caseínas y las proteínas están

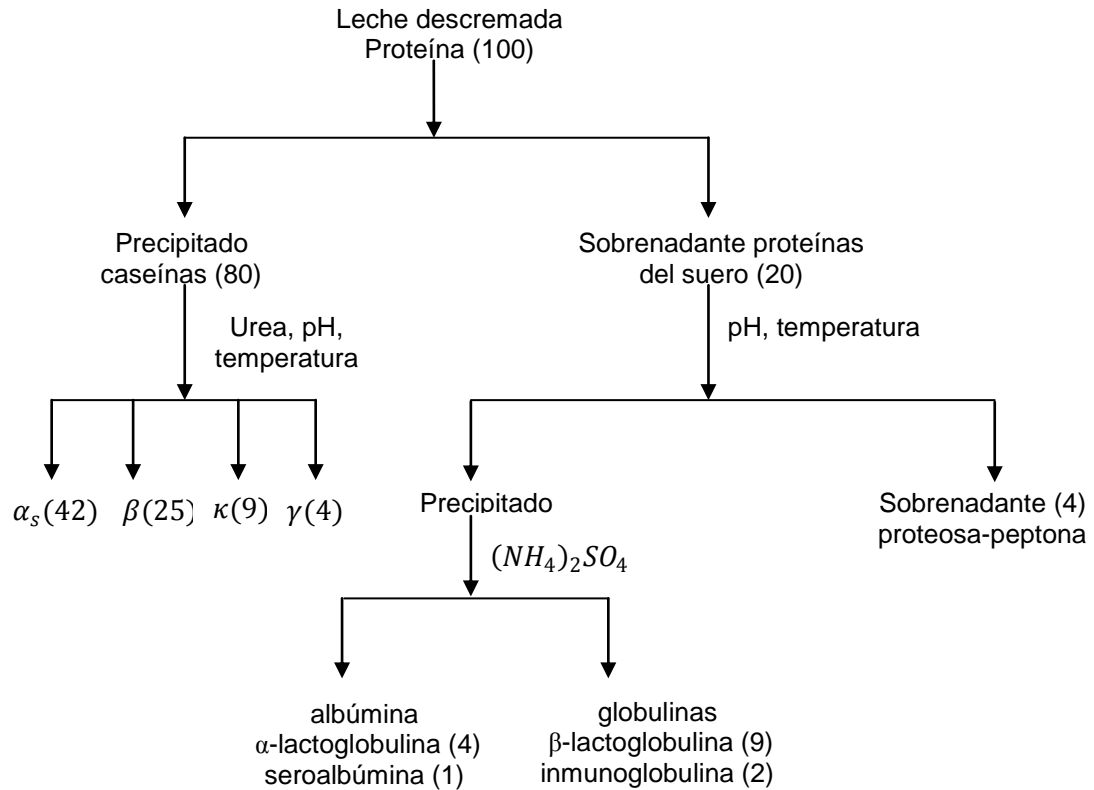
estabilizadas por diferentes mecanismos en el seno de la leche, es sencillo separarlas mediante la manipulación de parámetros como pH, temperatura y fuerza iónica, y con el uso de sustancias, como la urea. Un método para fraccionarlas consiste en la precipitación de las caseínas a pH 4.6 (que corresponde al punto isoelectrico), donde quedan como sobrenadante las proteínas del suero (Badui, 2006).

### 1.1.1 Caseína

La fracción nitrogenada de la leche de vaca consta de caseína, proteínas de suero y nitrógeno no proteico (urea, proteosa peptona, péptidos) a niveles de 78, 18 y 4 g 100 g<sup>-1</sup>, respectivamente del nitrógeno total. La caseína es heterogénea, compuesta de cuatro tipos principales:  $\alpha_{s1}$ ,  $\alpha_s$ ,  $\beta$  y  $\kappa$ , la cual representa el 38, 10, 35 y 15 g 100 g<sup>-1</sup> del total de la caseína, respectivamente (Guinee y O'Brien 2010).

Las caseínas (del latín *caseus*, queso) son por definición las fosfo glucoproteínas que precipitan de la leche descremada a pH 4.6 y 20°C, es decir, son proteínas que contienen tanto residuos de hidratos de carbono como de fosfatos; estos últimos generalmente esterifican a los hidroxilos de las serinas. Su estabilidad en el seno de la leche se debe a su fuerte carga eléctrica negativa, que cuando se neutraliza en el punto isoelectrico, las hace inestables. Su contenido de nitrógeno es aproximadamente de 15.6%, excepto en el caso de la fracción  $\kappa$  que es de 14.3%, ya que contiene una mayor cantidad de hidratos de carbono (Badui, 2006). Prácticamente todas las moléculas de caseína están asociadas entre sí integrando las miscelas, pero existe una pequeña cantidad que se encuentra en solución. Como se observa en la Figura 1.1, existen cuatro fracciones principales que se diferencian por su movilidad electroforética:

$\alpha_s$ ,  $\beta$ ,  $\kappa$  y  $\gamma$ . A su vez, la  $\alpha_s$  está constituida por cuatro componentes (los dos primeros son los principales)  $\alpha_{s1}$ ,  $\alpha_{s2}$ ,  $\alpha_{s3}$  y  $\alpha_{s4}$  y la  $\gamma$  por  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$  (Badui, 2006).



**Figura 1.1** Fraccionamiento de las proteínas de la leche; los números entre paréntesis representan el porcentaje del total de proteínas.

### 1.1.2 Seroproteínas

A diferencia de las caseínas, las proteínas del suero son compactas, globulares, con un peso molecular que varía entre 14,000 y 1, 000,000 daltones, y son solubles en un intervalo de pH muy amplio (incluso a pH ácidos, siempre y cuando no se hayan desnaturalizado por el calor). En estado natural no se asocian con las caseínas, pero en las leches tratadas térmicamente y homogeneizadas, hay una fracción que sí lo hace.

Las proteínas del suero constan por lo menos de ocho fracciones diferentes, entre las cuales destacan la  $\beta$ -lactoglobulina, la  $\alpha$ -lactoalbúmina, las inmunoglobulinas, la albúmina bovina y las proteosa peptonas (Figura 1.1). En general, son muy sensibles a las temperaturas altas y en menor grado al pH ácido (situación contraria a lo que sucede con las caseínas), debido a que están muy hidratadas y no tienen tanta carga eléctrica externa; son las primeras proteínas de la leche en desnaturalizarse y su calentamiento libera grupos sulfhidrilo que reducen el potencial de oxidación- reducción, lo que llega a inhibir parcialmente las reacciones de oxidación. Contienen la mayoría de los aminoácidos y presentan un mejor balance de éstos que las propias caseínas, por lo que su valor nutritivo es superior.

La  $\beta$ -lactoglobulina es insoluble en agua destilada, soluble en soluciones diluidas de sales, se desnaturaliza y precipita a menos de 73°C por la acción de soluciones al 50% de sulfatos de magnesio o de amonio; es la fracción proteínica que se ha estudiado con más detalle y que ejerce una influencia decisiva en la estabilidad térmica de los productos lácteos. Suma aproximadamente 45% del total de las proteínas del suero y existe como dímero (pm 36,520) unido no covalentemente, en el pH normal de la leche; los cambios de pH provocan que se convierta en dos monómeros mediante una reacción reversible. Al igual que con otras proteínas globulares, sus aminoácidos hidrófilos y los ionizables se encuentran distribuidos de manera homogénea provocando que los apolares (tirosina, triptófano, leucina, fenilalanina, etc.), establezcan una alta hidrofobicidad en el centro de la molécula; esta característica hace que se hidrate fuertemente en el exterior y que no se puedan unir entre ellas en forma hidrófoba. Sus grupos disulfuro le imparten características de estructura terciaria, y el

sulfhidrilo libre la hace muy reactiva; de hecho, es la fuente más importante de -SH de la leche.

La  $\beta$ -lactoglobulina no se encuentra en la leche materna y se considera como responsable de algunas reacciones alérgicas que se observan en infantes alimentados con leche de vaca. Por esta razón existen productos comerciales que imitan la leche humana con base en el suero de leche al que se le ha eliminado esta fracción proteínica mediante una precipitación selectiva con polifosfatos o por filtración en gel, para después mezclarla con caseína, aceite de soya, minerales, vitaminas, lisozima y otros ingredientes.

La  $\alpha$ -lactoalbumina es, por orden de importancia, la segunda proteína del suero, y tiene actividad biológica, ya que es parte constitutiva del sistema enzimático requerido para la síntesis de la lactosa. De hecho, las leches de algunos animales que no presentan esta proteína tampoco contienen lactosa. No tiene grupos sulfhidrilo libres, pero sí cuatro disulfuros provenientes de cistinas, lo que la hace tener 2.5 veces más azufre que las caseínas.

Por su parte, las inmunoglobulinas suman el 10% de todas las proteínas del suero, provienen de la sangre del animal, constan de moléculas de glucoproteínas con un alto contenido de grupos azufrados y con una actividad biológica de anticuerpo.

Las proteosa peptonas están compuestas por un grupo heterogéneo de fosfoglicoproteínas provenientes de la hidrólisis de la caseína  $\beta$  por la acción de la plasmina. La albúmina bovina es la misma que la del suero sanguíneo, sirve de transporte de ácidos grasos, contiene un alto número de cistina (17 por mol) y un grupo sulfhidrilo libre, y es fácilmente desnaturizable incluso a bajas temperaturas (Badui, 2006).



## 1.2 Queso

Los quesos son productos elaborados con la cuajada de leche de vaca o de otras especies de animales, obtenida por la coagulación de la caseína con cuajo, gérmenes lácticos, enzimas apropiadas, ácidos orgánicos comestibles, dando lugar a las diferentes variedades de queso (NOM-121-SSA1-1994). Mediante este proceso se logra preservar el valor nutritivo de la mayoría de los componentes de la leche, incluidos las grasas, proteínas y constituyentes menores, generando un sabor especial y una consistencia sólida o semisólida en el producto obtenido (Ramírez-López *et al.* 2012). El queso es uno de los principales productos agrícolas del mundo, según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) se producen anualmente 20, 222 000 toneladas, siendo Estados Unidos el mayor productor de queso con 5, 093, 000 toneladas seguido por Alemania y Egipto con 2, 029 000 y 644,000 toneladas respectivamente. En América Latina y el Caribe, México ocupa la segunda posición en la producción anual de queso con 154, 000 toneladas (FAO 2013), de las cuales 56,095 toneladas corresponden a la producción de queso fresco (SIAP 2013). Los quesos Latinoamericanos, también conocidos como quesos de estilo hispano, son una categoría de quesos desarrollados en México. Estos quesos son elaborados tradicionalmente de leche cruda, son frecuentemente salados y considerados una rica fuente de nutrientes esenciales, en particular; proteínas, aminoácidos, grasa, vitaminas y minerales; por esta razón, la vida útil de estos quesos es muy corta debido a los cambios físicos, químicos y bioquímicos determinados por enzimas y microorganismos deteriorativos, como consecuencia de cada cambio, pueden presentarse varias alteraciones a nivel sensorial y nutricional, disminuyendo su valor comercial. Los quesos pueden ser clasificados como suaves, semiduros y duros basados en el

contenido humedad (Hnosko *et al.* 2011; Farkye, 2004; Walther, *et al.* 2008). Los quesos clasificados como suaves constituyen la mayoría de los quesos latinoamericanos y poseen alto contenido de humedad, incluyendo dentro de esta clasificación a los quesos frescos, los cuales presentan un contenido de humedad de 41-59%, 17-21% de proteínas, 18-29% de grasa, 1-3% de sal y un pH de 5.3-6.5 (Hnosko *et al.* 2009). Es evidente que el crecimiento de bacterias patógenas en los quesos depende de condiciones como humedad,  $a_w$ , pH, contenido de sal y temperatura de maduración (Bintsis y Papademas, 2002; Hnosko *et al.* 2009). El uso de agua de grifo, suero de leche y salmuera mantiene una textura suave en el queso; sin embargo, la inmersión de los quesos en estas sustancias, puede incrementar la carga microbiana y turbidez durante el almacenamiento, por esta razón la vida de anaquel del producto bajo soluciones de sal es muy corta, aproximadamente de 5 a 7 días (Faccia *et al.* 2012). Algunos investigadores han propuesto el proceso de secado para asegurar la estabilidad de estos productos mediante la reducción del contenido de humedad y actividad de agua (Towler, 1987; Lozano-Acevedo, *et al.* 2011; Ghandi *et al.* 2012; Erbay *et al.* 2015).

### **1.3 Suero de leche**

Existen principalmente 2 tipos de suero: el suero “dulce” y el suero “ácido”. El suero dulce, se genera al elaborar el queso mediante el uso de enzimas proteolíticas o “cuajo”, las cuales actúan sobre las caseínas de la leche y las “cortan” o “rompen”, haciendo que estas se desestabilicen y precipiten, todo esto bajo condiciones específicas de temperatura (15 °C a 50 °C), pH levemente ácido (5.9-6.6) producto de la incorporación de cultivos lácteos y iones calcio. La principal enzima utilizada para realizar esto, es la quimosina o renina. Esta enzima es propia del aparato digestivo de los rumiantes, por eso, antiguamente esta enzima se obtenía

a partir del estómago de estos animales. Actualmente, la quimosina es producida a partir de síntesis bioquímica evitando usar el estómago de terneros como materia prima. Por otro lado, el suero de leche ácido se genera mediante la precipitación ácida de la caseína, utilizando ácido acético, esta precipitación se realiza disminuyendo el pH de la leche a un valor de 4.5 a 4.6. A este pH, se alcanza el punto isoeléctrico de la mayoría de las caseínas presentes; en este punto, la carga eléctrica de la proteína es igual a cero, lo cual produce que la micela de la caseína se desestabilice y precipite, dejando en solución solamente las proteínas séricas.

El suero de leche independientemente del tipo que sea, posee valiosos componentes desde el punto de vista nutricional (Tabla 1.1). El suero tiene una proporción baja en proteínas, pero estas poseen una calidad nutritiva superior a la de las caseínas que conforman el queso debido a que contienen la mayoría de los aminoácidos y presentan un mejor balance que las mismas caseínas.

**Tabla 1.2** Composición del suero de leche

	Dulce	Ácido
Sólidos totales (%)	6.5	5.2
Lactosa	4.9	4.3
Proteína	0.8	0.6
Nitrógeno no proteínico (% del total)	22	27
Ácido láctico	0.15	0.75
Cenizas	0.56	0.46
pH	6.2	4.6

## 1.4 Secado

El secado puede ser descrito como un método de preservación industrial en el cual el contenido de humedad y actividad de agua de los alimentos son reducidos para minimizar las reacciones bioquímicas, químicas y microbiológicas (Shingare y Thorat, 2013). El secado describe comúnmente el proceso de remoción de sustancias volátiles (agua) por efecto de la temperatura para generar un producto sólido. Cuando un alimento fresco es sujeto al proceso de secado, ocurren simultáneamente dos procesos: a) transferencia de energía (principalmente como calor) del ambiente circundante para evaporar la humedad superficial, y b) transferencia de humedad interna a la superficie del sólido y su posterior evaporación debido al proceso anterior. La remoción de agua (en forma de vapor) de la superficie del material, depende de condiciones externas de temperatura, humedad de aire y flujo, área de superficie expuesta y presión; mientras que el movimiento de la humedad interna hacia la superficie, está en función de la naturaleza física del sólido, la temperatura y su contenido de humedad. La velocidad de secado depende de la velocidad a la que se realicen los dos procesos anteriores (Mujumdar, 2014).

El secado de productos alimenticios es complicado debido a las transformaciones físicas, químicas y bioquímicas que pueden ocurrir durante el proceso, algunas de las cuales son deseables. El secado convectivo es una de las operaciones más empleadas para la deshidratación de alimentos. Se han realizado muchas investigaciones sobre diferentes métodos de secado tales como secado por lecho fluidizado, secado por charolas, liofilización, secado de tambor, y deshidratación osmótica (Villegas-Santiago *et al.* 2011).

Como regla, la liofilización genera productos alimenticios de mayor calidad que cualquier otro método de secado. La liofilización de alimentos y materiales biológicos también tiene la ventaja de mínimas pérdidas de sabor y aroma. Sin embargo, la liofilización es un método costoso para la deshidratación de alimentos debido a que la velocidad de secado es lenta y al uso de vacío (Liapis y Brutini, 2014).

El secado por aspersión no solamente tiene ventajas de costo sobre la liofilización como una herramienta tecnológica para extender la vida útil de los alimentos, sino también permite la producción continua de grandes cantidades de producto seco en cortos periodos de tiempo (Páez *et al.* 2012). Se han desarrollado muchas investigaciones sobre secado por aspersión de alimentos líquidos tales como pulpa de tomate (Goula y Adamopoulos, 2005), Açaí (Tonon *et al.* 2008), Jugo de piña (Abadio *et al.* 2004) yema de huevo (Rannou *et al.* 2015), jugos vegetales (Verma y Singh, 2015), leche (Schuck *et al.* 2015). Algunos investigadores han desarrollado el secado por aspersión de proteínas como proteínas de suero de leche, proteínas de leche, proteínas de soya, proteínas de carne de pollo (Anandharamakrishnan *et al.* 2010, Kurozawa *et al.* 2011, Taneja *et al.* 2015). Con respecto a esto, Anandharamakrishnan *et al.* 2010 investigó los efectos de la variación de la concentración de alimentación (20-40% w/v) y temperatura de salida (60 a 120 °C) sobre la desnaturalización de proteínas y solubilidad.

Aunque una gran cantidad de estudios han sido realizados sobre el secado por aspersión de proteínas de suero de leche, el efecto de las variables de proceso sobre la producción de suero deshidratado ha sido pasado por alto.

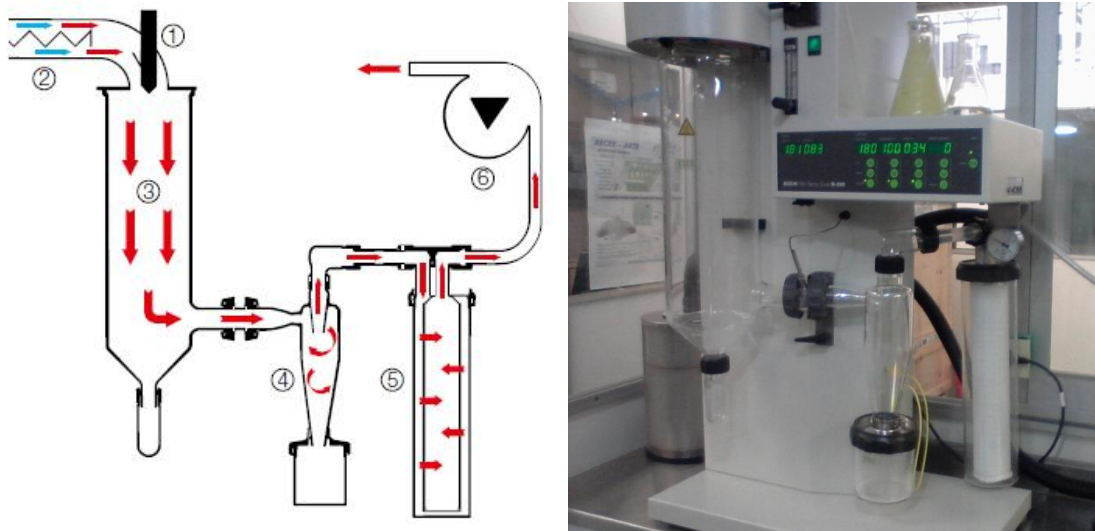
Por otra parte el secado por lecho fluidizado está orientado a alimentos sólidos. Este tipo de secado incluye una tasa alta de remoción de humedad, alta eficiencia térmica, fácil transporte

de material dentro del secador, fácil de controlar y bajos costos de mantenimiento (Law y Mujumdar, 2014). Se han desarrollado muchos trabajos sobre las condiciones de secado de diferentes vegetales como semillas de pimienta, paddy, variedades de arroz Vietnamita, aonla, mango, papa, brócoli (Kozanoglu *et al.* 2012; Tuyen *et al.* 2009; Murthy y Joshi, 2007; Villegas-Santiago *et al.* 2011; Lozano-Acevedo *et al.* 2011; Reyes *et al.* 2012). Sin embargo, no existen reportes sobre la deshidratación de queso fresco por lecho fluidizado (Towler, 1987; Erbay *et al.* 2015).

#### **1.4.1. Descripción del proceso de secado por aspersión**

El proceso de secado por aspersión es una técnica que se basa en la atomización de un líquido para crear gotas, las cuales son deshidratadas cuando se mueven en un medio gaseoso de aire caliente (Filková *et al.* 2014). Para materiales termo sensibles tales como alimentos, productos lácteos, jugo de frutas y productos farmacéuticos, el secado por aspersión es un método preferido (Krishnaiah *et al.* 2014). El proceso de secado por aspersión ocurre de la siguiente manera: el líquido es bombeado del tanque de alimentación al dispositivo de atomización (disco rotatorio, boquilla de presión, boquilla neumática, boquilla ultrasónica) la cual está localizada en el distribuidor de aire en la parte superior de la cámara de secado. El aire de secado es extraído de la atmósfera a través de un filtro por un ventilador y es dirigido hacia un calentador de aire (horno de aceite, calentador eléctrico, calentador de vapor) el cual lo conduce hacia el distribuidor de aire. Las gotas producidas por el atomizador entran en contacto con el aire caliente y la evaporación tiene lugar, mientras tanto, el aire es enfriado. Después del secado de las gotas, la mayoría del producto deshidratado cae a la parte inferior de la cámara y es arrastrado en el aire. Posteriormente, pasa a través del ciclón para la

separación de las partículas secas del aire. Las partículas salen del ciclón por la parte inferior y son colectadas (Filková *et al.* 2014).



**Figura1.2** Secador por aspersión de ciclo abierto

#### 1.4.2. Descripción del proceso de secado por lecho fluidizado

Los secadores por lecho fluidizado son ampliamente utilizados para la deshidratación de partículas húmedas y material granulado, e incluso suspensiones y pastas que puedan fluidizar en lecho de un sólido inerte. El secador por lecho fluidizado es comúnmente utilizado en el proceso de muchos productos químicos, carbohidratos, alimentos, bio-materiales, productos para bebidas, farmacéuticos en polvo o en la forma aglomerada, productos para el cuidado de la salud, pesticidas y agroquímicos, colorantes y pigmentos, detergentes y agentes tenso activos, fertilizantes, polímeros, resinas y taninos (Law y Mujumdar 2014).

Dentro de los secadores convectivos el secado por lecho fluidizado ofrece una alta tasa de remoción de humedad, alta eficiencia térmica, fácil transporte de material dentro del secador y bajos costos de mantenimiento (Lozano-Acevedo *et al.* 2011; Law y Mujumdar 2014). En el secado por lecho fluidizado, el aire de secado es introducido a cierta velocidad, en la cual el material permanece suspendido en la corriente de aire caliente y se seca a altas velocidades de transferencia de calor y masa, lo que resulta ideal para materiales termo sensibles porque este proceso previene el sobre calentamiento de las partículas debido al uniforme y rápido movimiento (Burande *et al.* 2008).

Los secadores por lecho fluidizado convencionales se forman haciendo pasar una corriente de aire desde la parte inferior de la columna que contiene partículas sólidas (Figura 1.3). A baja velocidad del gas, el lecho es estático. El lecho de partículas permanece en un platillo distribuidor de gas. El gas fluidizante pasa a través del distribuidor y es uniformemente distribuido a través del lecho. La caída de presión a través del lecho incrementa a medida que la velocidad del gas aumenta. A cierta velocidad del gas, el lecho es fluidizado cuando la corriente de aire soporta totalmente el peso del lecho de partículas. Las partículas con un alto contenido de humedad inicial requieren una mayor velocidad de fluidización en comparación a un lecho similar de partículas secas. Debido a las dominantes fuerzas de cohesión ejercidas por las partículas húmedas, solo la capa superior del lecho de sólidos es lecho fluidizado. Las capas inferiores permanecen estacionarias durante las etapas iniciales de secado cuando los sólidos están bastante húmedos (Law y Mujumdar 2014).





**Figura1.3** Secador por lecho fluidizado Retsch TG-200

### 1.5. Material aditivo

La encapsulación de compuestos activos en polvos ha sido un proceso atractivo en recientes décadas no solo en la industria de alimentos sino también en la industria farmacéutica. El principal objetivo es encapsular un ingrediente sensible dentro de una cápsula o pared para aislarlo físicamente del ambiente. Por ejemplo, esta barrera puede conferir protección contra el oxígeno, agua, luz, permite la liberación controlada con otros constituyentes en una mezcla. El material de pared es hecho generalmente de compuestos que crean una estructura similar a una red (Krishnaiah *et al.* 2014).

Los aditivos de secado, los cuales tienen alto peso molecular, son empleados principalmente para evitar problemas de operación durante el proceso de secado por aspersión tales como pegajosidad en la cámara de secado, así como transformaciones estructurales tales como colapso y cristalización, durante el proceso de alimentos y almacenamiento, lo cual es importante en el caso de productos ricos en azúcar como los jugos de frutas (Verma y Singh 2015). Los aditivos de secado forman una capa externa sobre las gotas y alteran la adherencia superficial de las partículas debido a la transformación en un estado vítreo. Los cambios en la adherencia de la superficie reducen la cohesión de las partículas lo que resulta en menos aglomeración, y por lo tanto, baja capacidad de retención de agua de los polvos. Los aditivos reducen la higroscopicidad y propiedades termoplásticas de los productos a deshidratar. (Verma y Singh 2015).

Los carbohidratos tales como almidones, maltodextrinas y sólidos de jarabe de maíz usualmente son utilizados en la microencapsulación de ingredientes alimenticios. Sin embargo, los materiales de pared que son basados en estos compuestos tienen propiedades interfaciales pobres y deben ser químicamente modificados para mejorar su actividad superficial (Gharsallaoui *et al.* 2007). La maltodextrina es considerada un buen agente portador debido a su baja viscosidad a altos contenidos de sólidos y bajo costo. Sin embargo, es hidrofílico por naturaleza, por lo que tiene poca afinidad para componentes hidrofóbicos (Santana *et al.* 2017).

El equivalente de dextrosa (ED) es una medida de la hidrólisis del almidón a azúcares reductores y se define como un porcentaje de dextrosa anhidra de la sustancia seca total. La dextrosa pura tiene un valor de 100 y la del almidón es 0. La maltodextrina con bajo

equivalente de dextrosa contiene una gran proporción de sacáridos de cadena larga, lo que resulta en una barrera inflexible durante la micro encapsulación que es permeable al oxígeno. Con un incremento en el equivalente de dextrosa de la maltodextrina, la proporción de sacáridos de cadena corta incrementa lo que resulta en un incremento en las propiedades de barrera (Nayak y Rastogi, 2010). Los sacáridos de cadena corta son más higroscópicos que los sacáridos de cadena larga porque contienen más grupos hidrofílicos.

Por tal motivo el uso de maltodextrina como aditivo de secado ha sido ampliamente empleado en el secado por aspersión de Antocianinas (Nayak y Rastogi, 2010), frutas y jugos vegetales (Verma y Singh *et al.* 2014), extracto de frutas (Krishnaiah *et al.* 2014), Caqui (Du *et al.* 2014); pulpa de Jucara (Bicudo *et al.* 2015), extractos de colorantes (Norbrillinda *et al.* 2016).

El paso inicial para la encapsulación de ingredientes alimenticios es la selección de un adecuado material de recubrimiento. El material de recubrimiento también ha sido referido en la literatura como matriz de encapsulación, envoltura o material de pared, agente encapsulante o soporte (Shahidi y Han, 1993).

Las sustancias de recubrimiento son básicamente materiales formadoras de películas que pueden ser seleccionadas de una amplia variedad de polímeros sintéticos o naturales dependiendo del material a recubrir y de las características deseadas en las microcápsulas. Un material de recubrimiento ideal debería tener las siguientes propiedades: a) buenas propiedades reológicas a altas concentraciones y fácil de manipular durante el proceso de encapsulación, b) habilidad para dispersar o emulsificar el material activo y estabilizar la emulsión producida, c) no reacciona con el material que será encapsulado tanto en el proceso

de encapsulación como durante el almacenamiento, d) capacidad para retener el material activo dentro de su estructura durante el proceso o almacenamiento, e) liberación completa del solvente u otro material que ha sido utilizado durante el proceso de encapsulación, f) habilidad para proveer la máxima protección al material activo contra las condiciones ambientales (calor, luz y humedad), g) soluble en solventes aceptables en la industria de alimentos, agua, etanol, etc., h) no reacciona químicamente con el material activo, i) económico.

La propiedad de los carbohidratos para absorber compuestos volátiles del ambiente o retenerlos durante el proceso de secado ha sido aplicada para la retención de sabores. Estas características hacen de los carbohidratos los materiales de pared comúnmente utilizados para la encapsulación de sabores.

## **1.6 Optimización**

El método utilizado para mejorar el rendimiento de los sistemas e incrementar el rendimiento de los procesos sin incrementar el costo es llamado optimización (Bas and Boyaci, 2007). La metodología de superficie de respuesta (RSM) es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para desarrollar, mejorar y optimizar procesos en los cuales una respuesta de interés es influenciada por diferentes variables y el objetivo es optimizar esta respuesta. Además, para analizar los efectos de las variables independientes, esta metodología experimental genera modelos matemáticos los cuales describen procesos químicos o bioquímicos (Montgomery, 2012).

En años recientes, la metodología de superficie de respuesta ha sido muy utilizada para estudios de optimización de productos alimenticios (Pérez-Francisco *et al.* 2008; Chávez-

Rodríguez *et al.* 2014; Erbay *et al.* 2015). La metodología de superficie de respuesta consiste en un grupo de técnicas matemáticas y estadísticas que pueden ser utilizadas para definir la relación entre la respuesta y las variables independientes. RSM define el efecto de las variables independientes, solas o en combinación, sobre el proceso. Además, para analizar el efecto de las variables independientes, esta metodología experimental genera un modelo matemático. La representación gráfica del modelo matemático ha permitido el término metodología de superficie de respuesta.

La relación entre la respuesta y la entrada es dada por la ecuación (1):

$$\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + \varepsilon \quad (\text{Ec.1})$$

donde  $\eta$  es la respuesta,  $f$  es la función desconocida de respuesta,  $X_1, X_2, \dots, X_n$  denota las variables independientes, también llamadas variables naturales,  $n$  es el número de variables independientes y finalmente  $\varepsilon$  es el error estadístico que representa otras fuentes de variabilidad no consideradas para  $f$ . Estas fuentes incluyen los efectos tales como la medición del error. Generalmente, se asume que  $\varepsilon$  tiene una distribución normal con media cero y varianza constante.

El modelo utilizado en la metodología de superficie de respuesta, generalmente es una ecuación cuadrática completa o la forma disminuida de esta ecuación. El modelo de segundo orden puede ser escrito de la siguiente manera (Ecuación 2):

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j \quad (\text{Ec. 2})$$

donde  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$  y  $\beta_{ij}$  son coeficientes de regresión para la intercepción, lineal, cuadrática y los coeficientes de interacción, respectivamente y  $X_i$  y  $X_j$  son las variables independientes codificadas.

La visualización de la ecuación del modelo predicho puede ser obtenida por la gráfica de superficie de respuesta y la gráfica de contornos. La gráfica de superficie de respuesta es una gráfica teórica tridimensional que muestra la relación entre la respuesta y las variables independientes. La representación bidimensional de la gráfica de superficie es llamada gráfica de contornos y en la gráfica de contorno, las líneas de la respuesta son dibujadas en el plano de las variables independientes. La gráfica de contorno ayuda a visualizar la forma de una superficie de respuesta. Cuando la gráfica de contorno muestra elipses o círculos, el centro del sistema refiere a un punto máximo o mínimo de la respuesta. Algunas veces, la gráfica de contornos puede mostrar un sistema hipérbolico o parabólico del sistema. En este caso, el punto estacionario es llamado punto de silla y no es ni un punto máximo ni un mínimo.

### **1.7 Superposición de contornos**

Las condiciones óptimas pueden ser determinadas a partir de la región derivada de la superposición de contornos de dos variables independientes, mientras la otra variable independiente permanece constante (como gráfica de contorno). Esta técnica proporciona la región factible para una respuesta predeterminada. La región factible es representada por la región blanca que resulta de la superposición de contornos (Theppaya y Prasertsan, 2004). Algunos investigadores como Theppaya y Prasertsan 2004; Pérez-Francisco *et al.* 2008; Burande *et al.* 2008; Han *et al.* 2010; han utilizado la metodología de superficie de respuesta y

superposición de contornos para la optimización del proceso de secado de madera de caucho, chayote, manzana y chícharos, respectivamente. El análisis de las gráficas de superposición de contornos permite obtener las regiones óptimas del proceso de secado.

### **1.8 Síntesis de antecedentes**

En la actualidad, el proceso de secado es considerado como un método de preservación en la industria de los alimentos utilizado para minimizar las reacciones bioquímicas, químicas y microbiológicas de los mismos; sin embargo, cada técnica de secado tiene aplicaciones específicas las cuales deben considerarse basándose en las características del alimento que se desea deshidratar (Mujumdar, 2014). La liofilización genera productos alimenticios con la mínima pérdida de sabor y aroma que cualquier otro método de secado; a pesar de ello, es un método costoso para la deshidratación (Liapis y Brutini, 2014). Por otra parte, el secador por charolas es el más sencillo de los mecanismos de secado en el cual el alimento es colocado sobre una charola; no obstante, tiene la desventaja de no secar el alimento de forma uniforme; es decir, dependiendo de su posición en el secador es el resultado que se obtendrá. Debido a esto, las charolas cercanas a la entrada de aire estarán sujetas a condiciones distintas de las que se encuentran ubicadas cerca del final de la trayectoria de flujo de aire (Muñoz-López, 2014). El secado por aspersión no solamente tiene ventajas de costo sobre la liofilización como una herramienta tecnológica para extender la vida útil de los alimentos, sino que también está orientado a deshidratar alimentos líquidos termo-sensibles generando grandes cantidades de producto en cortos periodos de tiempo (Páez *et al.* 2012). Finalmente, los secadores por lecho fluidizado son ampliamente utilizados para la deshidratación de partículas y material granulado que puedan fluidizar en lecho de un sólido inerte, es ideal para alimentos termo-

sensibles debido al movimiento rápido y uniforme de los materiales (Law y Mujumdar, 2014). Por lo anterior, el secado por aspersión y el secado por lecho fluidizado fueron propuestos como alternativas eficientes para la deshidratación del suero de leche y queso fresco, respectivamente.

Mediante el secado por aspersión se han deshidratado alimentos que han evaluado el efecto de la temperatura y del material de pared sobre las propiedades fisicoquímicas de productos en polvo tales como jugo de amla (Mishra *et al.* 2013); extracto de sumac (Caliskan *et al.* 2013); Júcara (Bicudo *et al.* 2015); proteínas de suero, proteínas de leche, proteínas de carne de pollo (Anandharamakrishnan *et al.* 2010; Kurozawa *et al.* 2011; Taneja *et al.* 2015); sin embargo, el efecto de las variables del proceso de secado sobre la producción del suero de leche deshidratado ha sido pasado por alto; además, existe poca información publicada sobre el costo de equipo y procesos ya que la mayoría de la información es retenida por la industria y mantenida como confidencial (Kudra, 2014). Anandharamakrishnan *et al.* 2007 investigó el efecto de la variación de la concentración de alimentación (20-40%) y de la temperatura de salida (60-120 °C) sobre la desnaturalización de proteínas de suero de leche y su solubilidad en un secador por aspersión planta piloto. Sus resultados demostraron que las temperaturas de salida de 60 y 80 °C generaron el menor grado de desnaturalización y pérdida de solubilidad. Shu *et al.* 2012, realizaron la encapsulación de proteínas de suero de leche mediante secado por aspersión utilizando maltodextrina y una mezcla de maltodextrina y ciclo dextrina como material de pared para atenuar el sabor. Luna-Solano *et al.* 2004 y Pérez-Francisco *et al.* 2008 determinaron el costo de producción de levadura de cerveza y chayote obtenida por secado por aspersión y secado por charolas respectivamente.



De acuerdo al estado del arte son pocos los estudios que han evaluado el efecto de la temperatura sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas del queso fresco; esto hace que la presente investigación muestre resultados de gran significancia sobre el estudio de un queso altamente perecedero. Kilic (1997) evaluó las cinéticas de obscurecimiento del queso cheddar en polvo durante su almacenamiento. Berrones-Hernández *et al.* (2007) realizaron un estudio del proceso de deshidratación del queso fresco chiapaneco mediante un secador solar. Sus resultados demostraron que a una temperatura máxima de 51.43 °C el porcentaje de humedad se redujo del 50 al 16% después de diez días de secado. Erbay *et al.* (2015) realizaron la optimización del proceso de secado por aspersión de queso. En este estudio se produjo queso deshidratado por aspersión empleando un secador por aspersión escala planta piloto. Las variables independientes utilizadas fueron temperatura de entrada (160 a 230 °C), presión de atomización (294 a 588 kPa) y temperatura de salida (60 a 100 °C). Las condiciones óptimas de secado fueron temperatura de entrada de 174 °C, presión de atomización de 354 kPa y temperatura de salida de 68 °C. Faccia *et al.* (2012). Evaluaron la influencia de las diferentes concentraciones de cloruro de sodio sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas del queso mozzarella. En particular, la mayor vida de anaquel fue obtenida en las muestras de queso sin sal (5 días) y en aquellas con la menor concentración (4 días).

**CAPÍTULO 2**  
**MATERIALES Y MÉTODOS**

## CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Metodología general

En las Figuras 2.1, 2.2 se presenta un panorama general de la metodología que se desarrolló para realizar este proyecto de investigación, la cual consistió de dos partes:

#### PARTE I

##### **Desarrollo experimental del secado por aspersion de suero de leche**

Esta etapa engloba el desarrollo experimental del secado por aspersion de suero de leche. En esta seccion se realizaron los analisis fisicoquimicos y microbiologicos del suero de leche, se estudiaron las condiciones para el secado por aspersion en un secador Mini Spray Dryer B-290 y se analizaron las variables de respuesta del producto deshidratado tales como: humedad,  $a_w$ , parametros de color L, a, b y  $\Delta E$ , y contenido de proteinas, asi como un analisis de consumo de energia, produccion y costo del suero en polvo. En la Figura 2.1 se muestra la metodologia general que se desarrollo para el proceso de secado por aspersion de suero de leche.

#### PARTE II

##### **Desarrollo experimental del secado por lecho fluidizado de queso fresco**

En esta seccion se realizo la caracterizacion fisicoquimica y microbiologica del queso fresco, se definieron las condiciones adecuadas para el proceso de deshidratacion en un secador por lecho fluidizado Retsch TG-200 y se analizaron las variables de respuesta del producto deshidratado (humedad,  $a_w$ , color, contenido de proteinas, cloruro de sodio, grasa y lactobacilos), de igual manera se realizo un analisis de consumo de energia, produccion y costo del queso deshidratado. En la Figura 2.2 se muestra de manera general la metodologia que se siguió para el desarrollo de este proyecto.

PARTE I

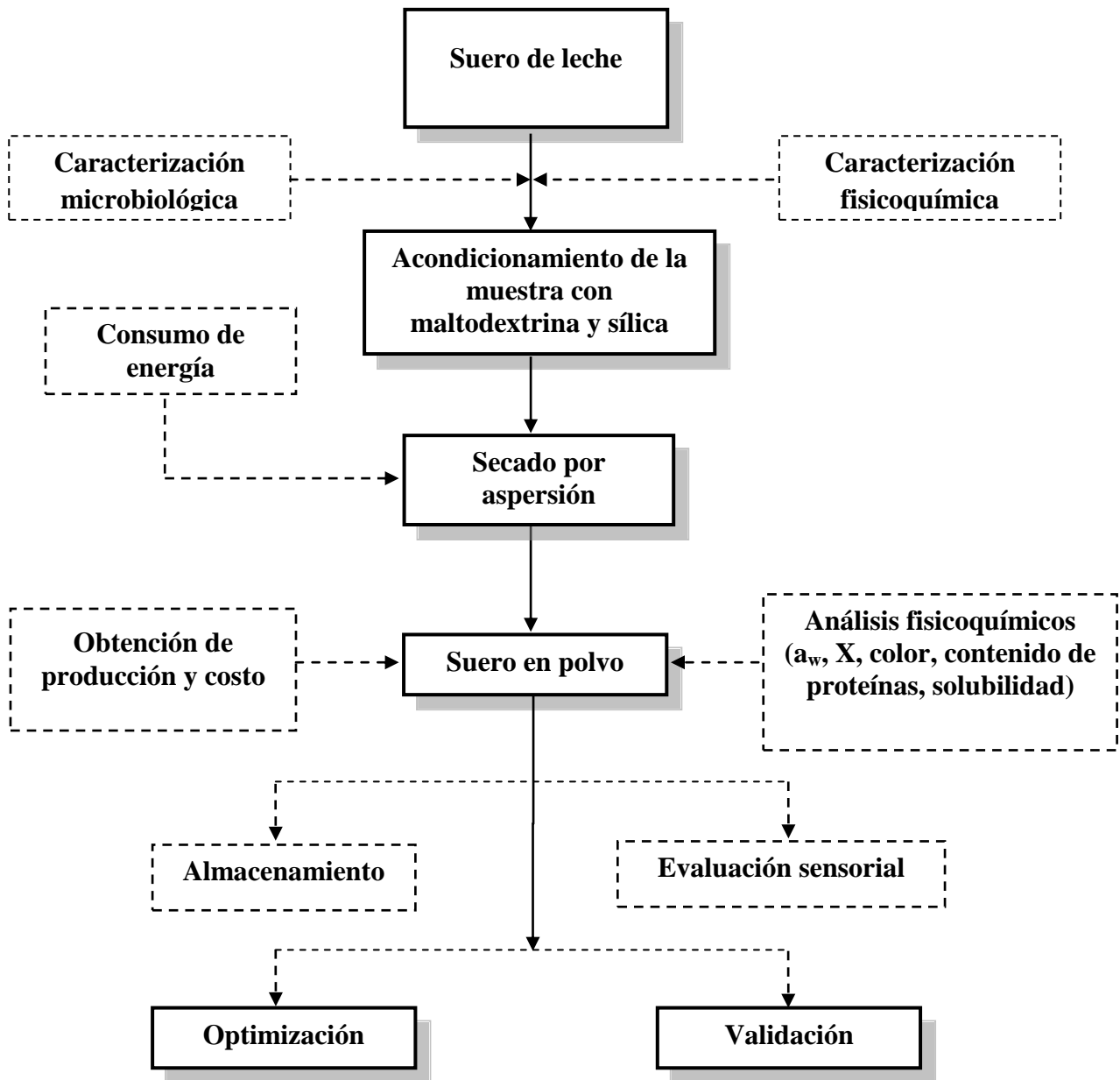


Figura 2.1 Metodología general para el proceso de secado por aspersión del suero de leche.

PARTE II

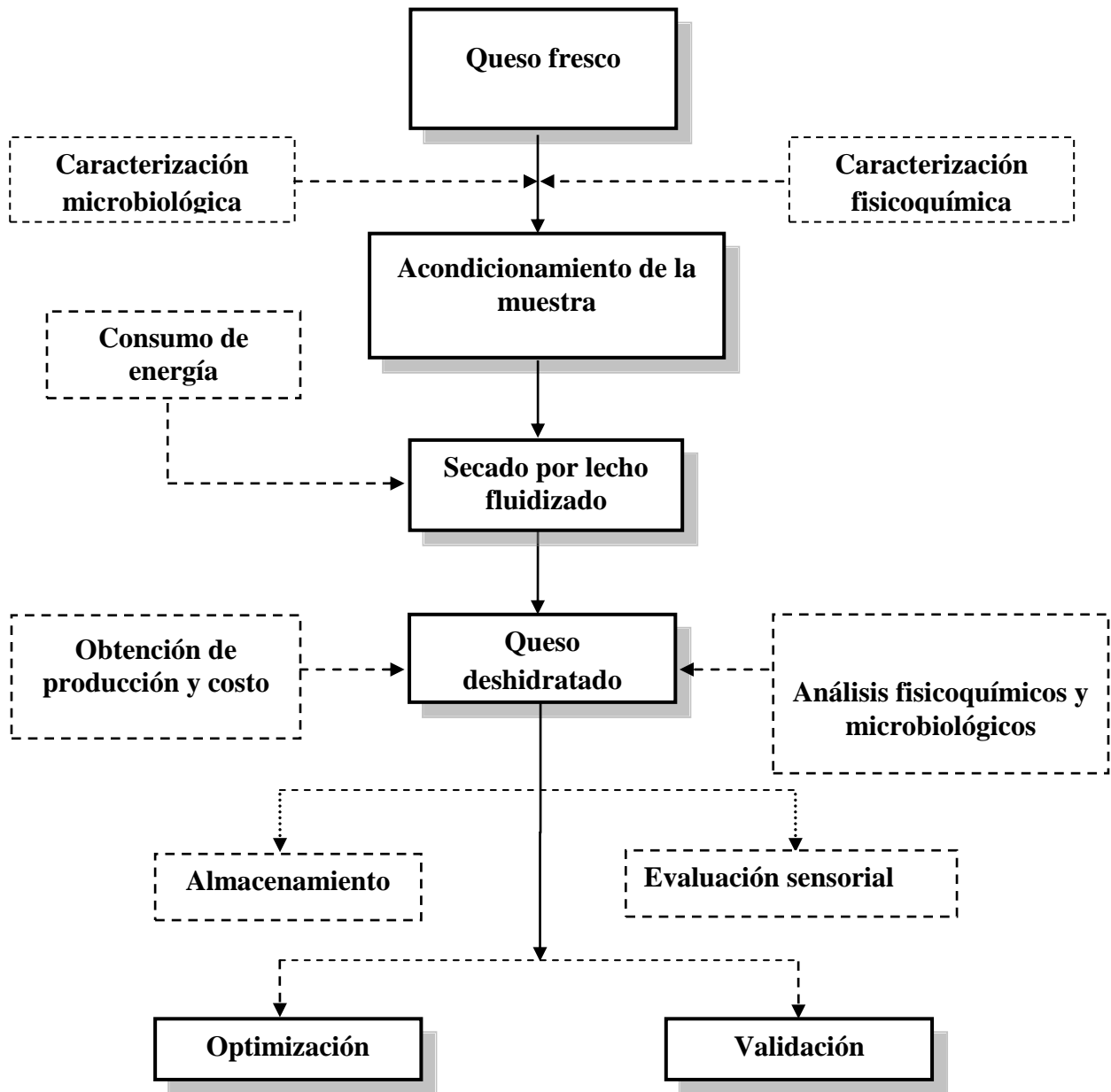


Figura 2.2 Metodología general para el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco

## 2.2 Materia prima

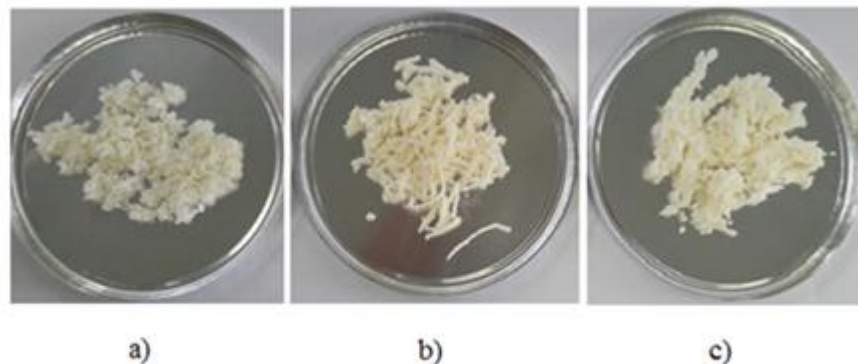
Para el desarrollo de este proyecto de investigación se utilizó queso Jarocho artesanal, el cual pertenece a la categoría de quesos frescos latinoamericanos y es elaborado con leche de vaca (Hnosko, 2009). El queso fresco y suero de leche fueron proporcionados por un grupo productor de queso, localizado en la región de Paso Carretas, Tlalixcoyan, Veracruz, México.



**Figura 2.3** Queso fresco y suero de leche

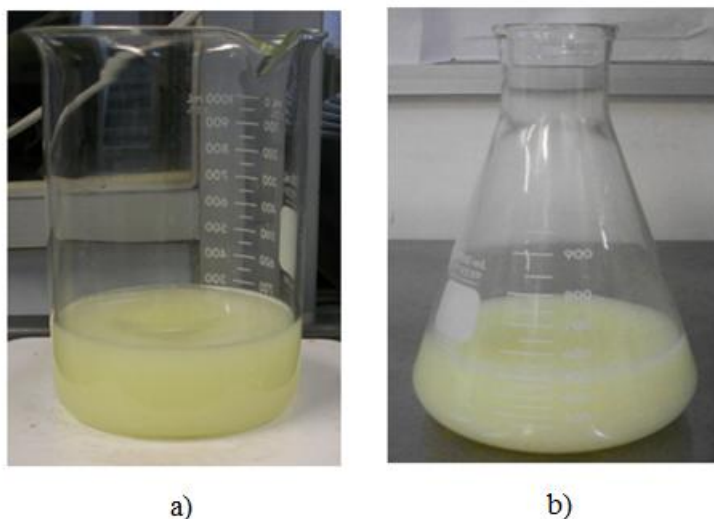
## 2.3 Acondicionamiento de la muestra

Las muestras de queso fresco fueron cortadas con una longitud de 0.5, 2 y 3.5 cm. Se prepararon cargas de 100 g para el proceso de secado por lecho fluidizado.



**Figura 2.4** Cortes de queso fresco: a) 0.5, b) 2 y c) 3.5 cm

El suero de leche fue acondicionado mediante la adición de maltodextrina (ED-10) y sílica en 500 mL de suero (Figura 2.5). Con la finalidad de evitar el apelmazamiento del producto en la cámara de secado, proteger el material de la degradación reduciendo su reactividad con el ambiente exterior (humedad, calor, aire y luz), así como evitar la modificación de las características físicas del material original. (Roos y Karel, 1991; Bhandari *et al.* 1993; Kashappa y Hyun, 2005).



**Figura 2.5** Soluciones de suero de leche: a) 2 % sílica y b) 5 % maltodextrina.

#### **2.4 Descripción del secador por aspersión**

Para el desarrollo del proceso de secado se utilizó un secador por aspersión mini spray dryer (Büchi Modelo B-290, Switzerland). Una bomba peristáltica dirigió el suero de leche hacia el atomizador; la atomización fue desarrollada con una boquilla de diámetro interno de 0.5 mm la cual utilizó aire comprimido. El flujo de aire máximo del secador es de 35 m<sup>3</sup>/hr con una capacidad de evaporación de 1.0 L/h (Figura 2.6).



**Figura 2.6** Mini spray dryer B-290

## 2.5 Descripción del secador por lecho fluidizado

Se utilizó un secador por lecho fluidizado (Retsch TG-200, Alemania) para el proceso de deshidratación (Figura 2.7). La potencia del ventilador es de aproximadamente  $185 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dependiendo de las propiedades específicas del material a secar se pueden deshidratar materiales con un grado de humedad máxima de 80%. El tamaño de carga es de 1000 mL y el tamaño de partícula no debe ser inferior a  $63 \mu\text{m}$ .



**Figura 2.7** Secador por lecho fluidizado Retsch TG-200



## 2.6 Secado por aspersión de suero de leche

El suero de leche fue deshidratado en un secador por aspersión a una temperatura del aire a la entrada ( $T_{y0}$ ) de 180, 200 y 220 °C, variando el contenido de sólidos del suero de leche ( $W_g$ ), con la adición de maltodextrina y sílica (0, 2, 5%) y la temperatura del aire a la salida ( $T_{ys}$ ) de 80, 90 y 100 °C. La temperatura del aire de salida se controló variando el flujo de alimentación del suero de leche.

### 2.6.1 Diseño de experimentos

Para llevar a cabo el secado por aspersión del suero de leche se aplicó un diseño compuesto central centrado en sus caras representado como  $2^3+2(3)+1$ . Para cada factor se utilizaron 2 niveles con 6 puntos centrales en las caras y un punto central. En la Tabla 2.1 se muestran los factores y niveles utilizados para cada factor o variable independiente del proceso de secado por aspersión.

**Tabla 2.1** Factores y niveles evaluados en el proceso de secado por aspersión de suero de leche

Factor	Nivel alto (+1)	Nivel medio (0)	Nivel bajo (-1)
Temperatura del aire de entrada (°C)	220	200	180
Temperatura del aire de salida (°C)	100	90	80
Concentración de maltodextrina (%)	5	2	0

En la Tabla 2.2 se muestran las corridas experimentales con sus correspondientes condiciones de secado. Las variables independientes fueron seleccionadas considerando estudios previos de secado por aspersión realizados a diferentes tipos de proteínas; proteínas de suero de leche, proteínas de leche, proteínas de soya y proteínas de carne de pollo (Anandharamakrishnan *et al.* 2010; Kurozawa *et al.* 2011; Taneja *et al.* 2015). Considerando esto, Anandharamakrishnan *et al.* (2007) investigó los efectos de la variación de concentración de alimentación (20–40% w/v) y temperatura de aire de salida (60 a 120 °C) sobre la desnaturalización de proteínas de

suero de leche. Se confirmó que bajas temperaturas de aire de salida (60 and 80 °C) produce la más baja desnaturalización de proteínas y baja pérdida de solubilidad.

**Tabla 2.2.** Corridas experimentales del proceso de secado por aspersión de suero de leche

Experimento	Temperatura $T_{\gamma 0}$ (°C)	Temperatura $T_{\gamma S}$ (°C)	Soporte (%)
1	180	80	0
2	180	100	0
3	220	80	0
4	220	100	0
5	180	80	5
6	180	100	5
7	220	80	5
8	220	100	5
9	200	80	2
10	200	100	2
11	200	90	2
12	180	90	2
13	220	90	2
14	200	90	5
15	200	90	0

## 2.7 Secado por lecho fluidizado de queso fresco

Se utilizó un secador de lecho fluidizado, en el cual las muestras de queso fresco fueron deshidratadas por medio de aire caliente a una temperatura de 50, 60 y 70 °C durante un tiempo de secado de 60, 90 y 120 min.

### 2.7.1 Diseño de experimentos

Para llevar a cabo el secado por lecho fluidizado de queso fresco se aplicó un diseño compuesto central centrado en sus caras representado como  $2^3+2(3)+1$ . Para cada factor se utilizaron 2 niveles con 6 puntos centrales en las caras y un punto central. En la Tabla 2.3 se muestran los factores y niveles utilizados para cada factor o variable del proceso de secado por aspersión.

**Tabla 2.3** Factores evaluados en el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco

Factor	Nivel alto	Nivel medio	Nivel bajo
	(+1)	(0)	(-1)
Temperatura del aire de entrada (°C)	70	60	50
Tamaño de partícula (cm)	3.5	2	0.5
Tiempo de secado (min)	120	90	60

La Tabla 2.4 muestra las corridas experimentales con sus correspondientes condiciones de secado las cuales fueron realizadas de manera aleatoria. Cada factor fue definido mediante pruebas preliminares que permitiera mejor fluidización del alimento y menor daño térmico; además, se consideraron los resultados obtenidos por Páez *et al.* 2013 quienes estudiaron el efecto del proceso de secado por aspersión sobre la funcionalidad de lactobacilos probióticos y por Erbay *et al.* 2015 durante la optimización del proceso de secado por aspersión en la producción de queso en polvo. En estos estudios reportan que la temperatura de secado del aire de salida de 85 °C y 68 °C generaron los mejores resultados para viabilidad de lactobacilos y características fisicoquímicas respectivamente.

**Tabla 2.4** Corridas experimentales del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco

Experimento	Tamaño de partícula (cm)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
1	0.5	50	60
2	0.5	70	60
3	3.5	50	60
4	3.5	70	60
5	0.5	50	120
6	0.5	70	120
7	3.5	50	120
8	3.5	70	120
9	2.0	50	90
10	2.0	70	90
11	2.0	60	90
12	0.5	60	90
13	3.5	60	90
14	2.0	60	60
15	2.0	60	120

## 2.8 Análisis microbiológicos

Para los análisis microbiológicos, 10 g de muestra fueron licuados con 90 mL de agua peptonada. Se prepararon una serie de diluciones las cuales fueron colocadas en el medio apropiado (NOM-110-SSA1-1994). Cada prueba microbiológica fue realizada por duplicado. Los resultados fueron expresados como  $\text{Log}_{10}$  UFC/g de muestra).

### 2.8.1 Bacterias aerobias mesofílicas

1 mL de las diluciones  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ , y  $10^{-5}$  fueron colocadas en cajas Petri, posteriormente se les agregaron 15 mL del medio de Agar para métodos estándares (BDBIOXON) a 40°C. Se mezcló cuidadosamente el inóculo con el medio y se dejaron reposar las cajas de Petri sobre una superficie horizontal fría para permitir que la mezcla

solidificara. Se preparó un control con 15 mL de medio para verificar la esterilidad. Se invirtieron las placas y se colocaron en la incubadora a 35 °C durante 48 ± 2 horas (González, 2010).

### **2.8.2 Determinación de coliformes totales**

1 mL de cada dilución ( $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ , y  $10^{-5}$ ) fueron colocadas en cajas de Petri, posteriormente se les agregaron 15 mL del medio de cultivo agar-rojo-violeta-bilis-lactosa (RVBA, BDBIOXON) fundido y mantenido a 45 ± 1°C en baño de agua. Se preparó una caja control con 15 mL de medio para verificar la esterilidad. Posteriormente de que el medio haya solidificado en la caja, se invirtieron las placas y se colocaron en la incubadora a 35°C, durante 24 ± 2 horas. Después del periodo especificado para la incubación se contaron las colonias. Las colonias típicas son de color rojo oscuro, generalmente se encuentran rodeadas de un halo de precipitación debido a las sales biliares, el cual es de color rojo claro o rosa, la morfología colonial es semejante a lentes biconvexos con un diámetro de 0.5 a 2.0 mm (González, 2010).

### **2.8.3 Determinación de lactobacilos**

Este método de análisis se llevó a cabo mediante un recuento en caja utilizando como medio de cultivo Agar MRS (Man Rogosa y Sharpe, DIBICO). Las placas se prepararon por duplicado a partir de 1 mL de la dilución apropiada de la muestra de queso y 15 mL de agar semifundido y una vez solidificó la mezcla se incubaron a 35°C durante 72 h (Vargas, 2006).

### **2.8.4 Determinación de hongos y levaduras**

El contenido de hongos y levaduras se determinó utilizando agar papa dextrosa (DIBICO) ajustando el pH mediante la adición de ácido tartárico al 10% a una temperatura de incubación de 25 °C durante 5 días.

## 2.9 Análisis fisicoquímicos

Con el fin de caracterizar el queso fresco y el suero de leche, se realizaron los análisis fisicoquímicos que se describen a continuación:

### 2.9.1 Humedad

La determinación de la humedad se realizó en una termobalanza (SARTORIUS MA 35, Alemania) a 65 °C con un contenido de muestra aproximadamente de 1 g durante un tiempo de 4 a 6 min.

### 2.9.2 Actividad de agua

La determinación de actividad de agua ( $a_w$ ) se realizó con un equipo marca Aqualab (SERIE 3 TE, DECAGON, Washington) a 25 °C. Se midió la  $a_w$  del queso fresco antes y después del proceso de secado.

### 2.9.3 Color

La determinación de color se realizó utilizando un colorímetro (Modelo MiniScan XE plus y Color Quest XE, Hunter Associates Laboratory, Retson, VA, USA). Se empleó el software Universal versión 4.10. El equipo fue calibrado con placas estándar blanca y negra. El color experimental fue determinado en modo de reflectancia y expresado por los parámetros  $L$  (luminosidad),  $a$  (rojo/verde) y  $b$  (amarillo/azul). La diferencia de color ( $\Delta E$ ) fue calculada utilizando la ecuación empleada por Lozano-Acevedo *et al* 2011 (Ecuación 3). Donde  $\Delta L = L$  de la muestra deshidratada –  $L$  de la muestra fresca estándar,  $\Delta a = a$  de la muestra deshidratada –  $a$  de la muestra fresca estándar y  $\Delta b = b$  de la muestra deshidratada –  $b$  de la muestra fresca estándar.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (\text{Ec.3})$$

Para calcular los valores de intensidad de color (Chroma) y ángulo de color (Hue) fue necesario utilizar los valores de  $a$  y  $b$  mediante las ecuaciones 4 y 5.

$$\text{Chroma} = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec.4})$$

$$\text{Hue} = \left| \tan^{-1} \left( \frac{b}{a} \right) \right| \quad (\text{Ec.5})$$

#### 2.9.4 Grasa

La determinación del contenido de grasa se realizó por el método de extracción con equipo soxhlet, según lo indicado en la norma NMX-F-089-S-1978. Aproximadamente 2 g de muestra de queso se colocaron en cartuchos de papel cubiertos con algodón, los cartuchos se introdujeron en la cámara de extracción. Se adaptó el matraz colector en la parte inferior del equipo y se adicionó hexano por el extremo superior del refrigerante posteriormente se calentó el sistema de extracción durante 4h. Una vez transcurrido el tiempo de extracción se dejó enfriar el matraz con la muestra extraída, se dejó enfriar y se llevó a peso constante a 100 °C. Las mediciones se realizaron por duplicado.

#### 2.9.5 Proteínas

El contenido de proteínas fue cuantificado como porcentaje de proteínas por el método Kjeldahl y multiplicando el valor de nitrógeno por el factor de 6.38 para productos lácteos (James, 1995). Para calcular el contenido proteico de la muestra se utilizó un digestor y destilador de proteínas (NOVATECH. KJD2, México) En esta técnica se digieren las proteínas de componentes orgánicos con ácido sulfúrico concentrado 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 4N. Los aniones del borato así formado se titulan con HCL 0.1N, los cuales se convierten en el nitrógeno de la muestra.

#### 2.9.6 Densidad

Para la determinación de la densidad del suero de leche se empleó el método gravimétrico a una temperatura de 20 °C empleando una balanza marca Sartorius modelo TE214S. La

densidad del suero de leche se determinó pesando primeramente el matraz aforado a peso constante, posteriormente se le adicionó suero de leche, se aforó a 100 mL y se controló la temperatura a 20 °C en un baño de hielo. Se pesó el matraz aforado con el alimento en balanza analítica y por diferencia de peso se determinó la masa del alimento. Se calculó la densidad aplicando la ecuación.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$\rho$  = densidad ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$m$  = masa (kg)

$v$  = volumen ( $\text{m}^3$ )

### 2.9.7 pH

Para realizar las mediciones de pH se utilizó un medidor portátil (CONDUCTRONIC modelo PH10). Para poder determinar el pH del suero de leche y queso fresco, el equipo debió ser calibrado con una solución patrón Buffer pH  $7 \pm 0.02$  a 25 °C antes de utilizarlo, logrando tener una mayor exactitud en las mediciones y un menor índice de error.

### 2.10 Almacenamiento de queso deshidratado

Para evaluar el efecto del almacenamiento sobre las características fisicoquímicas del queso deshidratado, se emplearon muestras de 12.1 g, las cuales fueron empacadas en bolsas de polietileno y metalizadas ( $13.2 \times 9.5$  cm con un grosor de 30  $\mu$ ). Las muestras fueron selladas por medio de una selladora Food Saver (Modelo FSFSSL3880) bajo condiciones atmosféricas (aire) y vacío (VP) y almacenadas a 5 y 25 °C  $\pm 1$  °C). Las muestras de queso deshidratado fueron analizadas en intervalos regulares de 5 días durante tres meses de almacenamiento). Al



final del periodo de almacenamiento se realizaron análisis microbiológicos del contenido de lactobacilos.

### **2.10.1 Diseño de experimentos**

Se utilizó un diseño experimental mixto  $2^3$ . Los experimentos fueron realizados por triplicado, y se reportaron los valores medios de cada variable de respuesta. En este diseño se analizaron dos variables cualitativas (tipo de bolsa hechas de polietileno y aluminio) y tipo de atmósfera (aire y vacío), y como variable cuantitativa, temperatura de almacenamiento de 5 y 25 °C, haciendo un total de ocho condiciones de almacenamiento. Los resultados fueron analizados empleando el software Minitab 10, versión 16. Se realizó un análisis estadístico de comparación de medias con prueba de Tukey  $\alpha=0.10$ .

### **2.10.2 Empaque de queso deshidratado**

Las muestras de queso deshidratado (12.1 g por muestra), fueron empacadas en dos tipos de bolsas hechas de polietileno y aluminio ( $13.2 \times 9.5$  cm, con un grosor de 30  $\mu$ ). Ambos tipos de bolsa fueron suministradas por QUIMILAB, México. Las muestras fueron selladas por medio de un sistema de sellado (Food Saver, modelo FSFSSL3880, Sunbeam Mexicana) bajo condiciones atmosféricas (aire) y vacío, y fueron almacenadas a 5 y 25 °C. Las muestras fueron analizadas a intervalos regulares durante tres meses de almacenamiento.

## **2.11 Medición del consumo de energía durante el proceso de secado por aspersión y secado por lecho fluidizado**

Durante el proceso de secado se evaluó el consumo de energía, esto se realizó mediante la medición de la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo a la entrada del aire así como la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo a la salida del aire del secador. Posteriormente, con la ayuda de la carta psicrométrica y las temperaturas medidas anteriormente, se calcularon las entalpías del proceso de secado por aspersión del suero de leche y secado por lecho fluidizado de queso fresco (ecuación 7).

$$\Delta H = H_s - H_e \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

$\Delta H$  = Diferencia de entalpía del aire de secado ( $\text{kJ kg}^{-1}$ aire seco)

$H_s$  = Entalpía a la salida del aire de secado ( $\text{kJ kg}^{-1}$ aire seco)

$H_e$  = Entalpía a la entrada del aire de secado ( $\text{kJ kg}^{-1}$ aire seco)

## 2.12 Cálculo de la producción de suero de leche en polvo y queso deshidratado

La producción se determinó a partir de datos iniciales del suero de leche líquido y queso fresco (humedad y contenido de sólidos totales) así como el contenido de humedad y sólidos totales del suero de leche y queso deshidratado. Se realizó un balance de masa mediante el cual se calculó el contenido de producto seco en gramos a la salida; partiendo de este dato y conociendo el peso de la carga alimentada al secador se determinó la cantidad de gramos teóricos a la salida. La producción se calculó en  $\text{kg h}^{-1}$  empleando la ecuación 8 para el caso del suero de leche y la ecuación 9 para el caso del queso deshidratado.

$$P = G_{\beta} (1 + W_{mp}) (1 + X_{\beta}) \quad (\text{Ec. 8})$$

$$P = G_{\beta} (1 + X_{\beta}) \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:  $P$  = es la producción ( $\text{kg h}^{-1}$ ),  $G_{\beta}$  = es el alimento inicial ( $\text{kg/h}$ ),  $W_{mp}$  = es la cantidad de material de pared añadido ( $\text{kg/kg}$  sólido seco), y  $X_{\beta}$  es el contenido de agua ( $\text{kg de agua/kg}$  sólido seco).

## 2.13 Cálculo del costo

El costo total se considera como la suma del costo de la energía consumida durante el proceso de secado y el costo de la materia prima (suero de leche, queso, soporte); por lo tanto, el costo total está dado por la ecuación 10.

$$C_T = C_E + C_{MP} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:  $C_T$  = Costo total (\$  $\text{kg}^{-1}$  de producto seco),  $C_E$  = Costo de la energía consumida (\$  $\text{kg}^{-1}$ ),  $C_M$  = Costo de la materia prima (\$  $\text{kg}^{-1}$ ).

El costo de la energía se determinó multiplicando la energía requerida en el proceso de secado por el flujo del aire; una vez obtenido este valor, se obtiene el producto del kilowatt por hora (ecuación 11 y 12), Luna-Solano (2005).

$$C_E = (H_s - H_e) * \dot{G}_a \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

$$\dot{G}_a = \frac{v}{V} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

$C_E$  = Costo de la energía requerida (\$  $\text{h}^{-1}$ ),  $H_s$  = Entalpia a la salida del aire de secado ( $\text{kJ kg}^{-1}$  aire seco),  $H_e$  = Entalpia a la entrada del aire de secado ( $\text{kJ kg}^{-1}$  aire seco),  $\dot{G}_a$  = Caudal de aire ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ),  $\dot{v}$  = Flujo volumétrico del aspirador ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ),  $V$  = Volumen de aire seco ( $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ ).

## 2.14 Cálculo del rendimiento

El rendimiento del suero de leche y queso deshidratado se determinó realizando un balance de materia, el cual permitió calcular la cantidad teórica de suero de leche y queso deshidratado. El rendimiento va a estar en función principalmente de los productos deshidratados obtenido en los diferentes tratamientos de secado y queda expresado por la ecuación 10.

$$R = \left( \frac{S_{exp}}{S_{cal}} \right) * 100 \quad (\text{Ec. 13})$$

donde:  $R$  = Rendimiento (%),  $S_{exp}$  = Suero de leche experimental (g),  $S_{cal}$  = Suero de leche calculado (g)

### 2.15 Optimización del proceso de secado aspersion de suero de leche y secado por lecho fluidizado de queso fresco

La optimización del proceso de secado por aspersion de suero de leche y secado por lecho fluidizado de queso fresco se llevó a cabo mediante la técnica de superficie de respuesta. Para predecir el comportamiento de las variables de respuesta (humedad, actividad de agua, diferencia de color, energía, producción y costo) en función de los factores estudiados, se desarrollaron por regresión lineal múltiple polinomios de segundo orden; los cuales fueron empleados para elaborar gráficas de superficie de respuesta. Las condiciones óptimas del proceso de secado pueden ser determinadas a partir de la región derivada de la superposición de contornos en función de dos variables independientes, mientras que la otra variable independiente se mantiene constante. Esta técnica proporciona la región de operación factible al especificar los valores obtenidos en las gráficas de contorno para cada variable dependiente. La región factible es representada por la zona blanca. Con la ayuda del software Minitab 10 se localizaron los puntos óptimos de operación del proceso de secado por aspersion de suero de leche y secado por lecho fluidizado de queso fresco que cumplieron con las restricciones descritas a continuación:

$$\min X = fX(x_1, x_2, x_3); \quad \min \Delta E = f\Delta E(x_1, x_2, x_3)$$

$$\min En = fEn(x_1, x_2, x_3); \quad \min C_t = fC_t(x_1, x_2, x_3)$$

$$\max P = fP(x_1, x_2, x_3)$$

Sujeto a:

$$-1 \leq x_1, x_2, x_3 \leq 1$$

$$X = fX(x_1, x_2, x_3) \leq 0.10$$

Estas restricciones fueron consideradas debido a que el valor de las variables involucradas deben estar entre los valores de -1 y 1 (valores codificados de los valores reales); además en el caso de la humedad, para que un producto deshidratado sea considerado estable, deberá tener un contenido de humedad menor o igual a 0.10g H<sub>2</sub>O/g.s.s.

### 2.16 Validación de los puntos óptimos

Para validar los puntos óptimos de las variables del proceso de secado de queso fresco y suero de leche se realizará el secado por lecho fluidizado y secado por aspersion a las condiciones óptimas siguiendo la metodología para las corridas experimentales. El secado por lecho fluidizado de queso fresco y el secado por aspersion de suero de leche, se realizarán por duplicado, con el fin de obtener el porcentaje de error relativo entre el valor experimental y el predicho por el modelo para cada una de las variables de respuesta (ecuación 14).

$$E_R = \frac{|(V_{pred} - V_{exp})|}{V_{exp}} \times 100 \quad (\text{Ec. 14})$$

donde:  $E_R$ = Error relativo,  $V_{pred}$ = Valor predicho,  $V_{exp}$ = Valor experimental

**CAPITULO 3**  
**RESULTADOS Y DISCUSION**



# PARTE I

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### PARTE I. Resultados experimentales del proceso de secado por aspersion de suero de leche

##### 3.1. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de suero de leche

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se utilizó suero de leche proporcionado por los productores de queso de la región de Paso Carretas Tlalixcoyan del Estado de Veracruz, el cual se caracterizó fisicoquímica y microbiológicamente. La Tabla 3.1 muestra el promedio de los resultados del estudio de su caracterización.

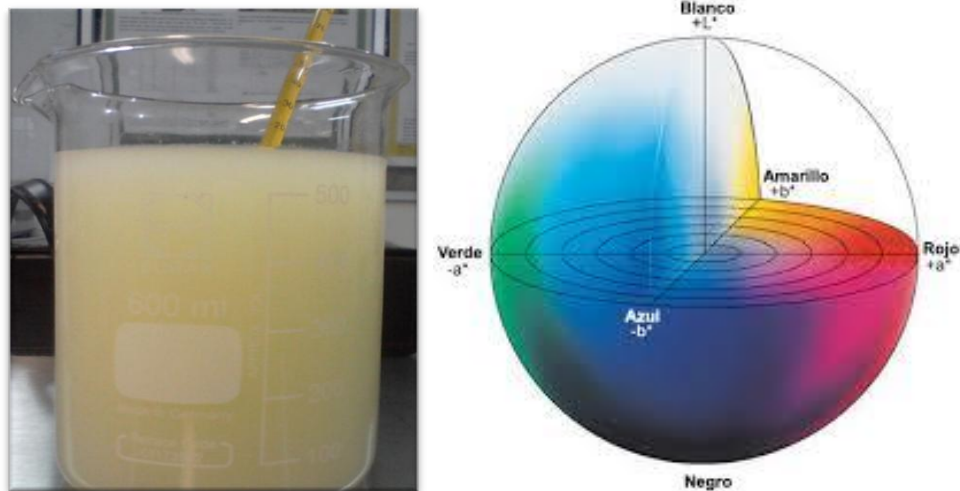
**Tabla 3.1 Caracterización fisicoquímica y microbiológica de suero de leche**

Análisis	Valores de medias $\pm$ desviación estándar
Humedad (%)	91.60 $\pm$ 0.283
Actividad de agua	0.993 $\pm$ 0.001
Sólidos totales (%)	8.40 $\pm$ 0.283
Contenido de proteínas (%)	0.92 $\pm$ 0.016
Contenido de ceniza (%)	0.52 $\pm$ 0.001
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.019 $\pm$ 0.000
pH	4.71 $\pm$ 0.001
L	54.56 $\pm$ 0.145
a	-0.42 $\pm$ 0.219
b	9.42 $\pm$ 0.123
Mesófilos (log UFC·ml <sup>-1</sup> )	5.40 $\pm$ 0.1443
Lactobacilos (log UFC·ml <sup>-1</sup> )	8.34 $\pm$ 0.091
Coliformes totales (log UFC·ml <sup>-1</sup> )	1.845 $\pm$ 0.077
Hongos y levaduras (log UFC·ml <sup>-1</sup> )	3.68 $\pm$ 0.056



Como se puede observar de manera evidente a partir de la Tabla 3.1, el suero de leche es considerado un subproducto altamente perecedero debido a que el contenido de humedad y el valor de actividad de agua son elevados; de acuerdo con la literatura, estos parámetros son indicativos de su propensión al deterioro ya que los productos frescos perecederos tienen  $a_w$  altas, normalmente superiores a 0.98 (Norbrillinda *et al.* 2016).

El contenido de sólidos totales del suero de leche es adecuado para llevarlo a un proceso de secado por aspersión propio para alimentos líquidos; sin embargo, resulta necesaria la adición de materiales de pared como la maltodextrina y sílica para evitar principalmente problemas de operación durante el proceso tales como pegajosidad en la cámara de secado. Por otra parte, analizando los parámetros de color, se observó que la luminosidad  $L$ , y la cromaticidad  $a$  y  $b$  ubican al suero de leche como un líquido de color amarillo verdoso con mínima luminosidad (Figura 3.1).



**Figura 3.1** Suero de leche y diagrama de Hunter  $L$ ,  $a$ ,  $b$

Finalmente, el contenido de proteínas del suero de leche se encontró por arriba de los valores reportados por Badui, 2006 (0.6 %), lo cual resultó de gran interés ya que el proceso de secado por aspersión permitirá aprovechar estas proteínas séricas como aditivos de fortificación en productos de consumo humano.

### **3.2 Humedad, actividad de agua y rendimiento del suero de leche**

El secado de alimentos, incluyendo frutas y vegetales, ha sido utilizado comúnmente para la remoción de la humedad y disminución del contenido de actividad de agua, con el objetivo de reducir el riesgo de desarrollo microbiano, para disminuir reacciones enzimáticas, y la degradación química (Naidu *et al.* 2012; Aktas *et al.* 2013).

El análisis de varianza (ANOVA) reveló que las variables independientes no influyeron significativamente ( $p \geq 0.10$ ) sobre el contenido de humedad, actividad de agua y rendimiento del suero de leche deshidratado. En la Tabla 3.2 se observa que, en general, los tratamientos que presentaron el mayor contenido de humedad fueron aquellos con la menor temperatura de aire de salida (80 °C); sin embargo, se observa claramente que todos los valores de humedad y actividad de agua se encontraron por debajo del 5.75% y 0.339, respectivamente, por lo que el producto deshidratado fue considerado estable dado que los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de agua es menor del 10% en peso (Tasirin *et al.* 2014). De acuerdo con la literatura, valores bajos de  $a_w$  proveen un alto grado de estabilidad microbiológica y química debido a la remoción del agua presente en el alimento y permite que grandes cantidades de alimento altamente perecedero puedan ser conservadas y estar disponibles a través del tiempo (Troller, 1980; Domínguez-Niño *et al.* 2016).

Finalmente, las gráficas de comparación de medias mostraron que las condiciones de operación que permitieron obtener el mayor rendimiento fueron: temperatura de aire de entrada de 180 °C, temperatura de aire de salida de 90 °C y 2% de material de pared.

**Tabla 3.2** Valores experimentales para la variable de respuesta humedad,  $a_w$  y rendimiento

Experimento	$T_{\gamma_0}$ (°C)	$T_{\gamma_s}$ (°C)	Soporte (%)	Humedad % (gH <sub>2</sub> O/g.s.s.)	$a_w$	Rendimiento %
1	180	80	0	4.46	0.212	31.89
2	180	100	0	2.82	0.218	34.85
3	220	80	0	4.95	0.302	21.24
4	220	100	0	3.17	0.166	39.23
5	180	80	5	2.08	0.125	36.09
6	180	100	5	2.05	0.128	30.55
7	220	80	5	5.20	0.339	27.47
8	220	100	5	5.75	0.337	8.56
9	200	90	2	3.00	0.247	53.85
10	200	100	2	2.33	0.209	30.28
11	200	80	2	4.21	0.312	48.29
12	220	90	2	3.34	0.239	37.19
13	180	90	2	3.76	0.220	52.68
14	200	90	5	2.81	0.174	31.09
15	200	90	0	3.34	0.207	38.66

### 3.3 Diferencia de color ( $\Delta E$ )

Debido a que el color tiene influencia sobre la aceptación o rechazo de los alimentos por el consumidor, fue necesario evaluar la diferencia de color  $\Delta E$  considerando los parámetros  $L$ ,  $a$ , y  $b$  del sistema Hunter. La diferencia total de color es un parámetro ampliamente empleado para evaluar la variación de color entre la muestra fresca y la muestra deshidratada

(Argyropoulos *et al.* 2011; Villegas-Santiago *et al.* 2011). Valores mayores de  $\Delta E$  denotan un mayor cambio de color respecto al material de referencia, mientras que valores bajos de  $\Delta E$  son considerados aceptables en los procesos de secado (Lozano-Acevedo *et al.* 2011). En la Tabla 3.3 se listan los valores de  $L$ ,  $a$ ,  $b$  y  $\Delta E$  del suero de leche deshidratado. Es importante mencionar que las muestras de suero de leche deshidratado fueron comparadas con un estándar de placa blanca para evaluar la diferencia de color con respecto a un blanco puro, por lo que los valores de  $\Delta E$  presentaron un cambio significativo. De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 3.3 se observó que los tratamientos que presentaron elevados valores de  $\Delta E$  fueron las muestras sin material de pared debido, en primer lugar, a que el suero de leche deshidratado presentó un incremento en los valores de  $b$  de 10 a 14, lo que indicó una ligera tendencia hacia la amarillez; por otro lado, el material de soporte encapsuló el producto durante la etapa de atomización y secado, por lo que los valores de  $L$  incrementaron mientras que los valores de  $b$  disminuyeron.

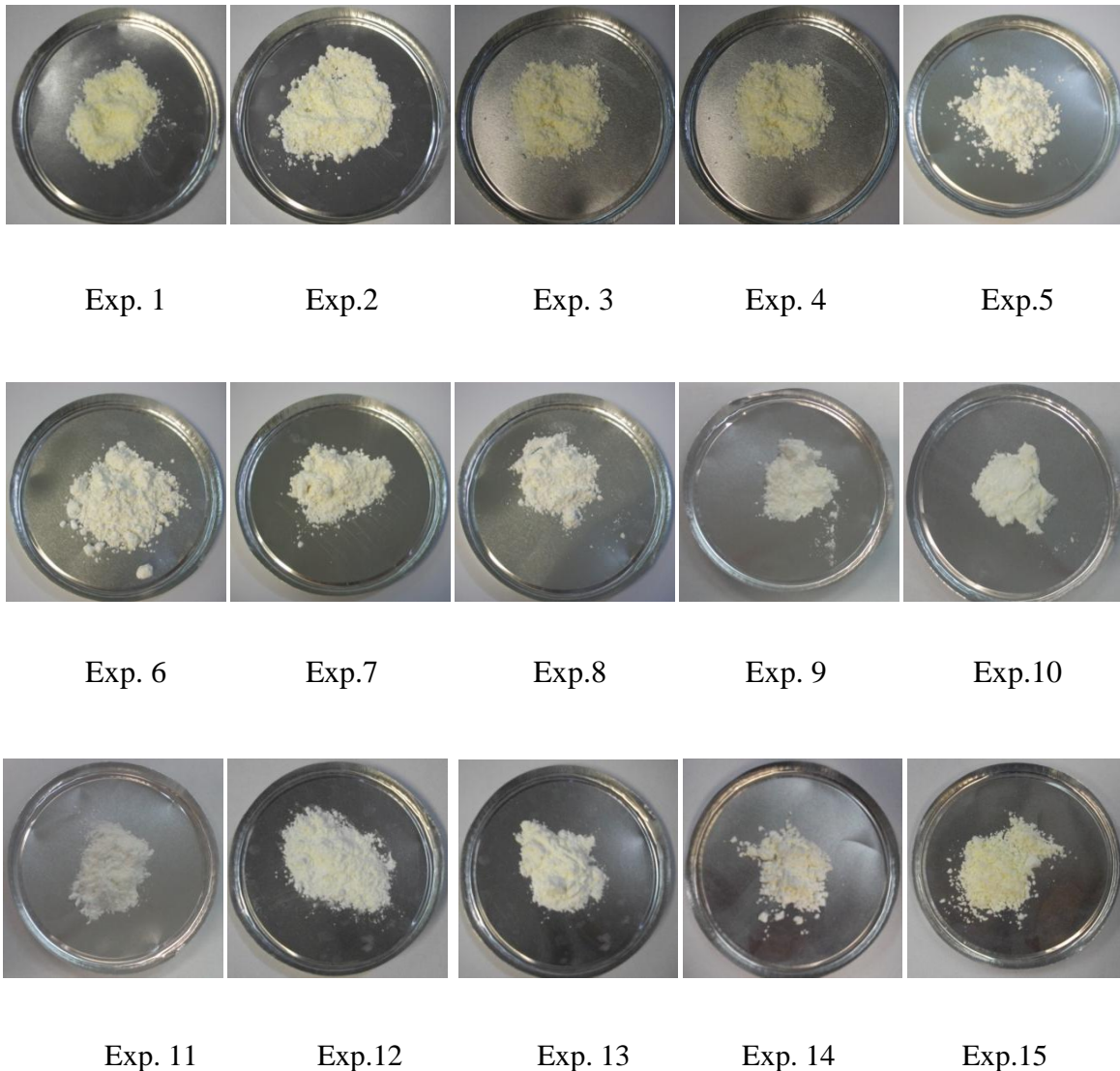
El análisis de varianza (ANOVA) reveló que la temperatura de aire de salida y el material de pared influyeron significativamente ( $p \leq 0.10$ ) sobre la diferencia de color final del suero de leche deshidratado. Los resultados de la Tabla 3.3 mostraron que a medida que se incrementa el porcentaje de material de pared de 2 a 5% y la temperatura de salida de 80 a 100 °C los parámetros de  $a$  y  $b$  disminuyen mientras que  $L$  incrementa. Este comportamiento puede ser atribuido al efecto de protección del material de pared al reducir la velocidad de las reacciones de Maillard (Vega y Roos, 2005). La Figura 3.2 muestra de manera clara la influencia del material de pared sobre la diferencia de color del suero de leche deshidratado, siendo el experimento 13 el que presentó la menor diferencia de color (18.44).

**Tabla 3.3** Valores experimentales para la variable de respuesta  $\Delta E$ 

Experimento	$T_{\gamma 0}$ (°C)	$T_{\gamma s}$ (°C)	Soporte (%)	Color			$\Delta E$
				$L$	$a$	$b$	
1	180	80	0	69.21	-2.09	14.11	25.7
2	180	100	0	71.06	-2.04	12.36	22.78
3	220	80	0	65.64	-1.84	13.74	28.3
4	220	100	0	68.91	-1.37	10.88	23.42
5	180	80	5	70.26	-0.38	4.37	19.31
6	180	100	5	70.08	-0.68	4.82	20.01
7	220	80	5	70.67	-1.51	9.05	20.91
8	220	100	5	72.25	-1.23	7.13	18.74
9	200	90	2	71.61	-0.59	4.13	18.6
10	200	100	2	71.69	-0.87	5.29	18.7
11	200	80	2	71.17	-0.69	4.65	19.04
12	220	90	2	71.51	-0.76	5.35	18.87
13	180	90	2	72.06	-0.78	5.54	18.44
14	200	90	5	73.23	-1.48	9.6	19.13
15	200	90	0	70.99	-1.69	12.03	22.57

Un efecto significativo de la concentración de la maltodextrina y la temperatura de entrada sobre la luminosidad del alimento en polvo fue observado por Mishra *et al.* (2013) quien evaluaron las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes de amla (*Emblica officinalis*) durante el secado por aspersión. Observaron que el nivel de maltodextrina y altas temperaturas de entrada generaban valores bajos de  $a$  y  $b$  y altos ángulos de hue. La razón probable de un alto grado de luminosidad del polvo de amla a una alta temperatura de entrada fue atribuido a la reducción de la velocidad de oxidación de los taninos. Los taninos reaccionan lentamente con

el calor en ausencia de oxígeno y forma un complejo de color oscuro. Probablemente, durante la rápida velocidad de secado en el secador por aspersión, los taninos tienen menos tiempo para reaccionar con el calor y disponibilidad de oxígeno y por tanto el color se degrada menos. Algo similar podría suceder con los lípidos del suero de leche durante el proceso de secado por aspersión.



**Figura 3.2** Muestras de suero de leche deshidratado

### 3.4 Consumo de energía, producción y costo del suero de leche

Los secadores son los mayores consumidores de energía, por esta razón, el bajo consumo energético es fundamental para los usuarios quienes se ocupan de la materia prima y de la generación de productos de bajo costo (Kudra, 2004).

Los resultados de consumo de energía, producción y costo del proceso de secado por aspersion del suero de leche se presentan en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Valores experimentales para la variable de respuesta consumo de energía, producción y costo

Experimento	$T_{y0}$ (°C)	$T_{ys}$ (°C)	Soporte (%)	Energía kW	Producción kg/h	Costo (\$/kg)
1	180	80	0	1.92585	0.0611	22.98
2	180	100	0	1.90765	0.0318	23.54
3	220	80	0	2.60049	0.0941	21.38
4	220	100	0	2.55219	0.0617	23.29
5	180	80	5	2.04900	0.2165	17.06
6	180	100	5	2.01660	0.0296	17.97
7	220	80	5	2.65050	0.0936	17.69
8	220	100	5	2.60590	0.0388	16.74
9	200	90	2	2.39550	0.0621	23.98
10	200	100	2	2.41270	0.0458	24.98
11	200	80	2	2.41270	0.0753	23.43
12	220	90	2	2.64330	0.0739	20.93
13	180	90	2	1.95370	0.0440	21.70
14	200	90	5	2.24090	0.0951	17.16
15	200	90	0	2.27026	0.0445	30.10

Algunos investigadores han estudiado las condiciones del proceso de secado por aspersión para conocer los factores que afectan el consumo de energía (Kudra, 2004; Baker and Mckenzie 2005; Al-Mansour 2011; Piatkowski *et al.* 2014; Masanet 2014; Schuck 2015). Sin embargo, no existen reportes sobre el consumo de energía del suero de leche directamente del proceso de elaboración de queso.

El análisis de varianza (ANOVA) reveló que los factores de estudio influyeron significativamente ( $p \leq 0.10$ ) sobre el consumo de energía del proceso de secado. Por otra parte, la temperatura de aire de salida mostró efecto significativo sobre la producción del suero de leche deshidratado. Finalmente, el costo de producción fue afectado significativamente por la temperatura de aire de entrada y material de pared.

### **3.5 Contenido de proteínas**

Los resultados del contenido de proteínas calculados para cada uno de los tratamientos con sus respectivas condiciones de secado se listan en la Tabla 3.5. Se observa de manera clara que los tratamientos que presentaron el mayor contenido de proteínas fueron aquellos que no contienen material de pared, independientemente de la temperatura de entrada o salida, el porcentaje de proteínas se mantuvo en un rango de 7.33 a 14.12%. Se observó una tendencia decreciente del contenido de proteínas a medida que se incrementó el porcentaje de material de pared, debido al aumento de los sólidos totales, los cuales diluyen los núcleos de proteínas en pequeñas cantidades. Como era de esperarse, el análisis estadístico indicó que el material de pared influyó significativamente ( $p \leq 0.10$ ) sobre el contenido de proteínas del suero de leche deshidratado.



**Tabla 3.5** Valores experimentales para la variable de respuesta proteínas

Experimento	$T_{\gamma 0}$ (°C)	$T_{\gamma s}$ (°C)	Soporte (%)	Proteínas (%)
1	180	80	0	14.00
2	180	100	0	13.81
3	220	80	0	13.58
4	220	100	0	14.12
5	180	80	5	7.720
6	180	100	5	7.620
7	220	80	5	7.540
8	220	100	5	7.330
9	200	90	2	11.85
10	200	100	2	11.12
11	200	80	2	11.09
12	220	90	2	11.21
13	180	90	2	11.37
14	200	90	5	8.10
15	200	90	0	14.03

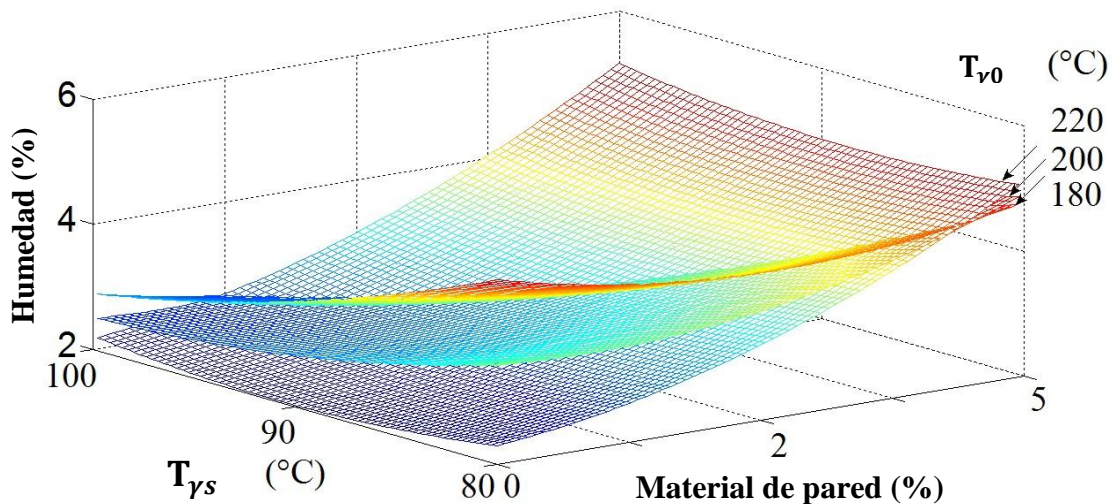
### 3.6 Superficie de respuesta

Para predecir el comportamiento de las variables de respuesta (humedad, actividad de agua, diferencia de color, energía, producción y costo) en función de los factores estudiados (temperatura de aire de entrada, temperatura de aire de salida y material de pared), se desarrollaron por regresión lineal múltiple polinomios de segundo orden; los cuales fueron empleados para elaborar gráficas de superficie de respuesta.

### 3.6.1 Humedad

Se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales del contenido de humedad mostrados en la Tabla 3.2 en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 84.40 ( $p=0.10$ ) es representado en la ecuación 3.15:

$$\%X = 3.03 + 0.724X_1 - 0.478X_2 - 0.085X_3 + 0.055X_1X_2 + 0.747X_1X_3 + 0.492X_2X_3 + 0.512X_1^2 + 0.232X_2^2 + 0.037X_3^2 \quad (\text{Ec. 3.15})$$



**Figura 3.3** Superficie de respuesta de humedad como una función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

En la Figura 3.3 se observó que las muestras de suero de leche secadas a temperatura del aire de entrada de 220 °C, temperatura de aire de salida 100 °C y 0 % de material de pared, presentaron contenidos de humedad inferiores en comparación con las muestras secadas a 200 °C y 180 °C de temperatura de aire de entrada. Sin embargo, el suero de leche deshidratado mostró una tendencia a retener más humedad al incrementar las cantidades de material de

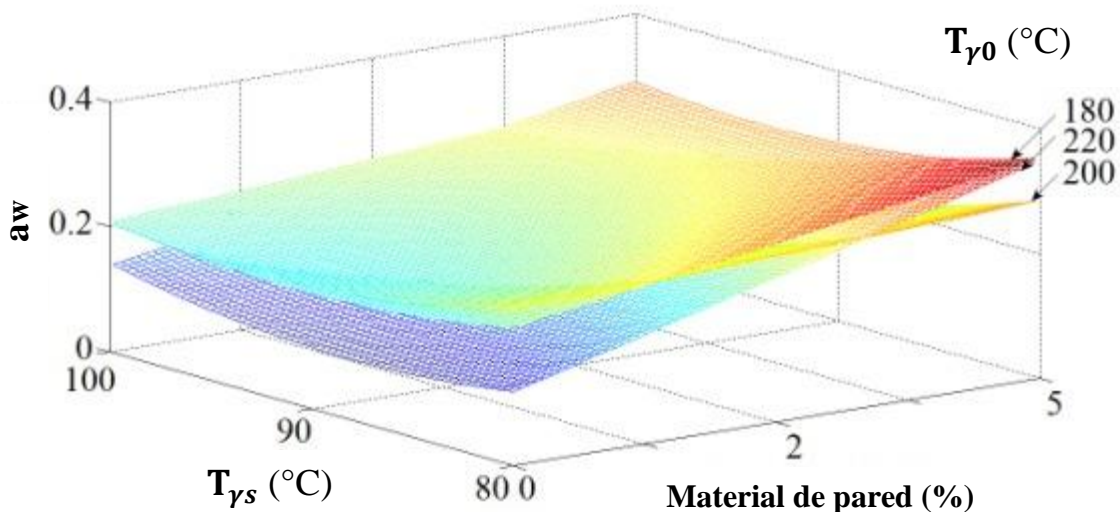
pared. La última observación está de acuerdo con Adhikari *et al.* 2007 y Bicudo *et al.* 2015, donde se observó que el contenido de humedad aumentó a medida que la concentración de maltodextrina aumentaba porque es difícil para las moléculas de agua difundirse a través de las moléculas de maltodextrina. Los presentes hallazgos son contradictorios a los resultados obtenidos para el secado por aspersión de jugo de amla (*Emblica officinalis*) por Mishra *et al.* 2013, quien reportó que el incremento en la concentración de maltodextrina resultó en una disminución en el contenido de humedad del polvo. A medida que la concentración de maltodextrina incrementó de 5 al 9%, el contenido de humedad de las muestras de tomate en polvo disminuyó de 5.6 a 3.8%. Abadio *et al.* (2004) observó que el incremento de los niveles de maltodextrina del 10 al 15 % (w/v) provocó la disminución del contenido de humedad del jugo de piña en polvo. El incremento del nivel de material de pared aumenta el nivel de sólidos del alimento y reduce el nivel de la humedad total para la evaporación (Grabowski *et al.*, 2006; Kha *et al.*, 2010; Solvol *et al.*, 2012). El comportamiento creciente del contenido de humedad en la Figura 3.11 es consistente con lo que reportó Goula y Adamopoulos (2004) al estudiar la influencia de las condiciones sobre las propiedades del tomate en polvo durante el secado por aspersión; concluyó que un incremento de la temperatura provoca una disminución de la humedad; sin embargo, el incremento de la temperatura también se asoció con la disminución de la densidad, así, incrementando la temperatura del aire de secado generalmente se produce un incremento en el tamaño de la partícula y una gran tendencia de las partículas a ser porosas y por tanto de baja densidad. Además, mientras más grande sea el área de superficie de contacto de las partículas pequeñas provee de más superficie de la cual la humedad puede escapar (Walton *et al.*, 2000; Goula y Adamopoulos, 2004). En este caso, el incremento de la temperatura del aire de entrada puede producir un incremento en el contenido

de humedad del suero de leche deshidratado generado por el incremento en el tamaño de partícula y la disminución de la densidad.

### 3.6.2 Actividad de agua

Los datos experimentales de actividad de agua presentados en la Tabla 3.2 se emplearon para desarrollar un modelo de polinomios de segundo para predecir la  $a_w$ . El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 86.27 ( $p=0.10$ ) se indica en la ecuación 3.16:

$$a_w = 0.232 + 0.0480X_1 - 0.0232X_2 - 0.0002X_3 - 0.0184X_1X_2 + 0.0481X_1X_3 + 0.0164X_2X_3 + 0.0011X_1^2 + 0.0321X_2^2 + 0.037X_3^2 \quad (\text{Ec. 3.16})$$



**Figura 3.4** Superficie de respuesta de  $a_w$  como una función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

La Figura 3.4 muestra que el comportamiento de la  $a_w$  del producto deshidratado fue variable puesto que los valores mínimos de actividad de agua se generaron cuando la temperatura de entrada fue de 220 °C y 90 °C de temperatura de salida; sin embargo, la variable de respuesta siguió una tendencia ascendente hacia el nivel medio y alto del material de pared. El efecto de

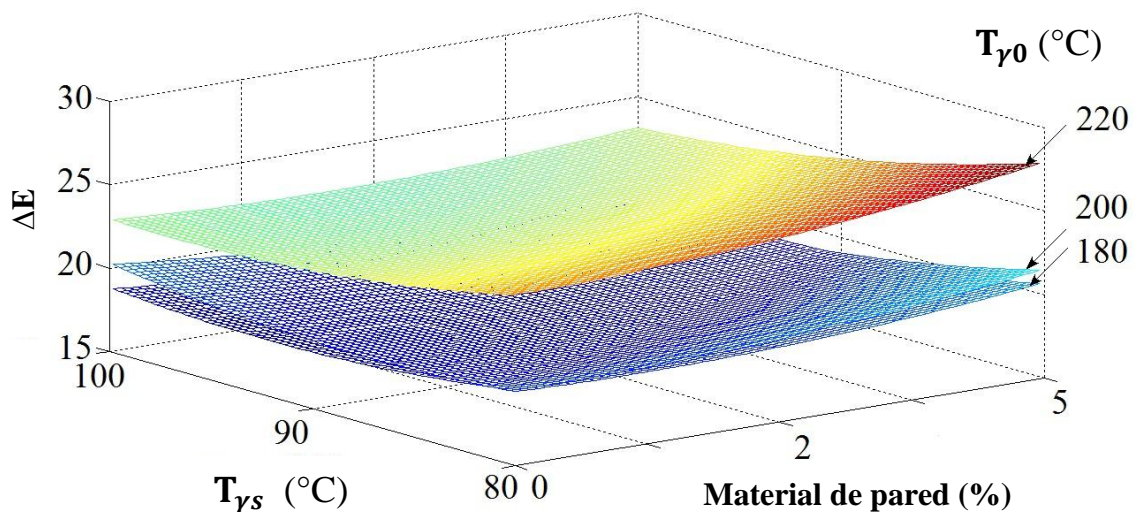
las variables independientes sobre la actividad de agua es congruente con el presentado en la Figura 3.3 para el contenido de humedad. Los resultados mostraron que el contenido de humedad y actividad de agua del suero de leche deshidratado aumentaron con el incremento en la concentración del material de pared. Esta última observación puede ser atribuida a la dificultad de difusión de las moléculas de agua para transportarse a través de las moléculas del material de pared (Goula y Adamopoulos, 2010). Por otra parte se observa que los valores menores de actividad de agua en muestras de suero de leche deshidratado se presentaron a temperatura de secado de 220 °C sin material de pared. La literatura claramente demuestra que a altas temperaturas, la velocidad de evaporación del agua es alta, influyendo en el contenido de humedad y en consecuencia en la actividad de agua del producto (Villegas-Santiago *et al.* 2011; Vahidhosseini *et al.* 2016). Por lo tanto, las muestras de suero de leche deshidratado pueden ser consideradas libre de crecimiento microbiano (Correa *et al.* 2011; Cantalejo *et al.* 2016), debido a que, de acuerdo con Troller (1980), hongos xerofílicos y levaduras osmofílicas generalmente crecen entre valores de 0.60 y 0.60 de  $a_w$ . Varios investigadores como Toro-Sierra *et al.* 2013; Chávez-Rodríguez *et al.* 2015; Verma y Singh, 2015; han obtenido similares resultados durante el proceso de deshidratación de proteínas de suero de leche, jugo de agave, frutas y vegetales respectivamente.

### **3.6.3 Diferencia de color**

A partir de los resultados obtenidos experimentalmente para la diferencia de color (Tabla 3.3), se realizó la regresión lineal en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 97.27 ( $p=0.10$ ) es representado en la ecuación 3.17.

$$\Delta E = 18.2 + 0.400X_1 - 0.961X_2 - 2.47X_3 - 0.604X_1X_2 - 0.364X_1X_3 + 0.791X_2X_3 + 0.598X_1^2 + 0.813X_2^2 + 2.79X_3^2 \quad (\text{Ec. 3.17})$$

En la Figura 3.5 se observa que los valores más bajos de  $\Delta E$  se obtuvieron a una temperatura de aire de entrada de 200 °C, con una temperatura de aire de salida de 90 °C y 2% de material de pared; sin embargo, por condiciones de consumo de energía se elige una temperatura de entrada de 180 °C ya que de acuerdo al análisis estadístico no existieron diferencias significativas de la temperatura de entrada sobre la variable de respuesta, por tanto esto indica que los tratamientos a estas condiciones de secado se alejan menos del estándar de la placa blanca, por lo que se obtiene un producto deshidratado con una blancura aceptable. Quek *et al.* 2007 deshidrataron por aspersion agua de melón empleando dos diferentes concentraciones de maltodextrina (3 y 5%) con un equivalente de dextrosa de 8 a 12, concluyeron que a concentraciones menores de maltodextrina el producto mantenía su color original.



**Figura 3.5** Superficie de respuesta de  $\Delta E$  como una función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

De acuerdo con la bibliografía, el uso de maltodextrina como aditivo de secado ha sido empleado desde hace mucho tiempo, con la finalidad de proteger componentes sensibles de los alimentos contra condiciones ambientales desfavorables, enmascarar o preservar sabor y aroma, reducir la volatilidad y reactividad y hacer atractivo el producto deshidratado por los consumidores (Verma y Singh, 2015).

### 3.6.4 Energía

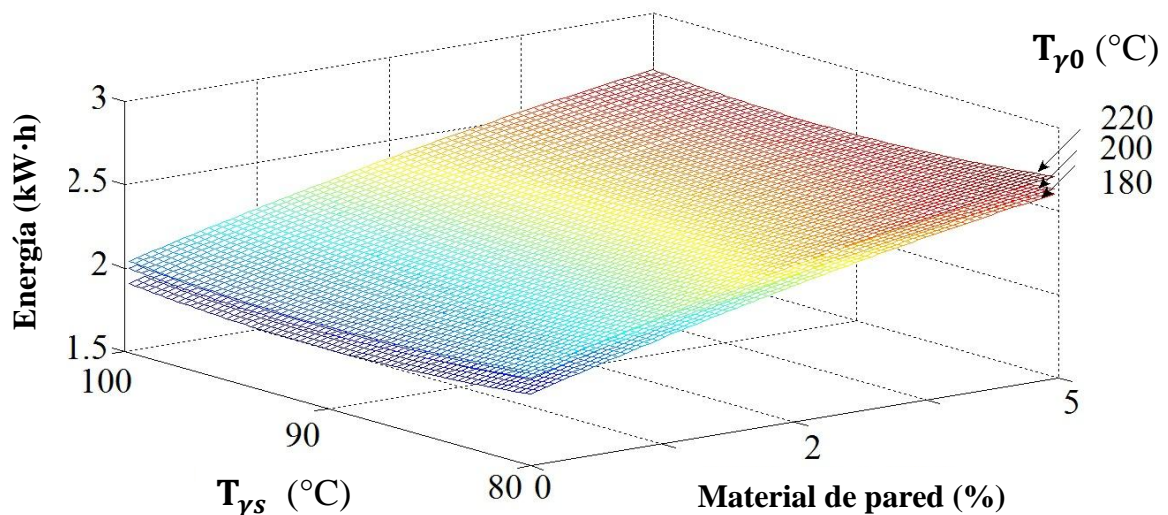
Se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales del consumo de energía mostrados en la Tabla 3.4 en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 99.12 ( $p=0.10$ ) se indica en la ecuación 3.18:

$$\begin{aligned} \text{Energía} = & 2.36 + 0.320X_1 - 0.0144X_2 + 0.0306X_3 - 0.0053X_1X_2 - 0.0160X_1X_3 + \\ & 0.0013X_2X_3 + 0.0469X_1^2 + 0.0673X_2^2 - 0.0898X_3^2 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

En la Figura 3.6 se observa que las condiciones con las que se genera el menor consumo de energía son: temperatura de entrada del aire de 180 °C, temperatura del aire de salida 90 °C y 0 % de material de pared. Se observó una tendencia creciente del consumo de energía a medida que se incrementó el porcentaje de material de pared. La explicación más probable al incremento en el consumo de energía puede ser adscrito a la correlación de las variables independientes con el contenido de humedad, contenido de sólidos totales y velocidad del flujo de alimentación, debido a que, primeramente, la temperatura de salida incrementa proporcionalmente con el aumento de la temperatura de entrada, por tanto, es necesario intensificar el flujo de alimentación para alcanzar la temperatura de salida deseada. En segundo lugar, el contenido de sólidos totales de la solución de suero de leche incrementó por



la concentración del material de pared, por esta razón, la cantidad de agua a ser evaporada disminuyó; así fue necesario un incremento en el flujo de alimentación (Kudra, 2004; Masanet *et al.* 2014). Esta última observación fue consistente con los resultados obtenidos por Al-Mansour *et al.* (2011) quienes demostraron que el consumo de energía específica de un secador por aspersión planta piloto disminuye con el aumento de la temperatura a lo largo del secador, flujo de alimentación y velocidad de evaporación e incrementó con el aumento de la temperatura de salida. Esto atribuido al hecho de que la humedad disminuye con un incremento en la temperatura de salida y es requerida más energía para remover la humedad bajo estas condiciones.



**Figura 3.6** Superficie de respuesta de energía como una función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

El incremento del consumo de energía al aumentar la temperatura de secado es consistente con lo reportado por Domínguez-Niño *et al.* 2016 durante el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco mexicano, quienes al evaluar el consumo de energía encontraron que el incremento de la temperatura de 50 a 70 °C y el tiempo de secado de 60 a 120 min

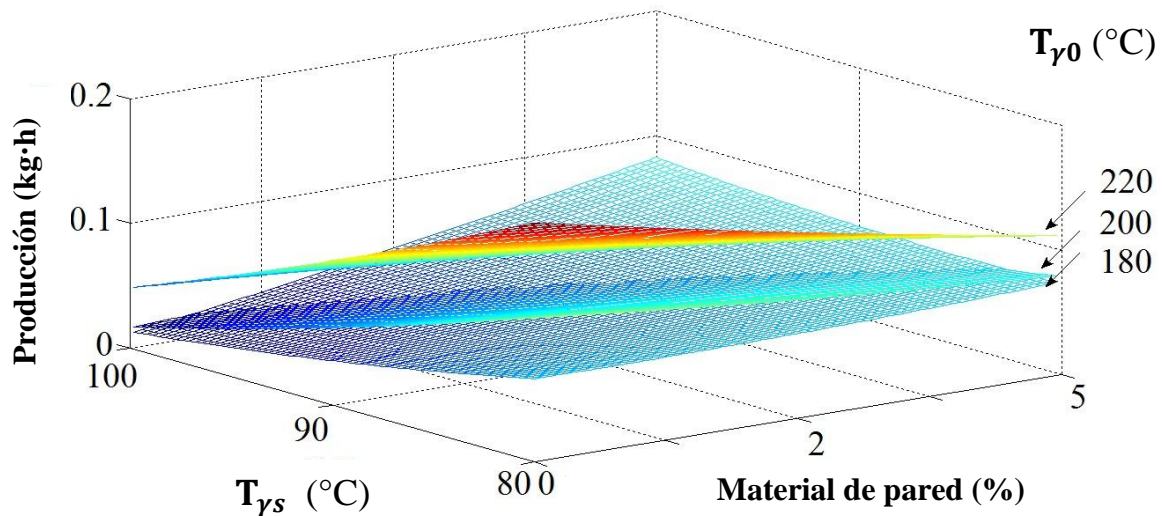


influyeron significativamente sobre el consumo energético obteniendo valores en un rango de 0.5292 a 1.7600 kW.

### 3.6.5 Producción

Para predecir la producción del suero de leche deshidratado se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales presentados en la Tabla 3.4 obtenidos durante el secado por aspersión, en función de las variables independientes de secado. El modelo de polinomios de segundo orden que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 86.29 ( $p=0.10$ ) se indica en la ecuación 3.19:

$$\text{Producción} = 0.0574 - 0.00209X_1 - 0.0333X_2 + 0.0180X_3 + 0.0161X_1X_2 - 0.0221X_1X_3 - 0.0225X_2X_3 + 0.0027X_1^2 + 0.0044X_2^2 + 0.0136X_3^2 \quad (\text{Ec. 3.19})$$



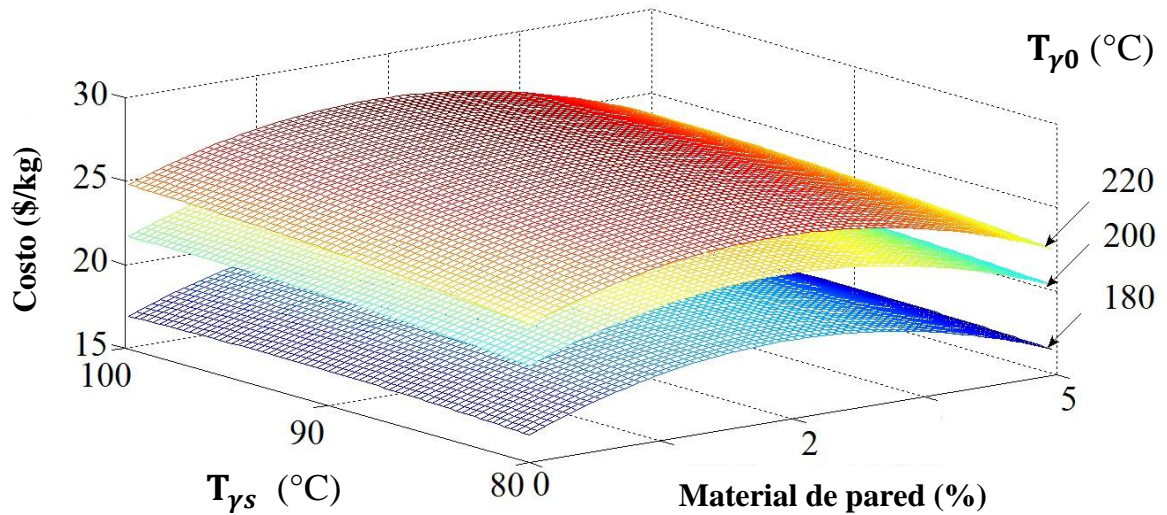
**Figura 3.7** Superficie de respuesta de producción como una función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

El análisis de varianza reveló que la temperatura de salida influyó significativamente ( $p \leq 0.10$ ) sobre la producción de suero de leche deshidratado. En la Figura 3.7 se observa de manera clara que al aumentar la temperatura de salida disminuyó la producción debido a la reducción del contenido de humedad del producto deshidratado. Un comportamiento similar fue reportado por Luna-Solano *et al.* 2005 durante la optimización del proceso de secado por aspersión de levadura de cerveza. Sus resultados demostraron que la producción de la levadura deshidratada aumentó a las más bajas temperaturas de aire de salida. Esto era esperado porque a bajas temperaturas de salida mayor contenido de humedad y por tanto mayor producción (Luna-Solano *et al.* 2005; Kozanoglu *et al.* 2012; Domínguez-Niño *et al.* 2016). La literatura claramente demuestra que el efecto de la temperatura de aire de salida sobre la producción tiene relación con el contenido de humedad, densidad, sólidos totales y tamaño de partícula. Generalmente, en un sistema de secado por aspersión, la temperatura de aire de salida controla la humedad residual en los polvos deshidratados. Un contenido de humedad bajo puede ser logrado a altas temperaturas de aire de salida. La humedad del aire también puede ser un factor. Una alta humedad del aire del ambiente puede requerir un aumento en la temperatura de aire de salida para mantener el contenido de humedad deseado (Goula y Adamopoulos, 2005).

### **3.6.6 Costo**

Se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales del costo de producción mostrados en la Tabla 3.4 en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 87.39 ( $p=0.10$ ) fue representado en la ecuación 3.20.

$$\text{Costo} = 24.4 - 0.321X_1 + 0.399X_2 - 3.47X_3 - 0.064X_1X_2 + 0.158X_1X_3 - 0.314X_2X_3 - 3.16X_1^2 - 0.27X_2^2 - 0.84X_3^2 \quad (\text{Ec. 3.20})$$



**Figura 3.8** Superficie de respuesta de costo como una función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

El análisis de varianza demostró que la temperatura de aire de entrada y el material de pared influyeron significativamente ( $p \leq 0.10$ ) sobre el costo de producción de suero de leche deshidratado. En la Figura 3.8 se observa de manera clara que el costo de producción aumentó a medida que la temperatura de aire de entrada incrementa, igualmente se observa que la reducción de la energía tuvo un impacto directo sobre el costo de producción, por lo tanto, la disminución de la temperatura de aire de salida disminuyó el costo de producción. La literatura establece que, mientras más amplia sea la diferencia entre la temperatura de aire de entrada y la temperatura de aire de salida, habrá más energía disponible para la evaporación del agua de la emulsión. Una velocidad de evaporación alta en el secador significa un aumento en el rendimiento y por lo tanto una reducción en el costo; es decir, más producto es generado

por hora con un menor costo de producción (Al-Mansour *et al.* 2011). Por otra parte, una concentración alta de material de pared aumenta la concentración de sólidos y reduce el contenido de agua a ser evaporada y como consecuencia el costo energético disminuye (Augustin *et al.* 2014). Así, la Figura 3.8 muestra que el menor costo de producción de suero de leche deshidratado fue obtenido a temperatura de aire de entrada de 180 °C, temperatura de aire de salida de 80 °C y 5% de material de pared.

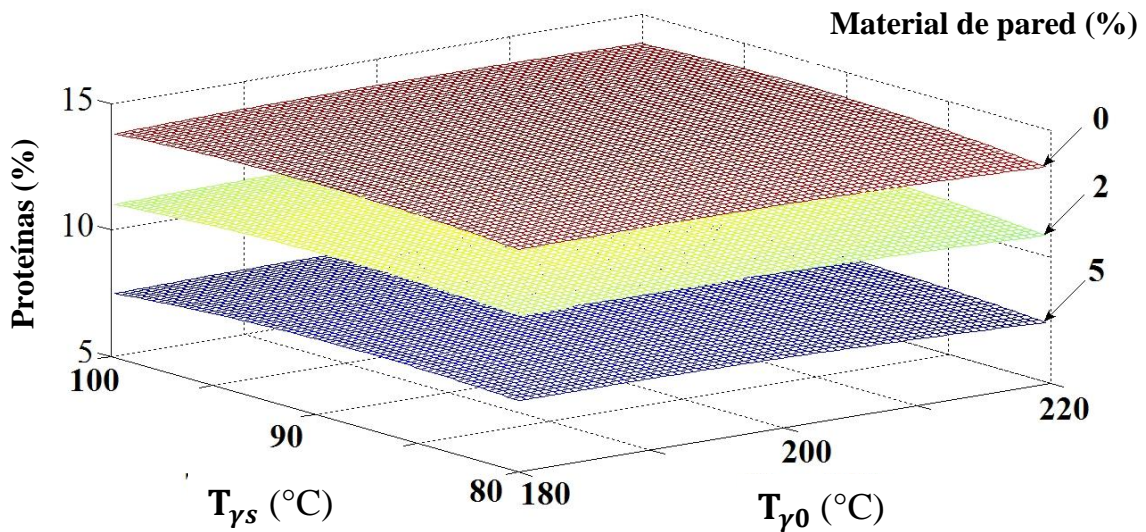
Aunque el objetivo principal de cualquier proceso de secado sea reducir el deterioro del alimento y mejorar su calidad para generar un producto deshidratado a un mínimo costo (Pérez-Francisco *et al.* 2008; Jangam *et al.* 2010), desafortunadamente existe poca información publicada sobre el costo de equipo y procesos ya que la mayoría de información es retenida por la industria y mantenida como confidencial (Kudra, 2014). Luna-Solano *et al.* 2005 y Pérez-Francisco *et al.* 2008 reportaron las condiciones de operación del proceso de secado por aspersión de levadura de cerveza (*Saccharomyces sp*) y secado por charolas de chayote (*Sechium edule*) con la finalidad de lograr un costo de producción mínimo. Recientemente Domínguez-Niño *et al.* 2016 evaluaron el costo de producción del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco mexicano, de acuerdo con sus resultados el costo de producción durante el proceso de secado se encontró en un rango de 72.11 a 87.20 \$/kg.

### **3.6.7 Proteínas**

A partir de los resultados obtenidos experimentalmente para el contenido de proteínas (Tabla 3.5), se realizó la regresión lineal en función de las variables independientes estudiadas. El

modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 99.68 ( $p=0.10$ ) se indica en la ecuación 3.21:

$$\text{Proteínas} = 11.5 - 0.0740X_1 + 0.0070X_2 - 3.12X_3 + 0.0775X_1X_2 - 0.0450X_1X_3 - 0.0825X_2X_3 - 0.136X_1^2 - 0.321X_2^2 - 0.361X_3^2 \quad (\text{Ec. 3.21})$$



**Figura 3.9** Superficie de respuesta de contenido de proteínas como una función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

La Figura 3.9 muestra el efecto de la interacción de las variables independientes sobre el contenido de proteínas. Se observa de manera clara que el mayor contenido de proteínas se obtuvo a una temperatura de aire de entrada de 220 °C y temperatura de aire de salida de 100 °C. El incremento en la concentración del material de pared resultó en la disminución del contenido de proteínas. La razón probable para este comportamiento puede ser debido al material de pared, debido a que éste incrementa el contenido de sólidos y los núcleos de proteínas se diluyen en pequeñas cantidades. Por otra parte, se observó una relación entre los sólidos totales y el contenido de humedad, ya que la cantidad de sólidos incrementa a medida

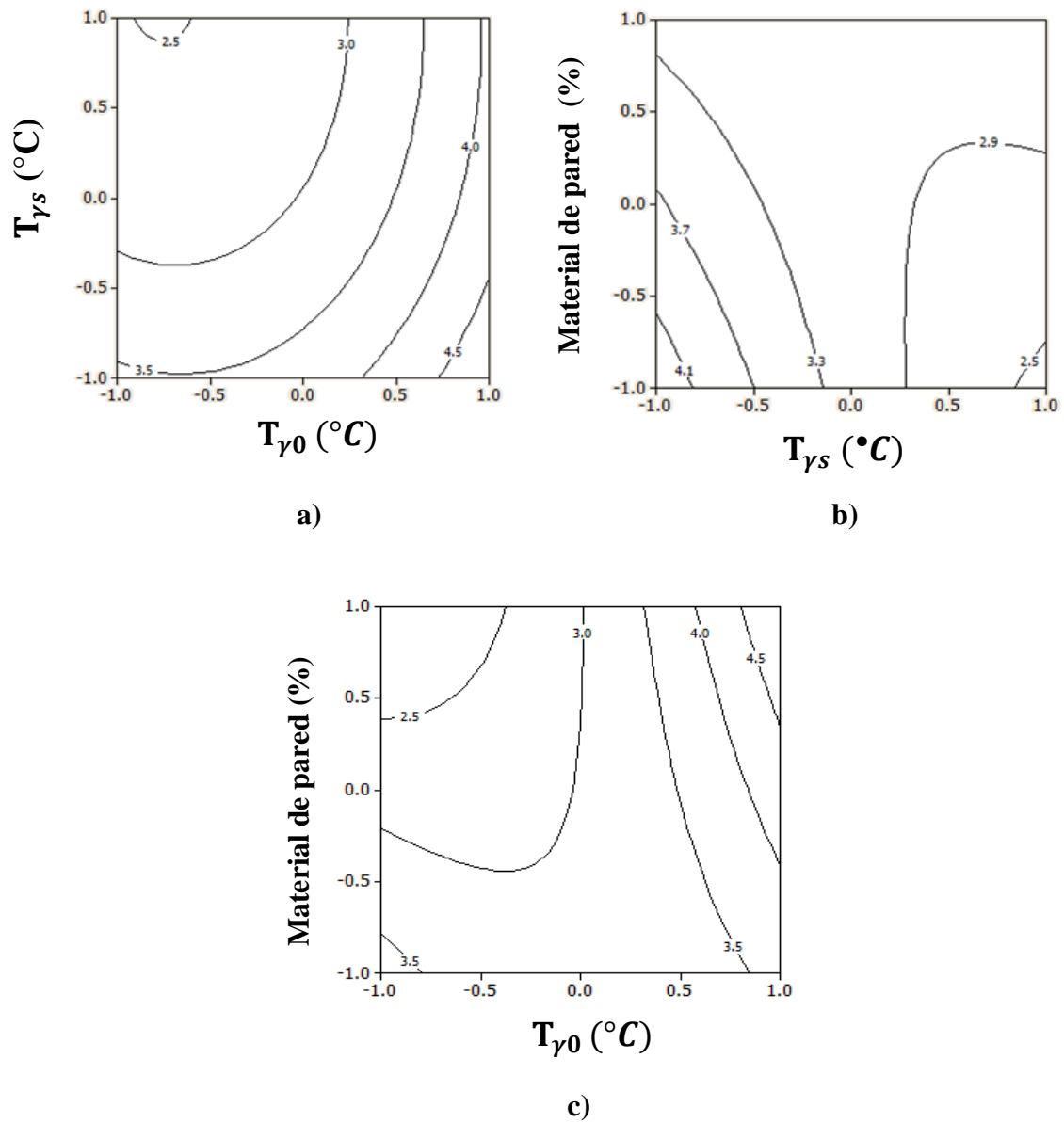
que disminuye la humedad del producto por el incremento de la temperatura de aire de entrada y salida. El contenido de humedad disminuye debido a la velocidad de transferencia a altas temperaturas (Anandharamakrishnan *et al.* 2007; Kha *et al.* 2010; Caliskan *et al.* 2013 y Toro Sierra *et al.* 2013).

### **3.7 Gráficas de contorno**

A partir de los modelos de segundo orden descritos en la sección anterior se generaron los gráficos de contornos para cada una de las variables de respuesta (humedad, actividad de agua, rendimiento, diferencia de color, energía, producción, costo y proteínas) empleando el software Minitab 10. Se realizó un análisis de las regiones óptimas para cada factor con la finalidad de obtener las zonas factibles para localizar el valor mínimo o máximo deseado.

#### **3.7.1 Humedad**

En la Figura 3.10 se observa que la región donde se presentó el menor contenido de humedad final (menor de 2.5 H<sub>2</sub>O/g.s.s) se encontró en el intervalo de temperatura de aire de entrada de 180 a 186 °C (valores codificados de -0.1 y -0.7 respectivamente) con temperatura de aire de salida de 97 a 100 °C (valores codificados de 0.7 y 1).

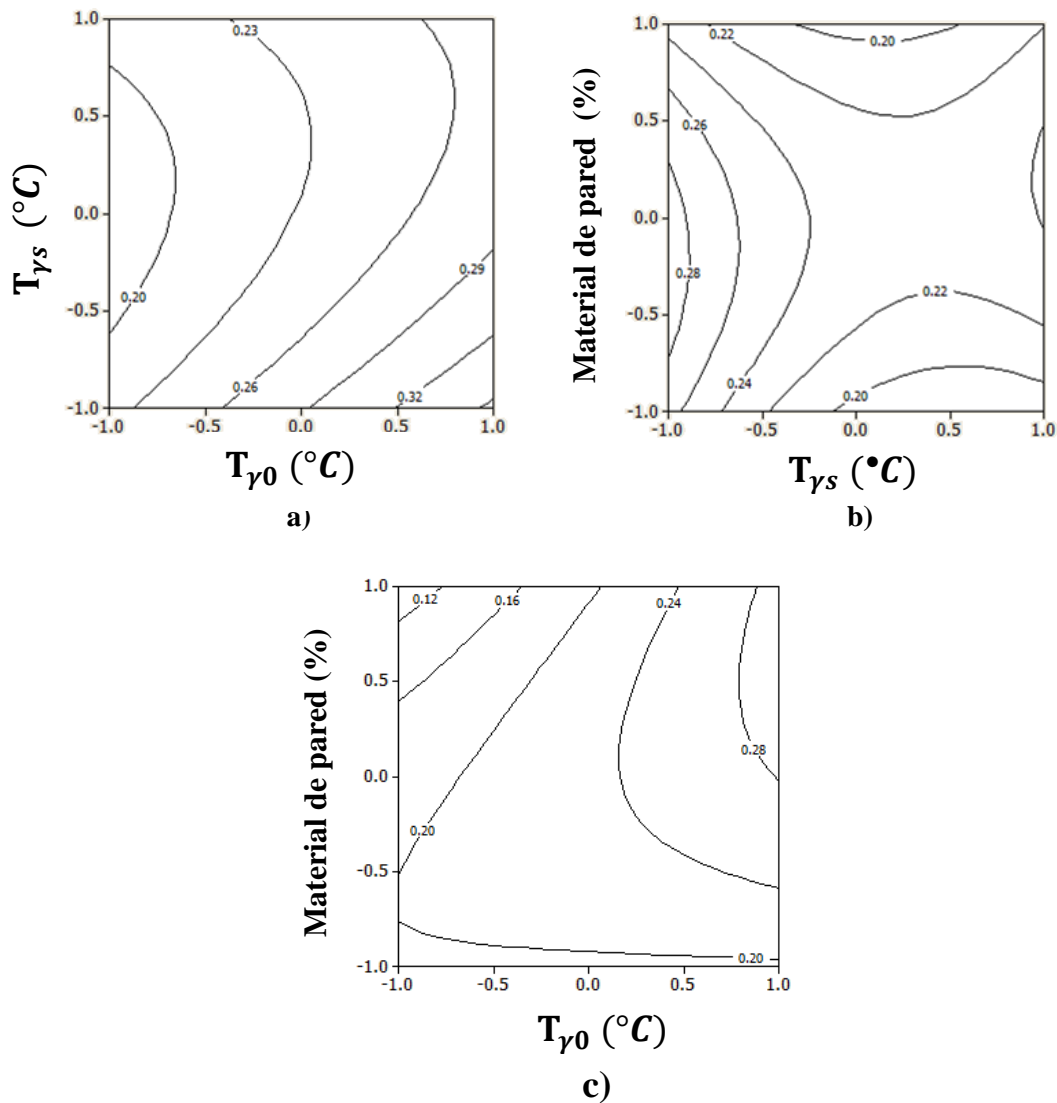


**Figura 3.10** Gráficas de contornos del contenido de humedad en función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

### 3.7.2 Actividad de agua

Se realizó un análisis de las regiones óptimas para cada factor con la finalidad de obtener el mínimo contenido de  $a_w$  (menor a 0.6). En la Figura 3.11a se observa que la región que presenta el mínimo contenido de actividad de agua (menor a 0.20) se obtiene a una

temperatura de aire de entrada de 180 a 186°C (valores codificados de -1 y -0.7). Por otra parte en la Figura 3.11b se observa un punto de silla, debido a esto es difícil dar una interpretación ya que no se cuenta con una región donde se encuentre un máximo o un mínimo. En la Figura 3.11c se observa que la región donde se encuentra el menor contenido de  $a_w$  (menor a 0.20) se obtiene con valores de temperatura de aire de entrada de 180 a 220 °C (valores codificados de -1 a 1) con un porcentaje de material de pared de 0 a 5 % (valores codificados de -1 a 1).

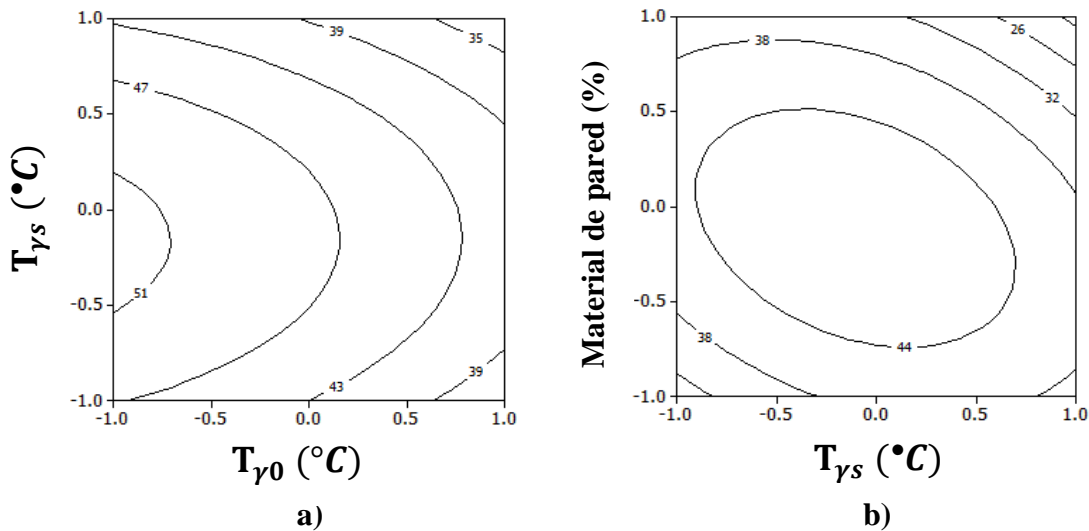


**Figura 3.11** Gráficas de contornos de actividad de agua en función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material

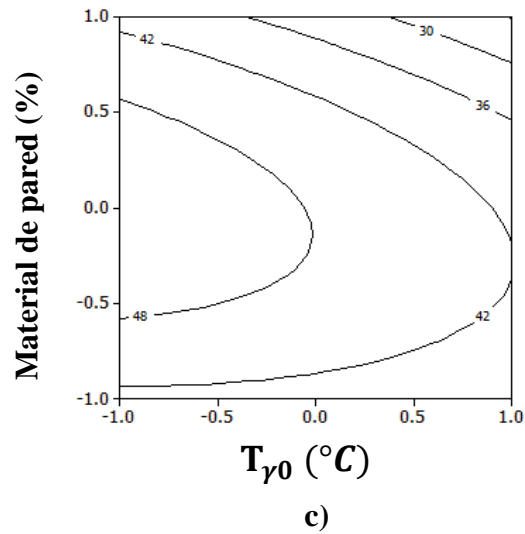


### 3.7.3 Rendimiento

En la Figura 3.12a se observa que la región donde se obtuvo el máximo rendimiento (mayor a 51%) se logró empleando una temperatura de aire de entrada de 180 a 186 °C (valores codificados de -1 y -0.7) con una temperatura de aire de salida de 85 a 92 °C (valores codificados de -0.5 a 0.2). Así mismo en la Figura 3.12b se observa que la región que presentó el máximo rendimiento (mayor a 44 %) se encontró con una temperatura de aire de salida de 81 a 97 °C (valores codificados de -1 a 0.7) con un porcentaje de material de pared de 0.6 a 3.5% (valores codificados de -0.7 y 0.5). Finalmente en la Figura 3.12c se observa que la región que presentó el máximo rendimiento (mayor a 48 %) se logró a una temperatura de aire de entrada de 180 a 200°C (valores codificados de -1 y 0) con un porcentaje de material de pared de 0.8 a 3.8 % (valores codificados de -0.6 y 0.6).



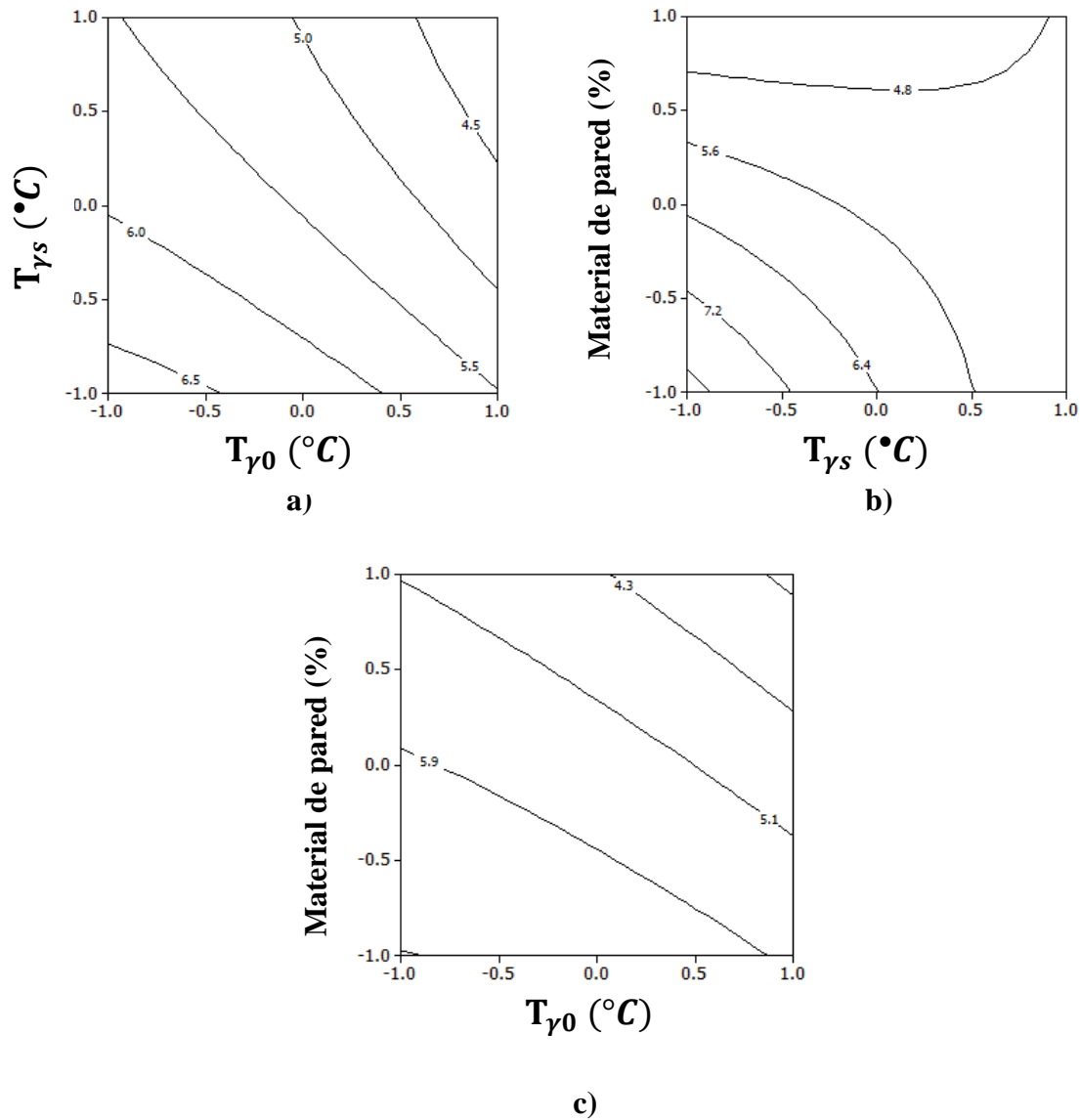
Continúa Figura 3.12...



**Figura 3.12** Gráficas de contornos de rendimiento en función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

### 3.7.4 Diferencia de color

En la figura 3.13a se observa que la región que presentó la mínima diferencia de color (menor a 4.5) se obtiene a una temperatura de aire de entrada de 212 a 220 °C (valores codificados de 0.6 y 1), con un porcentaje de material de pared de 2.6 a 5% (valores codificados de 0.2 y 1). Así mismo, la Figura 3.13b muestra que la menor diferencia de color (menor a 4.8) se logró empleando una temperatura de salida de 80 a 99 °C (valores codificados de -1 y 0.9 respectivamente) con un porcentaje de material de pared de 4.1 y 5 % (valores codificados de 0.7 y 1). Finalmente, la Figura 3.13c muestra que la región con la menor diferencia de color (menor a 4.3) se logró empleando una temperatura de aire de entrada de 202 a 220 °C (valores codificados de 0.1 y 1) con un porcentaje de material de pared de 2.9 y 5 % (valores codificados de 0.3 y 1).

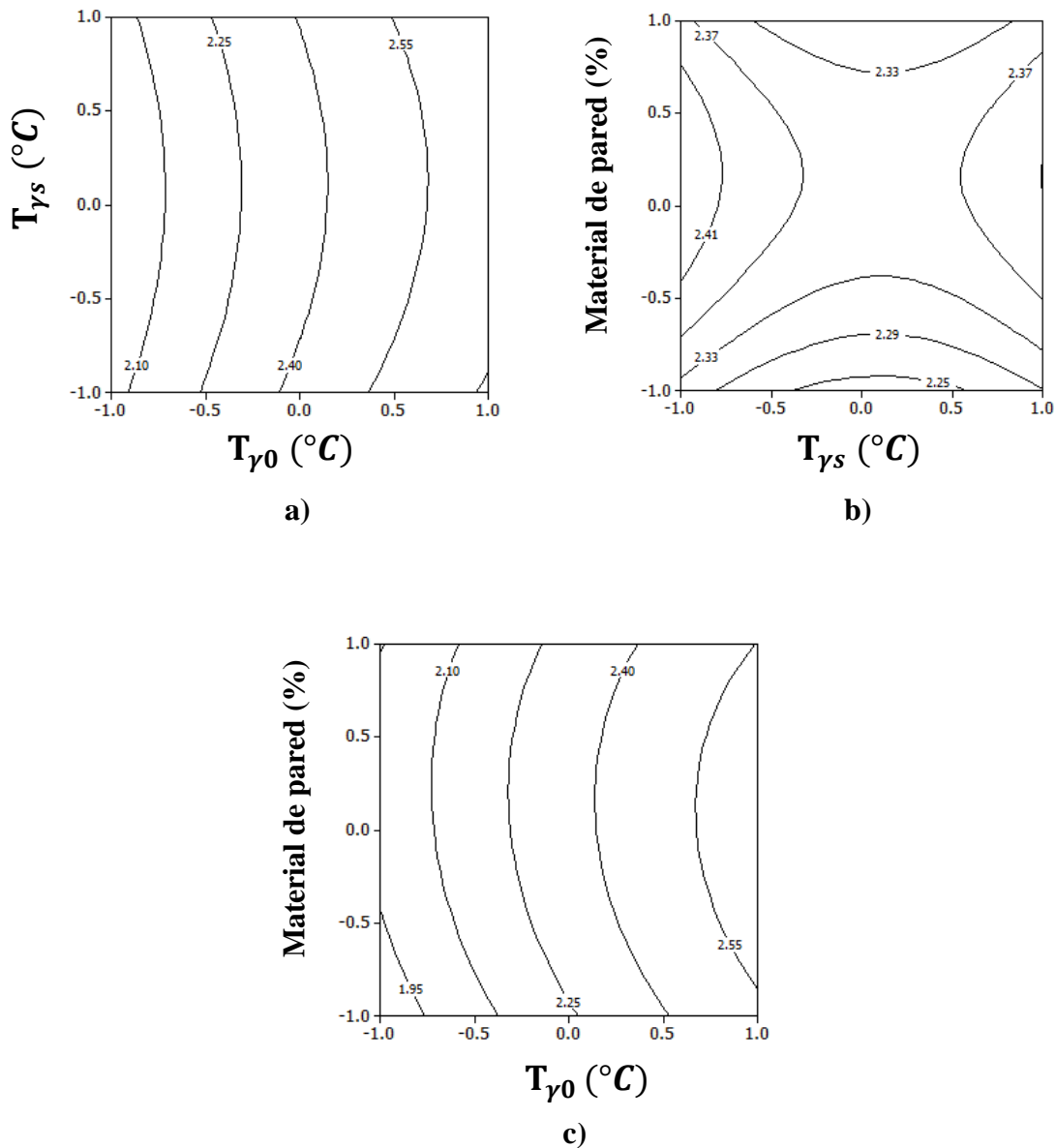


**Figura 3.13** Gráficas de contornos de diferencia de color en función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

### 3.7.5 Energía

En la Figura 3.14a se observa que la región de mínimo consumo de energía (menor a 2.10 kW) se logró empleando una temperatura de aire de entrada de 180 a 182  $^{\circ}C$  (valores codificados de -1 y -0.9 respectivamente) a una temperatura de aire de salida de 80 a 100  $^{\circ}C$  (valores codificados de -1 y 1). En la Figura 3.14b se observa un punto de silla por lo que no es sencillo

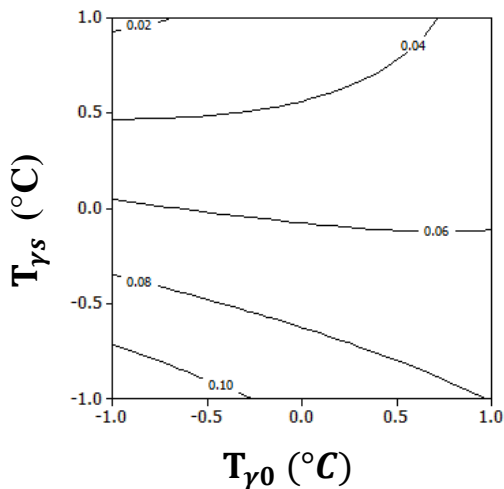
dar una interpretación ya que no se tiene una región en donde se presente un mínimo o un máximo. Finalmente en la Figura 3.14c se observa que la región que presenta el menor consumo de energía (menor a 1.95 kW) se logra a una temperatura de entrada de 180 a 186 °C (valores codificados de -1 y -0.7) con un porcentaje de material de pared de 0 a 1.2 % (valores codificados de -1 y -0.4).



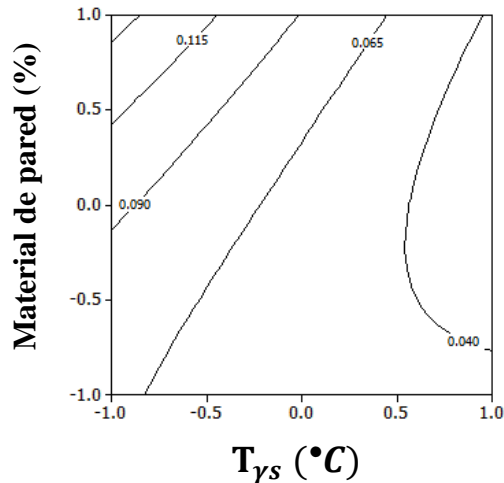
**Figura 3.14** Gráficas de contornos de energía en función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

### 3.7.6 Producción

En la Figura 3.15a se observa que la región que presenta la máxima producción (mayor a 0.10 Kg/h) se logra a una temperatura de aire de entrada de 180 a 194 °C (valores codificados de -1 y -0.3) y temperatura de aire de salida de 80 a 83 °C (valores codificados de -1 y -0.7). La Figura 3.15b muestra que la región con mayor producción (mayor a 0.115 Kg/h) se logró empleando una temperatura de aire de salida de 80 a 85 °C (valores codificados de -1 y -0.5) con un porcentaje de material de pared de 3.2 a 5 % (valores codificados de 0.4 y 1). La Figura 3.15c muestra que la región en la que se obtiene la mayor producción (mayor a 0.105 Kg/h) se logró a una temperatura de aire de entrada de 180 a 186 °C (valores codificados de -1 y -0.7) con un porcentaje de material de pared de 4.4 a 5 % (valores codificados de 0.8 y 1).

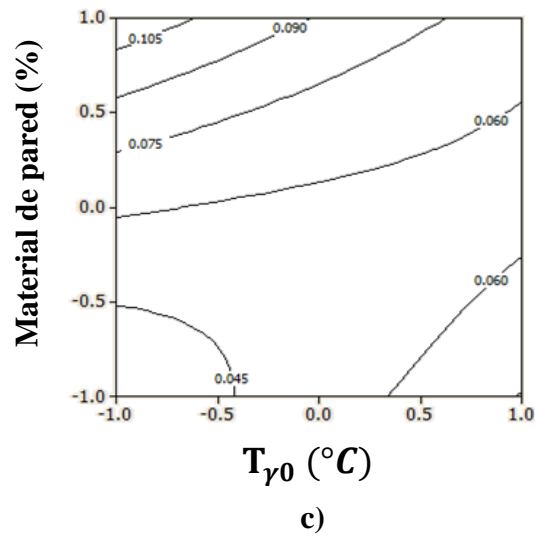


a)



b)

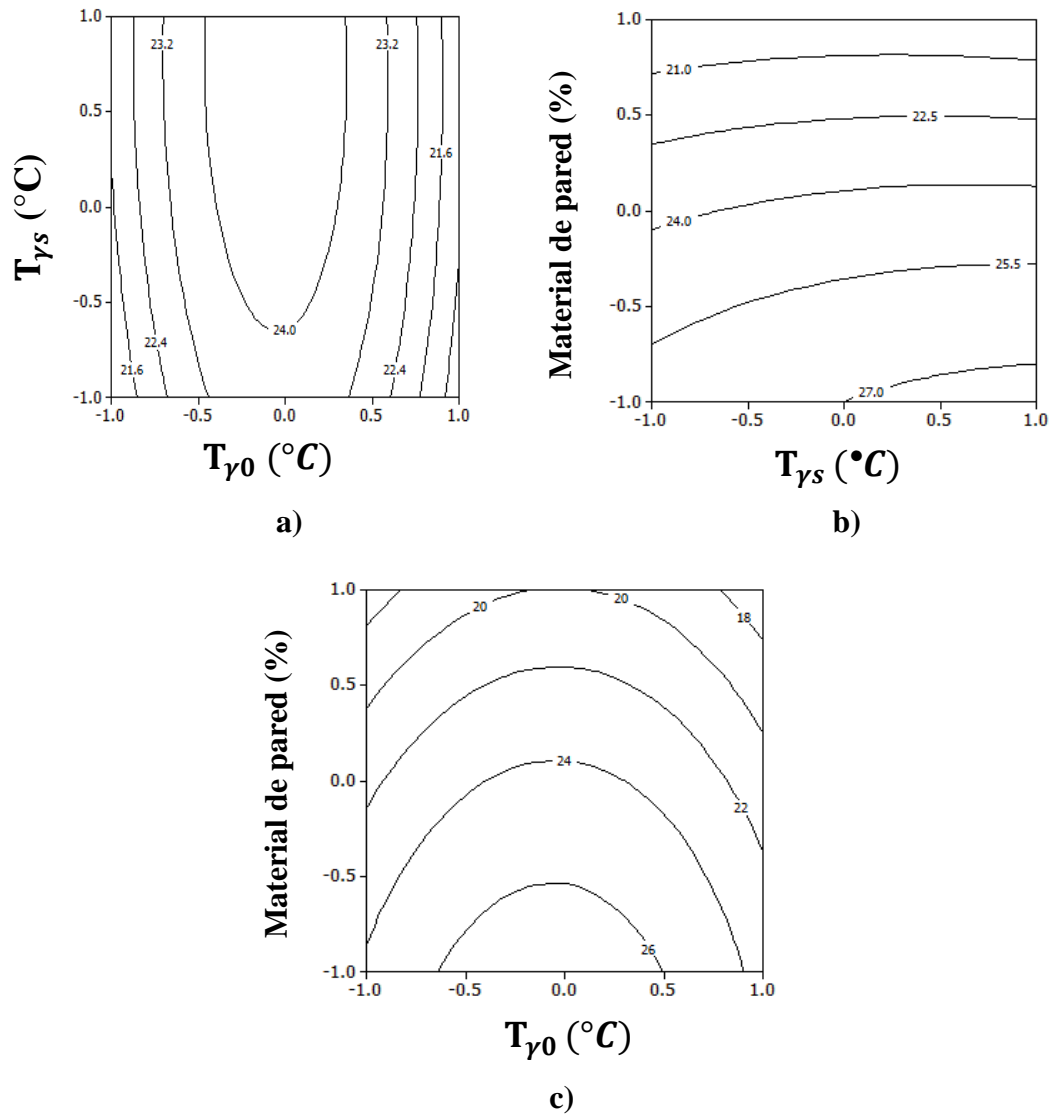
Continúa Figura 3.15...



**Figura 3.15** Gráficas de contornos de producción en función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

### 3.7.7 Costo

En la Figura 3.16a se observa que la región donde se encuentra el mínimo costo de producción (menor a 21.6 \$/Kg) se logró a una temperatura de aire de entrada de 180 a 184 °C (valores codificados de -1 y -0.8) con una temperatura de aire de salida de 80 a 92 °C (valores codificados -1 a 0.2). En la Figura 3.16b se observó que la región donde se encuentra el menor costo de producción (menor a 21 \$/Kg) se obtiene a una temperatura de aire de entrada de 80 a 100 °C (valores codificados de -1 a 1) con un porcentaje de material de pared de 4.1 a 5% (valores codificados de 0.7 y 1). Finalmente, en la Figura 3.16c se observó que la región donde se encuentra el menor costo (18 \$/Kg) se logra a una temperatura de aire de entrada de 180 a 220 °C (valores codificados de -1 a 1) con un porcentaje de material de pared de 4.1 a 5% (valores codificados de 0.7 y 1).

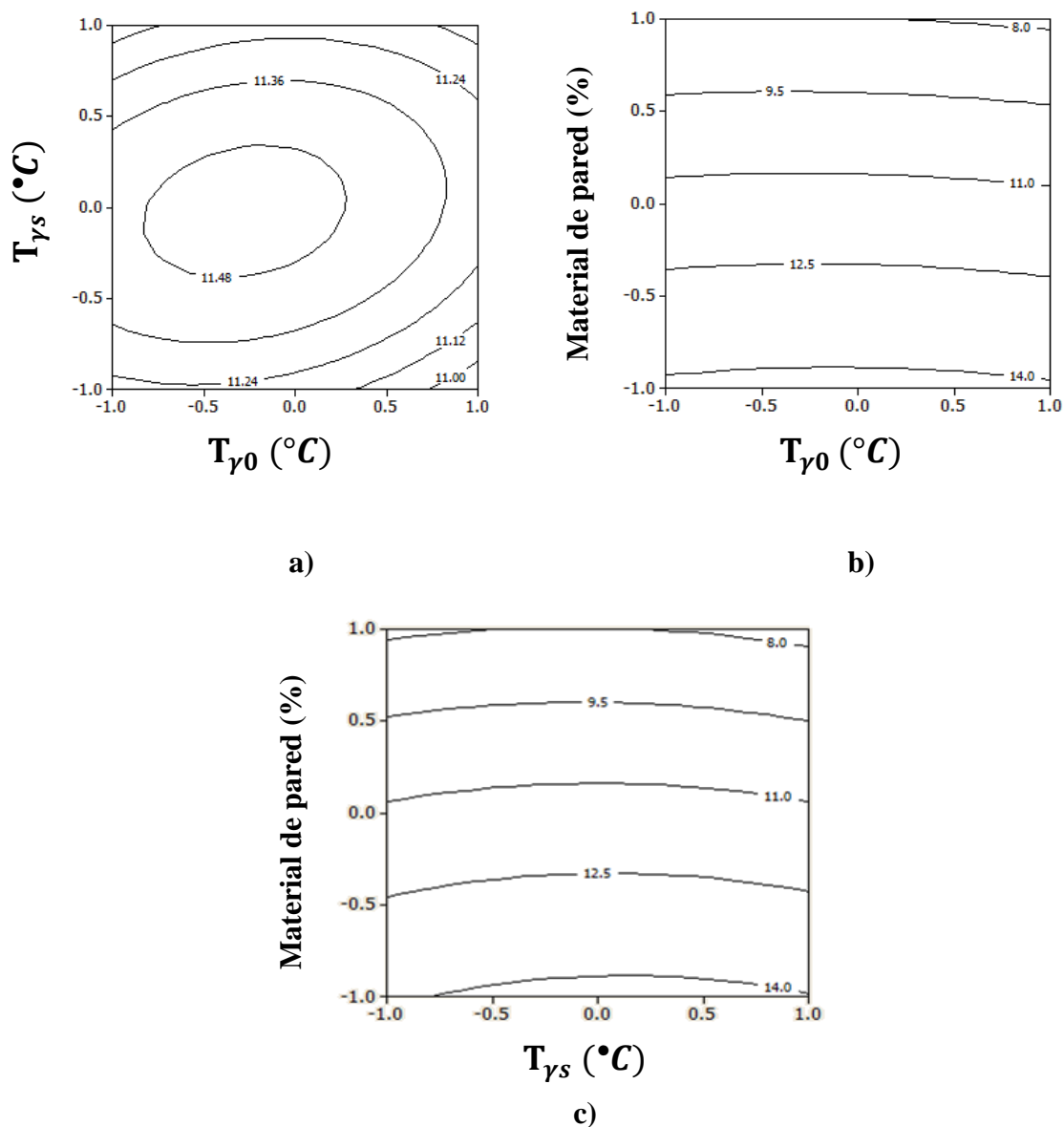


**Figura 3.16** Gráficas de contornos de costo en función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

### 3.7.8 Proteínas

En la Figura 3.17a se observa que la región que presenta el máximo contenido de proteínas (mayor a 11.48 %) se logra empleando una temperatura de aire de entrada de 184 a 204 °C (valores codificados de -0.8 y 0.2) con una temperatura de aire de salida de 86 a 96 °C (valores codificados de -0.4 y 0.3). En la Figura 3.17b se observa que la región que presenta el máximo

contenido de proteínas (mayor a 14 %) se encuentra a una temperatura de aire de entrada de 180 a 220 °C (valores codificados de -1 y 1 respectivamente) con un porcentaje de material de pared de 0 a 0.2 % (valores codificados de -1 y -0.9). En la Figura 3.17c se puede apreciar que la región donde se presenta el mayor contenido de proteínas (mayor a 14 %) se logra a una temperatura de aire de salida de 82 a 100 °C (valores codificados de -0.8 a 1 respectivamente) empleando un porcentaje de material de pared de 0 a 0.2 % (valores codificados de -1 y -0.9).



**Figura 3.17** Gráficas de contornos de proteínas en función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.



### 3.8 Gráficas de superposición de contornos

Para elaborar las gráficas de superposición de contornos se emplearon los valores descritos en la sección 3.7 y recopilados en la Tabla 3.6 para cada una de las variables de respuesta como función de la temperatura de aire de entrada ( $X_1$ ), temperatura de aire de salida ( $X_2$ ) y porcentaje de material de pared ( $X_3$ ).

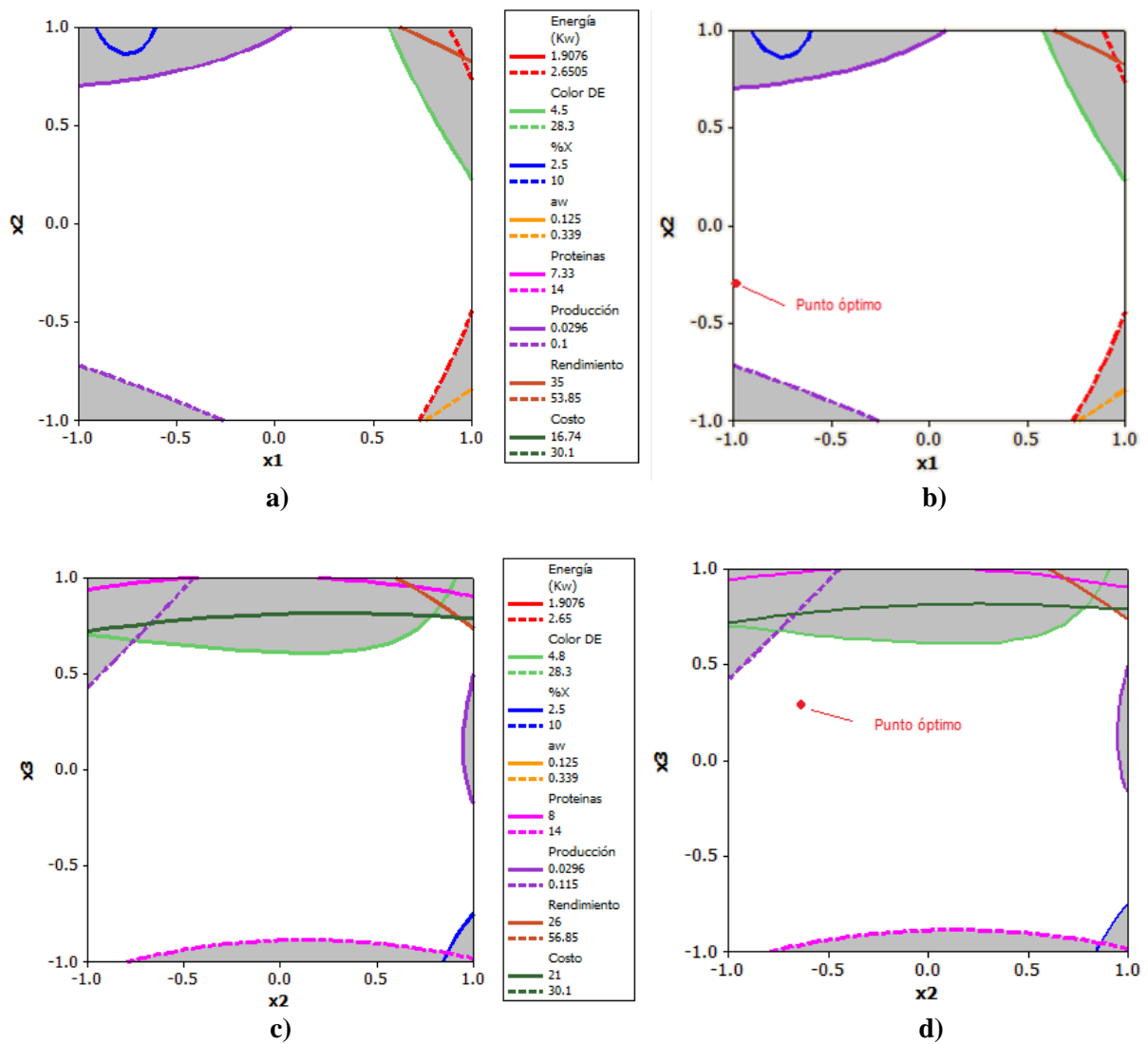
**Tabla 3.6** Puntos óptimos de operación

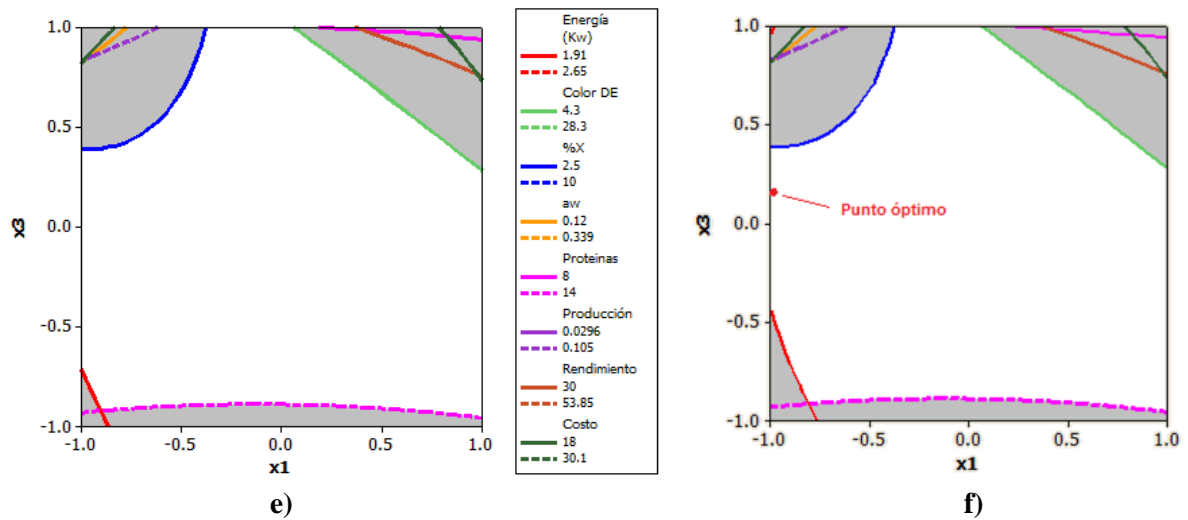
Variables de respuesta	Combinación de factores					
	$X_1X_2$		$X_2X_3$		$X_1X_3$	
	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
Humedad (%)	2.5	10	2.5	10	2.5	10
Actividad de agua	0.125	0.339	0.125	0.339	0.12	0.339
Rendimiento (%)	35	53.85	26	56.85	30	53.85
Diferencia de color	4.5	28.30	4.8	28.30	4.3	28.3
Energía (kW)	1.9076	2.650	1.9076	2.65	1.91	2.65
Producción (kg/h)	0.0296	0.1	0.0296	0.115	0.0296	0.105
Costo (\$/kg)	16.74	30.1	21	30.10	18	30.1

Las condiciones óptimas del proceso de secado pueden ser determinadas a partir de la región derivada de la superposición de contornos en función de dos variables independientes, mientras que la otra variable independiente se mantiene constante. Esta técnica proporciona la región de operación factible al especificar los valores obtenidos en las gráficas de contorno

para cada variable dependiente. La región factible es representada en la Figura 3.18 por la zona blanca. Con la ayuda del software Minitab 10 se localizaron los puntos óptimos de operación del proceso de secado por aspersión de suero de leche que cumplieron con las restricciones descritas en la sección 2.15.

De acuerdo con los resultados proporcionados por el Software Minitab 10, las coordenadas correspondientes al punto óptimo fueron: temperatura de aire de entrada de 180 °C y temperatura de aire de salida de 86.26 °C (Valores codificados de -1 y -0.3737 Figura 3.18b).





**Figura 3.18** Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función de  $T_{\gamma 0}$ ,  $T_{\gamma s}$  y material de soporte.

La gráfica de superposición de contornos en función de las variables independientes (temperatura de aire de salida y material de pared) se muestran en la Figura 3.18c. De acuerdo con los resultados proporcionados por el software Minitab 10 las coordenadas correspondientes a los puntos estacionarios fueron: temperatura de aire de salida de 84.04 °C y porcentaje de material de pared de 2.93% (valores codificados de -0.5959 y 0.3131 respectivamente) los cuales se presentan en la Figura 3.18d.

Finalmente, en la Figura 3.18e se presenta la gráfica de superposición de contornos en función de las variables independientes (temperatura de aire de entrada y material de pared). Las coordenadas de los puntos estacionarios obtenidas con el software Minitab 10 fueron: temperatura de aire de entrada de 180 °C y 2.75% (valores codificados de -1 y 0.2525 respectivamente) los cuales se indican en la Figura 3.18f. El análisis de las gráficas de superposición de contornos permitieron obtener las regiones óptimas del proceso de secado por aspersion del suero de leche deshidratado las cuales fueron: temperatura de aire de entrada

de 180 °C, temperatura de aire de salida de 84.04 a 86.26 y porcentaje de material de pared de 2.75 a 2.93%. Con estos valores se buscó la mejor combinación de las regiones óptimas obteniendo así los siguientes puntos: temperatura de aire de entrada de 180 °C, temperatura de aire de salida de 84.91 °C y porcentaje de material de pared de 2.91% (valores codificados de -1, -0.5084 y 0.3060, respectivamente). Cada valor codificado fue sustituido en los modelos de segundo orden descritos en la sección 3.6 para obtener los valores óptimos de las variables de respuesta (Tabla 3.7).

**Tabla. 3.7** Respuestas óptimas del proceso de secado por aspersión de suero de leche

Condiciones de operación (valores descodificados)	Parámetros	Respuestas óptimas
Temperatura de aire de entrada 180 °C	Energía (kW)	2.1145
	$\Delta E$	18.283
	Humedad (%)	2.8211
Temperatura de aire de salida 84.91 °C	$a_w$	0.2320
	Proteínas (%)	10.428
Material de pared 2.91 %	Producción (kg/h)	0.1054
	Costo (\$/kg)	20.115
	Rendimiento (%)	50.928

### 3.9 Validación de las condiciones óptimas del proceso de secado por aspersión de suero de leche

La Tabla 3.7 muestra los resultados de las variables de respuesta obtenidas durante la validación experimental de los puntos óptimos calculados en la sección 3.8. El error relativo ( $E_r$ ) se calculó mediante la ecuación 14 descrita en la sección de materiales y métodos. A

partir de los resultados de la Tabla 3.7 se observó de manera clara que la diferencia y el porcentaje de error de las variables de respuesta fueron lo suficientemente bajos y muy próximos a los valores predichos por la optimización; por lo tanto, pueden ser considerados como aceptables. Los resultados experimentales demostraron que las condiciones óptimas de proceso para producir queso deshidratado fueron temperatura de aire de entrada de 180 °C, temperatura de aire de salida de 84.91 °C y 2.91% de material de pared.

**Tabla. 3.8** Resultados de la validación experimental del proceso de secado por aspersión de suero de leche

Condiciones de Operación	Parámetros	Respuestas	Validación	$E_r$ (%)
Temperatura de aire de entrada 180 °C	Energía (kW)	2.1145	2.1274	0.6063
	$\Delta E$	18.283	17.46	4.7136
	Humedad (%)	2.8211	2.8500	1.0140
Temperatura de aire de salida 84.91 °C	$a_w$	0.2320	0.2390	2.9288
	Proteínas (%)	10.428	10.5519	1.1741
Material de pared 2.91 %	Producción (kg/h)	0.1054	0.1008	4.5634
	Costo (\$/kg)	20.115	19.7095	2.0573
	Rendimiento (%)	50.928	48.6994	4.5762

# PARTE II

## PARTE II. Resultados experimentales del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco

### 3.10. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de queso fresco

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se utilizó queso fresco proporcionado por los productores de queso de la región de Paso Carretas Tlalixcoyan del Estado de Veracruz, el cual se caracterizó fisicoquímica y microbiológicamente. La Tabla 3.9 muestra el promedio de los resultados del estudio de su caracterización.

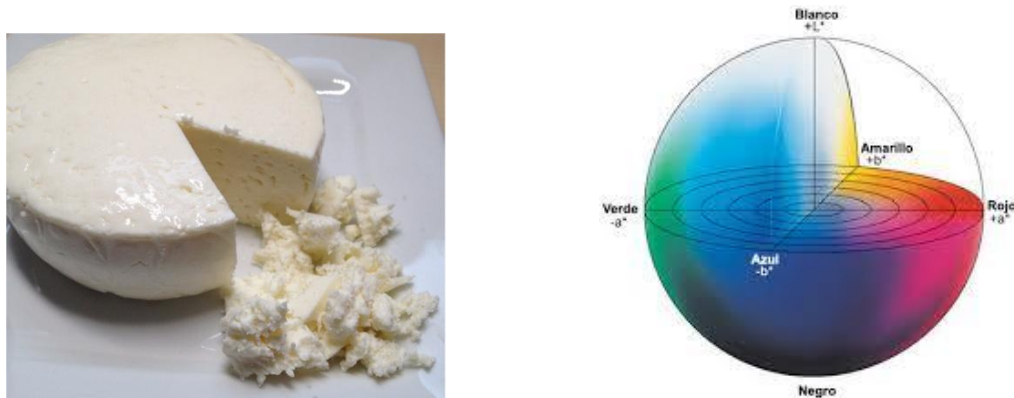
**Tabla 3.9** Caracterización fisicoquímica y microbiológica de queso fresco

Análisis	Valores de medias $\pm$ desviación estándar
Humedad (%)	52.11 <sup><math>\pm</math>1.49</sup>
Actividad de agua	0.970 <sup><math>\pm</math>0.00</sup>
Contenido de proteínas (%)	15.24 <sup><math>\pm</math>0.01</sup>
Contenido de NaCl (%)	1.28 <sup><math>\pm</math>0.206</sup>
Contenido de grasa	2.931 <sup><math>\pm</math>0.239</sup>
pH	6.31 <sup><math>\pm</math>0.190</sup>
Carbohidratos (%)	6.18
<i>L</i>	52.98
<i>a</i>	0.560
<i>b</i>	9.845
Mesófilos (log UFC·g <sup>-1</sup> )	7.89 <sup><math>\pm</math>0.043</sup>
Lactobacilos (log UFC·g <sup>-1</sup> )	5.39 <sup><math>\pm</math>0.001</sup>
Coliformes fecales (log UFC·g <sup>-1</sup> )	5.91 <sup><math>\pm</math>0.002</sup>
Hongos y levaduras (log UFC·g <sup>-1</sup> )	4.05 <sup><math>\pm</math>0.056</sup>

Los resultados derivados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica del queso fresco son congruentes con los reportados por Hnosko *et al.* 2009 quienes realizaron estudios sobre la evaluación sensorial de productos lácteos. De acuerdo con la literatura, los quesos frescos son

elaborados tradicionalmente con leche cruda la cual, durante el proceso de elaboración artesanal, puede adquirir bacterias patógenas tales como *Salmonella*, *E. Coli* y *Listeria*. Sin embargo, el uso de leche cruda le proporciona al queso aroma, sabor característico, textura y propiedades de cocción. Es evidente que el queso fresco presentó una cantidad alta de microorganismos mesofílicos, coliformes fecales, hongos y levaduras (Tabla 3.9); lo que indicó algún tipo de contaminación durante la ordeña de la leche, ubres sucias, almacenamiento de la leche, utensilios no higienizados, elaboración, refrigeración y transporte. La pasteurización de la leche es una alternativa para la reducción de este tipo de microorganismos; sin embargo, los quesos elaborados con leche pasteurizada no presentarán las propiedades características de un queso elaborado con leche cruda, además de que estos quesos ya no se considerarían artesanales (Hnosko *et al.* 2009).

Se evaluaron los parámetros de color  $L$ ,  $a$  y  $b$  del queso fresco los cuales indicaron que el queso es un producto blanco amarillo (Figura 3.19). La ligera amarillez del queso ha sido atribuida a los carotenoides contenidos en la dieta de alimentación de la vaca, los cuales son transmitidos a la leche (Aday y Karagul, 2014).



**Figura 3.19** Suero de leche y diagrama de Hunter  $L$ ,  $a$ ,  $b$



### 3.11 Humedad, actividad de agua y diferencia de color

En la Tabla 3.10 se muestran los resultados experimentales del contenido de humedad, actividad de agua y diferencia de color de queso deshidratado por lecho fluidizado. De acuerdo al análisis de varianza (ANOVA) la temperatura de secado influyó significativamente ( $p \leq 0.10$ ) sobre la humedad final y la diferencia de color; mientras que el tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado influyeron de manera significativa ( $p \leq 0.10$ ) sobre los valores de actividad de agua.

**Tabla 3.10** Resultados experimentales de humedad, actividad de agua y diferencia de color de queso deshidratado por lecho fluidizado

Experimento	Tamaño (cm)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Humedad (%(gH <sub>2</sub> O/g.s.s.))	a <sub>w</sub>	ΔE
1	0.5	50	60	1.66	0.440	6.63
2	0.5	70	60	0.39	0.244	17.8
3	3.5	50	60	0.36	0.462	13.33
4	3.5	70	60	0.56	0.305	12.02
5	0.5	50	120	0.65	0.265	11.19
6	0.5	70	120	0.45	0.118	11.62
7	3.5	50	120	0.64	0.325	10.5
8	3.5	70	120	0.3	0.220	12.83
9	2	50	90	1.35	0.413	10.5
10	2	70	90	0.41	0.218	10.24
11	2	60	90	0.52	0.230	22.99
12	0.5	60	90	0.54	0.228	12.31
13	3.5	60	90	0.63	0.353	13.13
14	2	60	60	0.39	0.351	12.13
15	2	60	120	0.55	0.262	17.67

De acuerdo con los resultados, el contenido de humedad y actividad de agua se lograron reducir de valores de 52.11% y 0.970 (Tabla 3.9) a niveles inferiores a 1.66% y 0.462 respectivamente (Tabla 3.10). La literatura establece que el crecimiento de bacterias patógenas en los quesos frescos depende de condiciones como humedad y actividad de agua, (Bintsis y Papademas, 2002; Hnosko *et al.* 2009), por lo que la reducción de estas variables mediante el proceso de secado aseguró su estabilidad (Ghandi *et al.* 2012; Erbay *et al.* 2015); dado que los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de agua es menor del 10% en peso (Tasirin *et al.* 2014). Finalmente, se analizaron los resultados de la diferencia de color total del queso deshidratado, los cuales claramente demostraron que a medida que incrementó la temperatura y el tiempo de secado aumentó la  $\Delta E$ .



**Figura 3.20** Muestras de queso deshidratado por lecho fluidizado

En la Tabla 3.10 se observa que la menor diferencia de color (6.63) se obtuvo a una temperatura de 50 °C y tiempo de secado de 60 min, por lo que valores bajos de  $\Delta E$  son considerados aceptables.

### 3.12. Proteínas, cloruro de sodio, grasa y viabilidad

Los resultados experimentales del contenido de proteínas, cloruro de sodio, grasa y viabilidad del queso deshidratado se presentan en la Tabla 3.11.

**Tabla 3.11** Resultados experimentales de proteínas, cloruro de sodio, grasa y viabilidad del queso deshidratado por lecho fluidizado

Experimento	Proteínas (%)	NaCl (%)	Grasa (%)	Viabilidad (log UFC)
1	31.6027	3.368	38.0368	6.1885
2	40.4791	3.3247	44.2616	4.4412
3	33.653	1.7368	43.6679	4.1259
4	38.8684	2.7005	39.7019	6.3931
5	31.2619	3.5723	55.0330	4.1803
6	38.6908	2.5219	39.6393	5.8486
7	35.0361	2.8589	42.7350	5.1097
8	30.0274	3.3165	47.0521	6.5078
9	32.8662	2.2809	45.3328	6.5252
10	33.1567	2.6079	43.6960	4.6173
11	32.4870	3.1076	41.2441	4.302
12	36.9477	3.0891	40.2850	6.6615
13	36.3699	2.7999	44.7081	6.0062
14	33.5466	3.4256	46.7600	6.2572
15	33.9554	0.9664	47.3030	6.5252

El análisis de varianza (ANOVA) reveló las variables independientes no influyeron significativamente ( $p \geq 0.10$ ) sobre el contenido de proteínas, NaCl y viabilidad, mientras que la temperatura de secado mostró influencia significativa ( $p \leq 0.10$ ) sobre el contenido de grasa.

Como se puede observar a partir de los resultados mostrados en la Tabla 3.11, el contenido de proteínas, cloruro de sodio, grasa y viabilidad de lactobacilos incrementaron, de valores iniciales de 15.24%, 1.28% 2.93% y 5.39 log UFC (Tabla 3.9), a niveles de 40.47%, 3.57%, 55.03% y 6.66 log UFC respectivamente (Tabla 3.11), debido al aumento del contenido de sólidos totales a medida de que el agua residual disminuye (Vignolles *et al.* 2007).

Los niveles de sal en los quesos difieren significativamente de acuerdo a la variedad  $< 0.2\%$  en Quark comparado con 3.5% para el Roqueford (McCarthy *et al.* 2015); 2.5 a 3.0 % de queso tipo feta (Al-Otaibi y Wilbey 2004); 1 a 3% para queso fresco, 4 a 5% para queso Cotija, 0.8 a 1.9% para queso Oaxaca, 4 a 5% para queso Manchego (Honosko *et al.* 2009); 2 a 3% para queso Sao Joao, 0.5 a 3.0% para queso Cheddar (Soares *et al.* 2015), permitiendo al consumidor una amplia elección con respecto al contenido de NaCl. Sin embargo, la literatura indica que la presencia de sal en algunos quesos como el Gouda restringe la presencia de lactobacilos acidófilos, bifidobacterias lácticas y bacterias lácticas (Faccia *et al.* 2012). Algunos autores postulan que una cantidad excedente de 4% de NaCl causa una caída en la cuenta de microorganismos lácticos (Rouhi *et al.* 2013). Durante el proceso de secado se obtuvieron muestras de queso deshidratado con niveles de cloruro de sodio menores a 4% manteniendo la concentración de sal dentro del rango típico de quesos frescos. Con todo lo anterior se puede inferir que a temperaturas de secado bajas y concentración de NaCl menor a 4% habrá mayor cantidad de lactobacilos.

### 3.13 Energía, producción y costo

La Tabla 3.12 muestra los resultados experimentales del consumo de energía, producción y costo total del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco. El análisis de varianza ANOVA indicó que la temperatura de secado y la interacción de factores temperatura-tiempo influyeron significativamente ( $p \leq 0.10$ ) sobre el consumo de energía. Por otra parte, el tiempo de secado influyó significativamente ( $p \leq 0.10$ ) sobre la producción. Finalmente, las variables independientes no influyeron de manera significativa ( $p \geq 0.10$ ) sobre el costo total.

**Tabla 3.12** Resultados experimentales de energía, producción y costo de queso deshidratado por lecho fluidizado

Experimento	Tamaño (cm)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Energía (kW)	Producción (Kg/h)	Costo (\$/kg)
1	0.5	50	60	1.0004	0.0459	87.2044
2	0.5	70	60	1.7600	0.0556	72.1115
3	3.5	50	60	0.9253	0.0493	81.2352
4	3.5	70	60	1.5926	0.0554	72.3555
5	0.5	50	120	0.7708	0.0274	73.1423
6	0.5	70	120	1.7600	0.0277	72.5415
7	3.5	50	120	0.8256	0.0239	83.8661
8	3.5	70	120	1.7600	0.0278	72.2805
9	2	50	90	0.5293	0.0345	77.4347
10	2	70	90	1.7600	0.0317	84.4164
11	2	60	90	1.5918	0.0344	77.7645
12	0.5	60	90	1.4711	0.0344	77.7470
13	3.5	60	90	1.5572	0.0350	76.4257
14	2	60	60	1.6079	0.0540	74.2333
15	2	60	120	1.4880	0.0247	81.2955

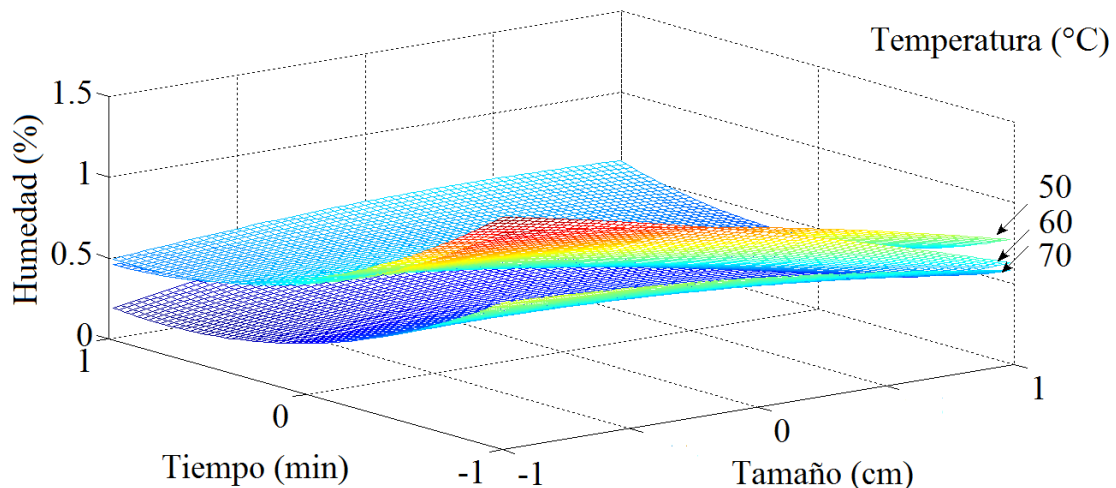
### 3.14 Superficies de respuesta

Para predecir el comportamiento de las variables de respuesta (humedad, actividad de agua, diferencia de color, proteínas, cloruro de sodio, grasa, viabilidad, energía, producción y costo) en función de los factores estudiados (tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado, se desarrollaron por regresión lineal múltiple polinomios de segundo orden; los cuales fueron empleados para elaborar gráficas de superficie de respuesta.

#### 3.14.1 Humedad

Se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales del contenido de humedad mostrados en la Tabla 3.10 en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 70.73 se presenta en la ecuación 3.22:

$$\% \text{ Humedad} = 0.616 - 0.120X_1 - 0.255X_2 - 0.077X_3 + 0.166X_1X_2 + 0.121X_1X_3 + 0.066X_2X_3 - 0.054X_1^2 + 0.241X_2^2 - 0.169X_3^2 \quad (\text{Ec. 3.22})$$



**Figura 3.21** Superficie de respuesta de humedad como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado

La Figura 3.21 muestra la superficie de respuesta de la humedad del queso deshidratado como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado. El análisis de varianza (ANOVA) demostró que la temperatura de secado influyó significativamente sobre el contenido de humedad del producto deshidratado. Se observó que las muestras que presentaron menor contenido de humedad fueron aquellas que se deshidrataron a 70°C con un tamaño de partícula de 0.5 cm durante un tiempo de secado de 120 min. Un comportamiento similar fue observado por Hernández-Botello, *et al.* 2014 durante el secado por lecho fluidizado de epidermis de agave, quienes reportaron que el menor contenido de humedad fue obtenido en las muestras deshidratadas a 80 °C y como era de esperarse, la humedad se redujo exponencialmente con el tiempo de secado. De igual manera Morales-Delgado *et al.* 2014 observaron que al incrementar la temperatura de secado de 60 a 90 °C el contenido de humedad (en células de parénquima de fresa *Fragaria x ananassa Dutch*) se redujo de 2.8 % hasta un valor de 0.90% durante un tiempo de secado de 60 a 90 min. Con respecto a las muestras de queso deshidratadas a 50 y 60 °C fueron consideradas también productos estables debido a su reducción del contenido de humedad a valores menores o iguales al 10 % (Tasirin *et al.* 2014). En general, se observó que a medida que disminuye la temperatura de secado, incrementa el contenido de humedad; de igual manera, se observó una tendencia decreciente de humedad al aumentar el tamaño de partícula del queso de 0.5 a 3.5 cm. Ésta última observación es contradictoria a lo reportado por Reyes *et al.* (2012) para el secado por lecho fluidizado de brócoli, quienes reportaron que al aumentar el tamaño de partícula de 1 a 3 cm, el contenido de humedad resultó ser más elevado debido al hecho de que las partículas más grandes tienen una pequeña área de superficie específica. No obstante, es bien sabido que el área superficial de las partículas aumenta a medida que disminuye el tamaño de partícula y la distancia de

transporte de humedad hacia el exterior es más corto. Por lo tanto, la velocidad de secado incrementa a medida que el tamaño de partícula disminuye, (Tasirin *et al.* 2014; Law y Mujumdar, 2014). Por otra parte, a medida que incrementa el tamaño de partícula en el queso de 0.5 a 3.5 cm el contenido de humedad disminuye ligeramente. Esto es probablemente al hecho de que durante el proceso de deshidratación, el contenido de cloruro de sodio en las muestras de queso más grandes es mayor e incrementa conforme transcurre el proceso de secado y en combinación con la temperatura de secado hay aún mayor difusión del contenido de agua. Esta última observación es congruente con lo reportado por Arboatti *et al.* (2014) quienes reportan que la sal reduce el contenido de humedad y actividad de agua y, por lo tanto, reduce la disponibilidad de agua para los microorganismos.

### 3.14.2 Actividad de agua

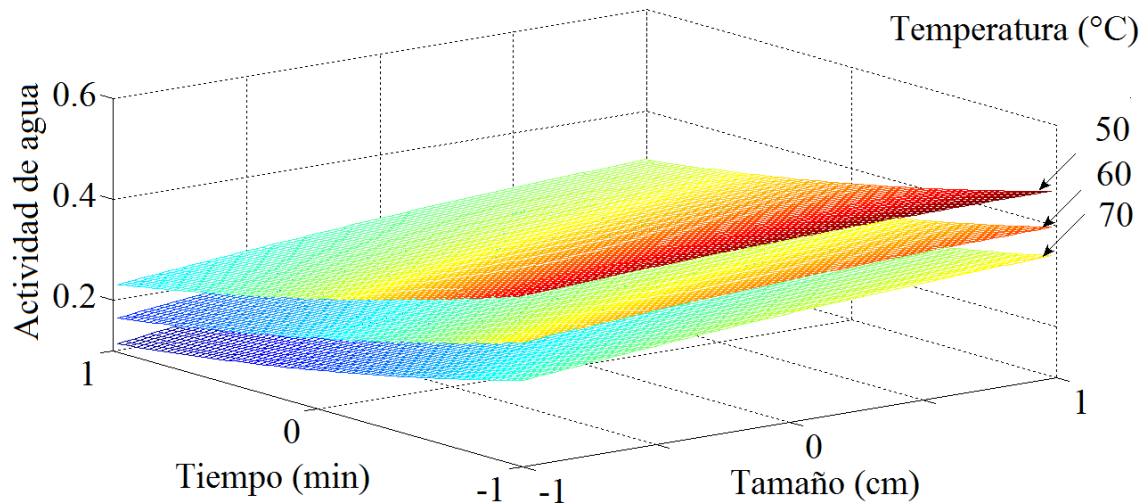
Los datos experimentales de actividad de agua presentados en la Tabla 3.10 se emplearon para desarrollar un modelo de polinomios de segundo orden para predecir la  $a_w$ . El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 94.17 ( $p=0.10$ ) se indica en la ecuación 3.23:

$$a_w = 0.285 + 0.0370X_1 - 0.0800X_2 - 0.0612X_3 + 0.0101X_1X_2 + 0.0099X_1X_3 + 0.0126X_2X_3 - 0.0084X_1X_1 + 0.0166X_2X_2 + 0.0076X_3X_3 \quad (\text{Ec. 3.23})$$

La Figura 3.22 muestra el efecto de interacción de la temperatura, tamaño y tiempo de secado sobre la actividad de agua del queso deshidratado. De acuerdo al análisis estadístico, las variables independientes influyeron de manera significativa sobre la  $a_w$  final. Como era de esperarse, la máxima temperatura de secado produjo valores de actividad de agua por debajo de 0.60. De acuerdo con la literatura, valores bajos de  $a_w$  proveen un alto grado de estabilidad



microbiológica y química debida a la remoción del agua presente en el alimento y permiten que grandes cantidades de alimento altamente perecedero puedan ser conservadas y disponibles a través del tiempo (Arboatti *et al.* 2014).



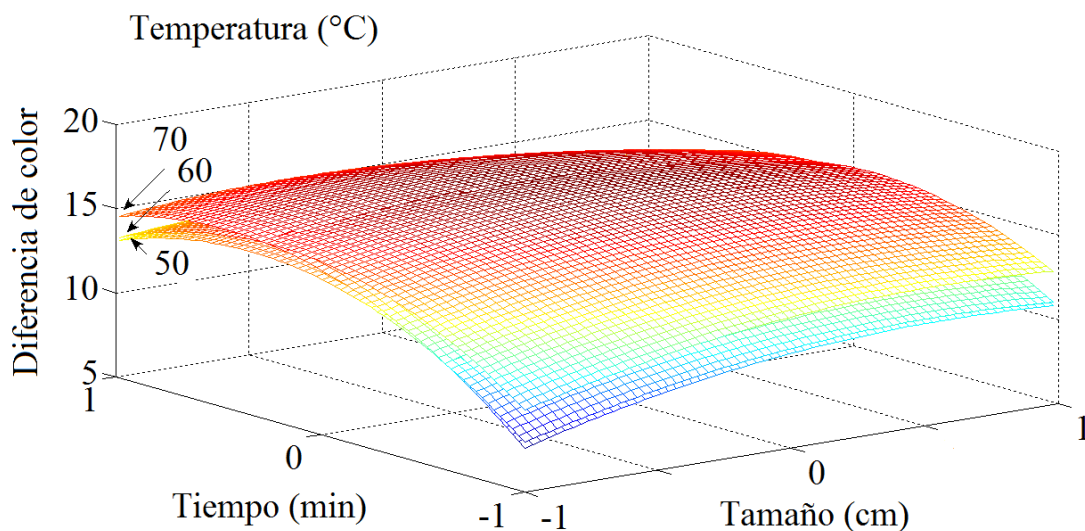
**Figura 3.22** Superficie de respuesta de actividad de agua como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado

Se observó que a medida que disminuye la temperatura de secado de 70 a 50 °C aumenta la actividad de agua; de igual manera, a medida que incrementa el tamaño de partícula de 0.5 a 3.5 cm, aumenta el nivel de actividad de agua. Esto debido a los gradientes de temperatura que se presentan en el proceso de deshidratación del queso fresco, estos gradientes generan diferencias de presión de vapor de agua, con la consiguiente transferencia de humedad y los cambios en los niveles de actividad de agua (Villegas-Santiago *et al.* 2011).

### 3.14.3 Diferencia de color

A partir de los resultados obtenidos experimentalmente para la diferencia de color (Tabla 3.10), se realizó la regresión lineal en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 44.46 ( $p=0.10$ ) se presenta en la ecuación 3.24:

$$\Delta E = 15.9 + 0.23X_1 + 1.24X_2 + 0.19X_3 - 1.32X_1X_2 - 0.05X_1X_3 - 0.89X_2X_3 - 1.39X_1X_1 - 3.74X_2X_2 + 0.79X_3X_3 \quad (\text{Ec. 3.24})$$



**Figura 3.23** Superficie de respuesta de diferencia de color como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado

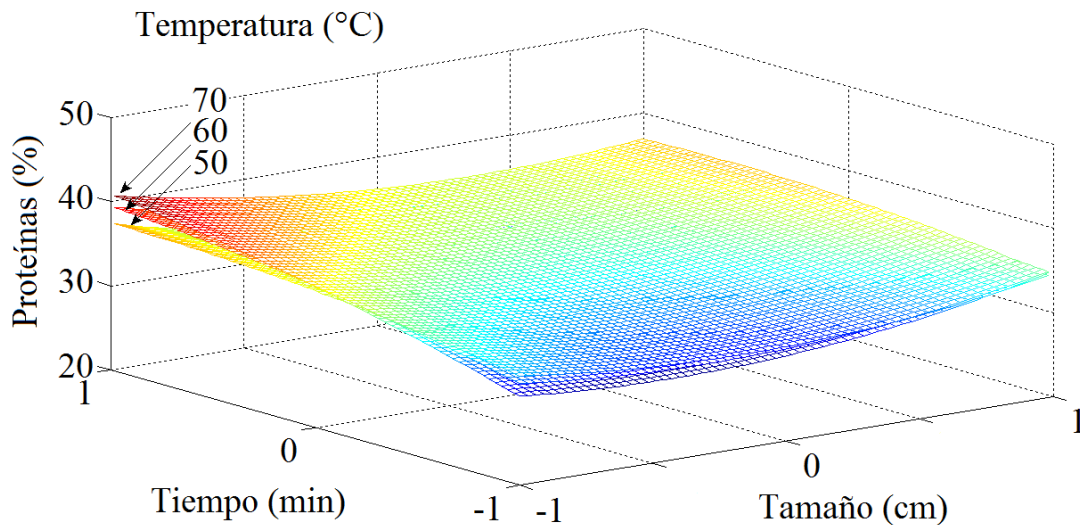
El análisis de varianza (ANOVA) reveló que la temperatura de secado influyó de manera significativa sobre  $\Delta E$  del queso deshidratado. En la Figura 3.23 se observa que a medida que incrementa la temperatura de secado de 50 a 70 °C incrementa la diferencia de color en el producto deshidratado; de igual manera al aumentar el tamaño de partícula de 0.6 a 3.5 cm se

observa una tendencia creciente de la diferencia de color. Este incremento en la diferencia de color del producto deshidratado está relacionado con la disminución de la luminosidad y con los valores de cromaticidad  $a$  y  $b$ . Aday y Karagul (2014) reportan que el incremento en la concentración de sal disminuye la luminosidad del queso debido a que altas concentraciones de sal provocan un incremento en la oxidación de los lípidos y cambios en el color del queso. Esta última observación está relacionada con lo reportado por Yazdanpanah y Langrish 2012; Varming *et al.* 2011, quienes reportan que la temperatura y la humedad del aire causa la liberación y migración del contenido de grasa hacia la superficie de la partícula, por tanto, mientras más grasa cubra la superficie habrá mayor oxidación. De acuerdo a los resultados de la Tabla 3.10, un incremento en la temperatura de secado disminuye la luminosidad en el queso deshidratado y genera una reducción en los valores de  $a$  y un aumento en los valores de  $b$  y por consiguiente una tendencia hacia la amarillez. De igual manera al aumentar el tamaño de partícula disminuyen los valores de luminosidad,  $a$ ,  $b$  por lo que la diferencia de color final aumenta. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Tuyen *et al.* 2009 quienes al evaluar el efecto de la temperatura del secado por lecho fluidizado, sobre el agrietamiento y molienda de diferentes variedades de arroz Vietnamita, encontraron que los valores de  $b$  fueron más altos para las muestras deshidratadas a 90 °C que para las muestras deshidratadas a 80 °C. La amarillez ( $b^*$ ) también incrementó con el tiempo de secado por lo que la diferencia de color total ( $\Delta E^*$ ) aumenta. Da Cunha *et al.* 2007 observaron una disminución pronunciada de los parámetros de color especialmente de los valores de  $a^*$  y  $b^*$  durante el estudio de las condiciones de operación sobre la calidad de la pulpa de mango deshidratada en un secador por lecho fluidizado. Sus resultados indicaron que la temperatura de secado de 60°C y la velocidad de flujo de aire de 1.0 -1.44 m/s disminuyen la luminosidad.

### 3.14.4 Proteínas

Se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales del contenido de proteínas mostrados en la Tabla 3.11 en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 84.04 ( $p=0.10$ ) se indica en la ecuación 3.25:

$$\begin{aligned} \text{Proteínas} = & 33.7 - 0.503X_1 + 1.68X_2 - 0.918X_3 - 2.01X_1X_2 - 0.666X_1X_3 - 1.46X_2X_3 + \\ & 2.62X_1X_1 - 1.03X_2X_2 - 0.29X_3X_3 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.25})$$



**Figura 3.24** Superficie de respuesta de proteínas como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado

La Figura 3.24 muestra el efecto de interacción de la temperatura de secado, tamaño de partícula y tiempo sobre el contenido de proteínas del queso deshidratado. El análisis de varianza (ANOVA) indicó que las variables independientes no influyen significativamente sobre la variable de respuesta. Se observa de manera evidente una tendencia creciente del contenido de proteínas al aumentar la temperatura de secado de 50 a 70 °C, debido a que la

cantidad de sólidos incrementa a razón de que el agua residual disminuye (Vignolles *et al.* 2007). Un comportamiento similar fue reportado por Erbay y Koca (2012) durante el proceso de secado por aspersión de queso blanco, logrando un incremento de 36.32 % en el contenido de proteínas. Así mismo Shingare y Thorat (2013) observaron un incremento del contenido de proteínas durante la deshidratación de mijo a 60 °C. Por otra parte, se observó que el incremento del tamaño de partícula de 2 a 3.5 cm favorece la cantidad final de proteínas en el queso deshidratado a la menor temperatura, posiblemente al hecho de que a mayor tamaño de partícula hay una mayor cantidad de vacuolas las cuales con el tratamiento térmico liberan mayor cantidad de componentes proteicos hacia la superficie (Kim *et al.* 2009; Farkye 2006).

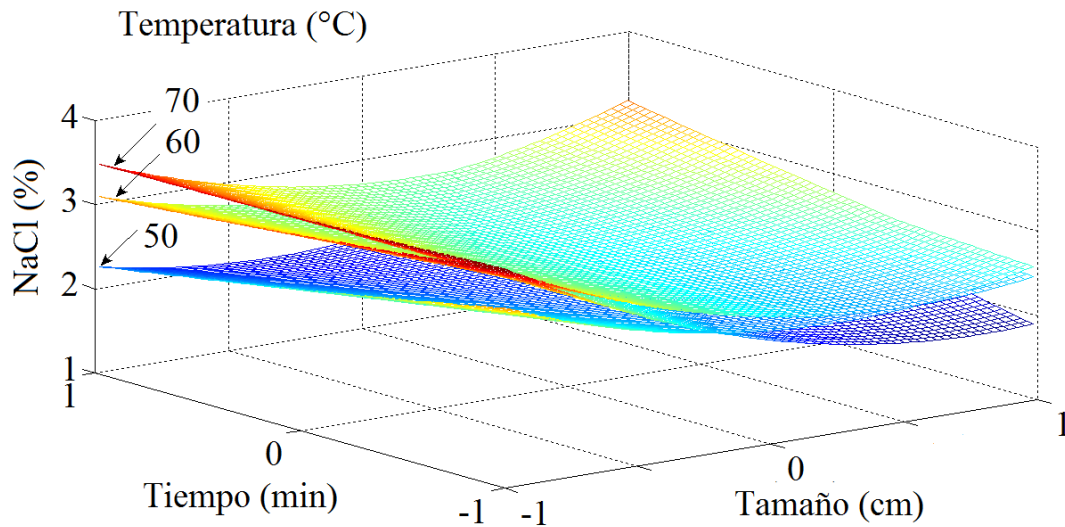
#### 3.14.5 Cloruro de sodio

Para predecir el comportamiento del cloruro de sodio en queso deshidratado se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales presentados en la Tabla 3.11, obtenidos durante el secado por lecho fluidizado en función de las variables independientes. El modelo de polinomios de segundo orden que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 49.03 ( $p=0.10$ ) se indica en la ecuación 3.26:

$$NaCl = 2.55 - 0.246X_1 + 0.065X_2 - 0.132X_3 + 0.314X_1X_2 + 0.292X_1X_3 - 0.189X_2X_3 + 0.528X_1X_1 + 0.028X_2X_2 - 0.220X_3X_3 \quad (\text{Ec. 3.26})$$

El análisis de varianza (ANOVA) indicó que las variables independientes no influyen significativamente sobre el contenido de cloruro de sodio del queso deshidratado. Aunque se puede observar en la Figura 3.25 que al incrementar el tamaño de partícula de 0.5 a 2 cm se observa una disminución del contenido de cloruro de sodio en el queso deshidratado. Bajos niveles de humedad fueron observados en las muestras más pequeñas (0.5 cm) de queso

deshidratadas en un tiempo de secado de 120 min por lo que el contenido de cloruro de sodio resultó ser alto debido a la pérdida de humedad durante el proceso.



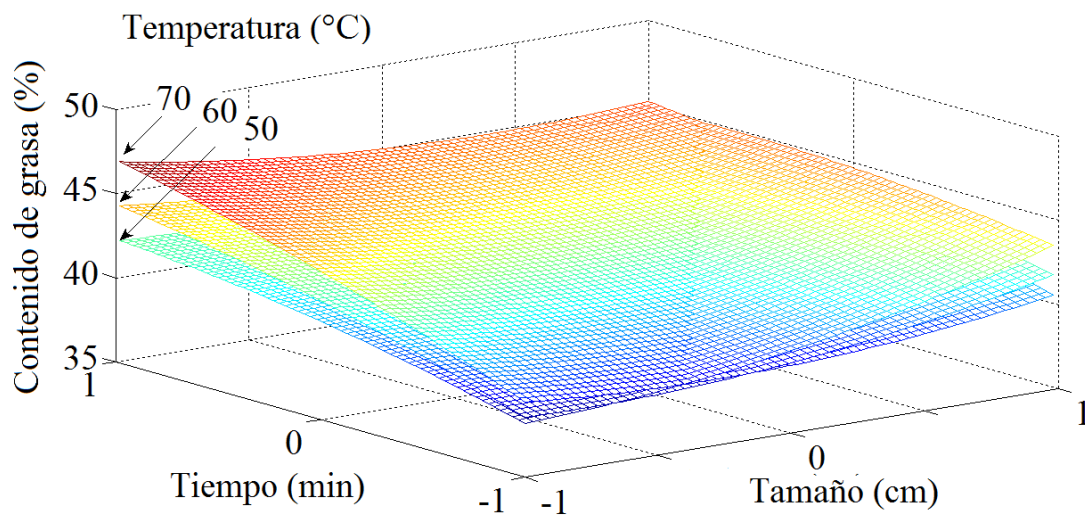
**Figura 3.25** Superficie de respuesta de cloruro de sodio como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado

La sal en el queso además de actuar como preservativo, contribuir al sabor y proveer una fuente de sodio, es el mayor determinante de la  $a_w$ , por lo tanto ejerce un control sobre el crecimiento microbiano, actividad enzimática, cambios bioquímicos durante el almacenamiento y el desarrollo de sabor y aroma deseables (Soares *et al.* 2015). Algunos autores postulan que una cantidad excedente de 4% de cloruro de sodio causa una caída en la cuenta de microorganismos lácticos (Faccia *et al.* 2012). Más adelante se reportan los resultados del número de bacterias lácticas en el producto de queso obtenido a diferentes condiciones de secado, en el cual se obtuvieron porcentajes de cloruro de sodio menores del 4%.

### 3.14.6 Grasa

Se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales del contenido de grasa mostrados en la Tabla 3.11 en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 74.73 se indica en la ecuación 3.27:

$$\begin{aligned} \text{Grasa} = & 42.0 + 0.958X_1 + 2.20X_2 + 0.428X_3 - 0.705X_1X_2 - 1.07X_1X_3 + 0.861X_2X_3 + \\ & 1.05X_1X_1 - 0.61X_2X_2 + 0.27X_3X_3 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.27})$$



**Figura 3.26** Superficie de respuesta de contenido de grasa como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado

El análisis de varianza (ANOVA) indicó que la temperatura de secado influye de manera significativa sobre el contenido de grasa del queso deshidratado. En la Figura 3.26 se observa que el incremento de la temperatura de secado de 50 a 70 °C aumenta el contenido de grasa del producto final, debido a que las altas temperaturas pueden dañar o eliminar los glóbulos de grasa causando que esté desprotegida y fluya como lagunas hacia la superficie de la partícula generando un incremento de grasa libre (Vignolles *et al.* 2007; Erbay *et al.* 2015).

De igual manera se observa una tendencia creciente del contenido de grasa al aumentar el tamaño de partícula de 0.5 a 3.5 cm, posiblemente al hecho de que a mayor tamaño de partícula hay una mayor cantidad de vacuolas las cuales con el tratamiento térmico liberan grasa hacia la superficie. Esta última observación es consistente con lo reportado por Vignolles *et al.* (2007) quienes reportan que durante el proceso de secado por aspersión de productos lácteos, las partículas de mayor tamaño tienen menor área de contacto en relación al volumen, así pueden encapsular más grasa. Sin embargo, la presencia de grasa en la superficie de la partícula reduce la fluidez, es susceptible a la oxidación y al desarrollo de rancidez (Kim *et al.* 2009); por lo tanto, influye sobre la diferencia de color final del queso deshidratado (Aday y Karagul 2014).

#### 3.14.7 Viabilidad

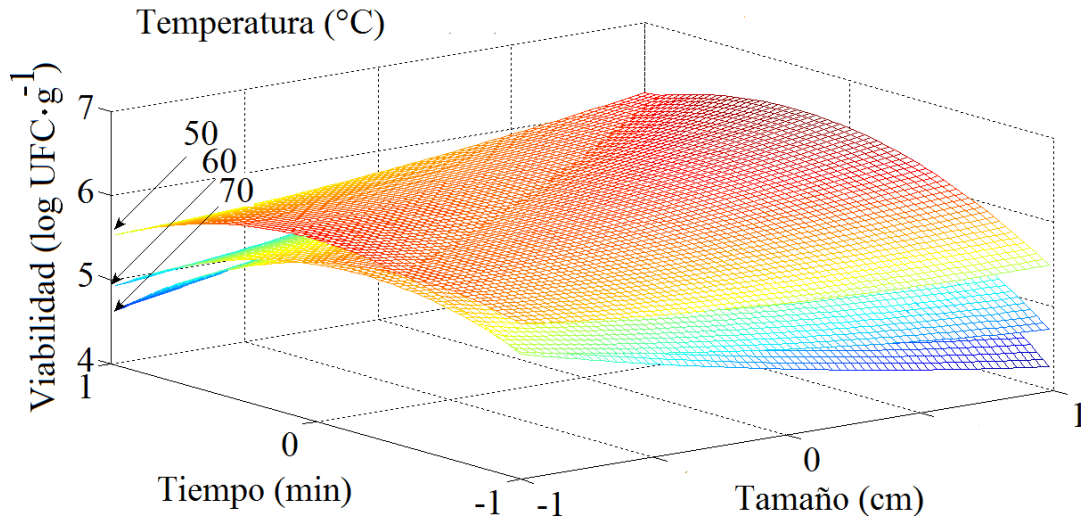
Se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales de viabilidad de lactobacilos mostrados en la Tabla 3.11 en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 32.75 se muestra en la ecuación 3.28:

$$\begin{aligned} \text{Viabilidad} = & 5.85 + 0.082X_1 + 0.168X_2 + 0.077X_3 + 0.468X_1X_2 + 0.212X_1X_3 + \\ & 0.318X_2X_3 + 0.102X_1X_1 - 0.661X_2X_2 + 0.159X_3X_3 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.28})$$

La Figura 3.27 muestra la superficie de respuesta de viabilidad de lactobacilos del queso deshidratado como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado. En general, el análisis de varianza (ANOVA) demostró que las variables independientes no influyen significativamente sobre el contenido de lactobacilos; sin embargo, se observa que a menor tiempo de secado es mayor el número de microorganismos presentes en las muestras



deshidratadas. De acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización, el queso fresco tiene una viabilidad inicial de  $5.39 \log \text{ UFC} \cdot \text{g}^{-1}$  de lactobacilos, la cual es hasta un ciclo logarítmico mayor ( $6.66 \log \text{ UFC} \cdot \text{g}^{-1}$  de lactobacilos) en el queso deshidratado.



**Figura 3.27** Superficie de respuesta de viabilidad como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado

El incremento de temperatura de 50 a 70 °C reduce la cantidad de lactobacilos en las muestras deshidratadas, este comportamiento es consistente con lo reportado por Ghandi *et al.* (2012) quienes mencionan que el incremento de la temperatura disminuye el número de bacterias lácticas debido a la degradación térmica de los microorganismos. De igual manera se observa una ligera tendencia decreciente del contenido de microorganismos lácticos a medida que incrementa el tamaño de partícula de 0.5 a 3.5 cm durante tiempos de secado de 60, 90 y 120 min, esto puede ser debido al hecho de que una deshidratación insuficiente o muy excesiva (humedad  $>5.0\%$  o  $<2.8\%$ ) causa la inactivación de las bacterias (Páez *et al.* 2012).

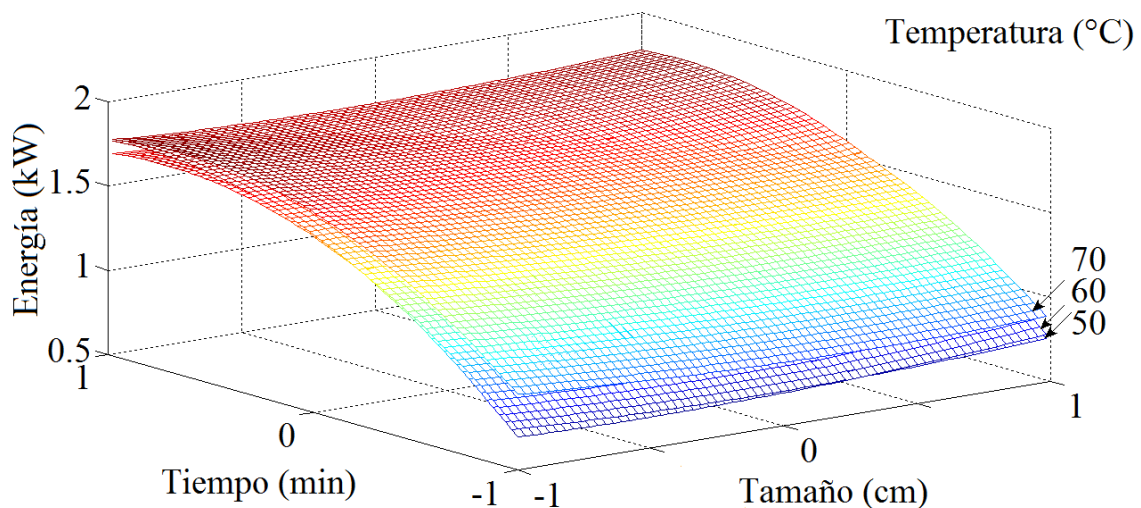
Es bien conocido que la presencia de colonias de microorganismos en el queso es restringido por múltiples factores como: concentración de cloruro de sodio, oxígeno, temperatura, pH,

tiempo y humedad final. También se ha reportado que el proceso de deshidratación causa daño a la membrana de los microorganismos y una inactivación parcial dependiendo de las condiciones de operación (Faccia *et al.* 2012; Ghandi *et al.* 2012).

### 3.14.8 Energía

Los datos experimentales de energía presentados en la Tabla 3.12 se emplearon para desarrollar un modelo de polinomios de segundo orden para predecir el consumo energético durante el proceso de secado. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 96.61 se muestra en la ecuación 3.28:

$$\begin{aligned} \text{Energía} = & 1.49 - 0.0102X_1 + 0.458X_2 - 0.0282X_3 - 0.0184X_1X_2 + 0.0372X_1X_3 + \\ & 0.0621X_2X_3 + 0.0451X_1X_1 - 0.324X_2X_2 + 0.0789X_3X_3 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.28})$$



**Figura 3.28** Superficie de respuesta de energía como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado

El análisis de varianza (ANOVA) para el consumo de energía durante la deshidratación del queso fresco indicó que la temperatura y la interacción de los factores temperatura-tiempo influyen significativamente sobre el consumo de energía. Se observa de manera evidente que el incremento de la temperatura y el tiempo de secado aumentan el consumo de energía durante el proceso (Figura 3.28). Este comportamiento es congruente con lo reportado por Sharma y Prasad (2006) quienes concluyeron que el consumo de energía durante el secado convectivo de dientes de ajo aumentó al incrementar la temperatura de 40 a 70 °C. Así mismo Kocabiyic y Tezer (2009) reportaron el incremento en el consumo de energía, durante el secado infrarrojo de rebanadas de zanahoria, al aumentar la intensidad infrarroja de 200 a 400 W. Por otra parte Tarhan *et al.* (2011) observaron que el incremento del tiempo de secado aumentó el consumo de energía total, obteniendo menor consumo de energía a temperaturas de secado de 55 a 60 °C. Concluyeron que otro factor que influye en el consumo de energía es la cantidad de agua removida de los materiales húmedos, por lo que la cantidad de energía específica que considera la cantidad de agua removida fluctuó en un rango de 6.12 a 8.89 MJ·Kg<sup>-1</sup> de agua.

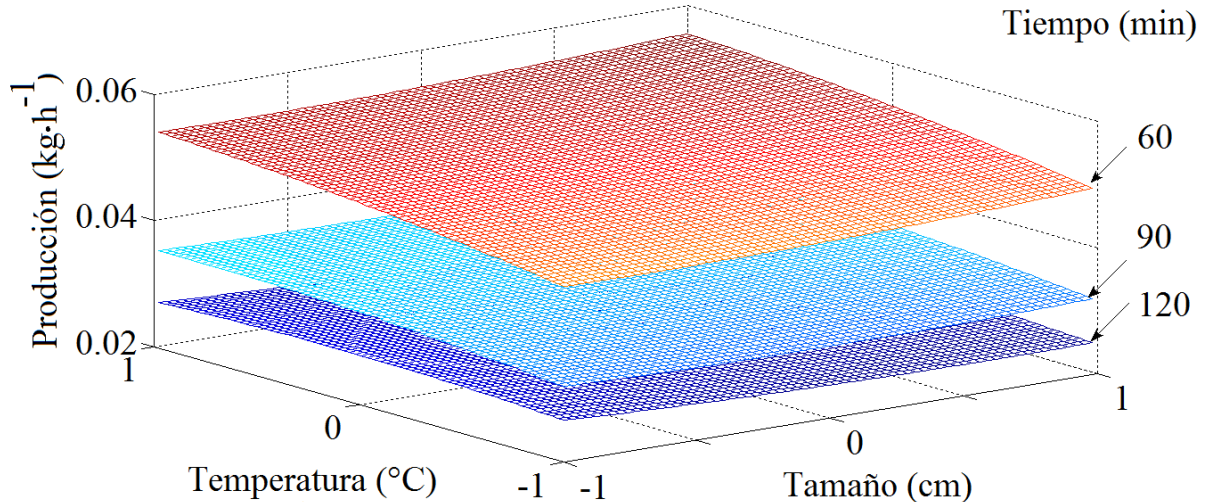
Finalmente de acuerdo a los resultados de la Tabla 3.12 los valores de consumo de energía se encuentran en un rango de 0.5293 – 1.7600 kW. Las condiciones que permitieron obtener el menor consumo de energía con respecto a la gráfica de superficie de respuesta fueron: temperatura de 50 °C con un tiempo de secado de 60 min, mientras que el tamaño de partícula del queso no influyó sobre la variable de respuesta.

### 3.14.9 Producción

A partir de los resultados obtenidos experimentalmente para producción (3.12), se realizó la regresión lineal en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 97.87 ( $p=0.10$ ) se indica en la ecuación 3.29:

$$\begin{aligned} \text{Producción} = & 0.0341 + 0.000032X_1 + 0.00172X_2 - 0.0129X_3 + 0.000017X_1X_2 \\ & - 0.000825X_1X_3 - 0.00146X_2X_3 + 0.00063X_1X_1 - 0.00096X_2X_2 \\ & + 0.00527X_3X_3 \end{aligned}$$

La Figura 3.29 muestra la superficie de respuesta de producción del queso deshidratado como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado. El análisis de varianza (ANOVA) indicó que el tiempo de secado influyó significativamente sobre la producción obtenida.



**Figura 3.29** Superficie de respuesta de producción como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado

Se observa de manera evidente que la mayor producción se obtuvo con un tiempo de secado de 60 min, debido a que a estas condiciones el producto posee un porcentaje de humedad

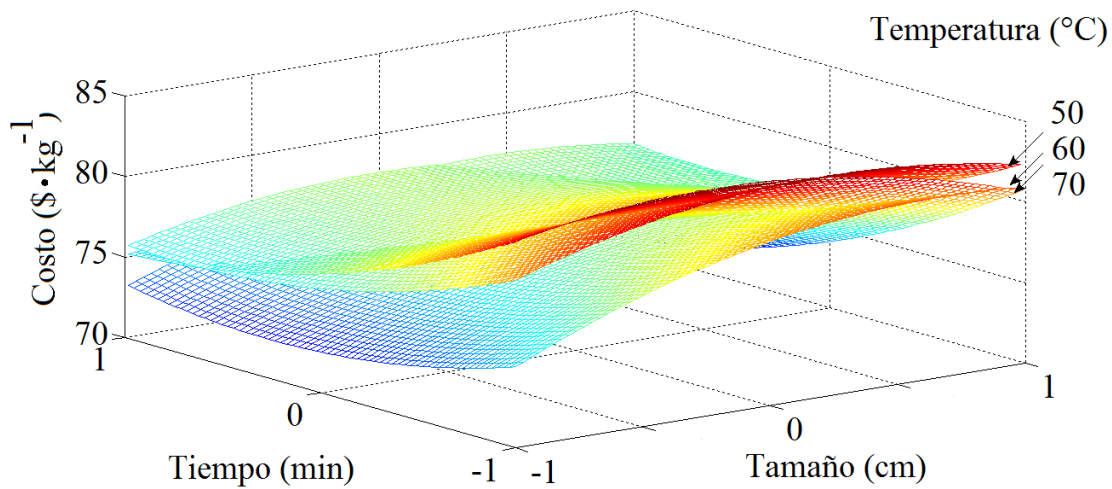
mayor que las muestras deshidratadas a tiempos de 90 y 120 min. Un comportamiento similar fue reportado por Luna-Solano *et al.* (2005) durante la optimización de levadura de cerveza mediante el secado por aspersión, sus resultados demostraron que la producción de levadura fue mayor a temperaturas bajas del proceso de secado. Esto era esperado porque a temperaturas bajas habrá mayor humedad en el producto y por lo tanto mayor producción, (Luna-Solano *et al.* 2005; Kozanoglu *et al.* 2012). Caso contrario a lo reportado por Da Cunha *et al.* (2006) durante el estudio de las condiciones de operación del secado por lecho fluidizado sobre la calidad de pulpa de mango, quienes reportaron que disminuyendo la humedad del producto por aumento de la temperatura, se evita su adherencia en las paredes del secador, por lo que hay un mejoramiento en la producción.

#### 3.14.10 Costo

Se realizó la regresión lineal de los resultados experimentales del costo total mostrados en la Tabla 3.12 en función de las variables independientes estudiadas. El modelo que se obtuvo con un coeficiente de correlación de 47.60 ( $p=0.10$ ) se indica en la ecuación 3.30:

$$\begin{aligned} \text{Costo} = & 78.9752 + 0.3416X_1 - 2.9177X_2 - 0.4014X_3 - 0.5965X_1X_2 + 2.0235X_1X_3 + \\ & 1.4733X_2X_3 - 2.1916X_1X_1 + 1.6476X_2X_2 - 1.5135X_3X_3 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.30})$$

El análisis de varianza (ANOVA) indicó que los factores de estudio no influyeron significativamente sobre la variable de respuesta. De acuerdo con los resultados el costo de producción durante el proceso de secado se encontró en un rango de 72.11 a 87.20  $\text{\$}\cdot\text{kg}^{-1}$ .



**Figura 3.30** Superficie de respuesta de costo como función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado

En la Figura 3.30 se observa que las muestras deshidratadas en un tiempo de 60 min a una temperatura de 50 °C y tamaño de partícula de 3.5 cm presentaron el mayor costo de producción en comparación con las muestras deshidratadas a 90 y 120 min, debido al hecho de que a estas condiciones se obtiene la mayor producción de queso deshidratado. Se observó que a mayor tiempo de secado y mayor temperatura el costo de producción disminuye, esto era esperado porque a altas temperaturas habrá menor humedad en el producto y por lo tanto menor producción. El objetivo principal de cualquier proceso de secado es reducir el deterioro y mejorar la calidad para generar un producto deshidratado a un mínimo costo, (Pérez-Francisco *et al.* 2008; Jangam *et al.* 2010). Desafortunadamente poca información sobre costo de proceso ha sido publicada en literatura abierta y mucha de ella ha sido retenida por la industria como confidencial (Kudra, 2014). Por ejemplo Luna-Solano *et al.* (2005) y Pérez-Francisco *et al.* (2008), publicaron estudios científicos con la finalidad de encontrar las condiciones de operación del proceso de secado para lograr un costo de producción mínimo de

levadura de cerveza deshidratada obtenida mediante secado por aspersión y de chayote (*Sechiumedule*) deshidratado en un secador por charolas respectivamente. También Wade (1998) informa los costos de operación en el secado de madera, bagazo, paja y residuos agrícolas en secadores rotatorios, de disco, y secadores de vapor.

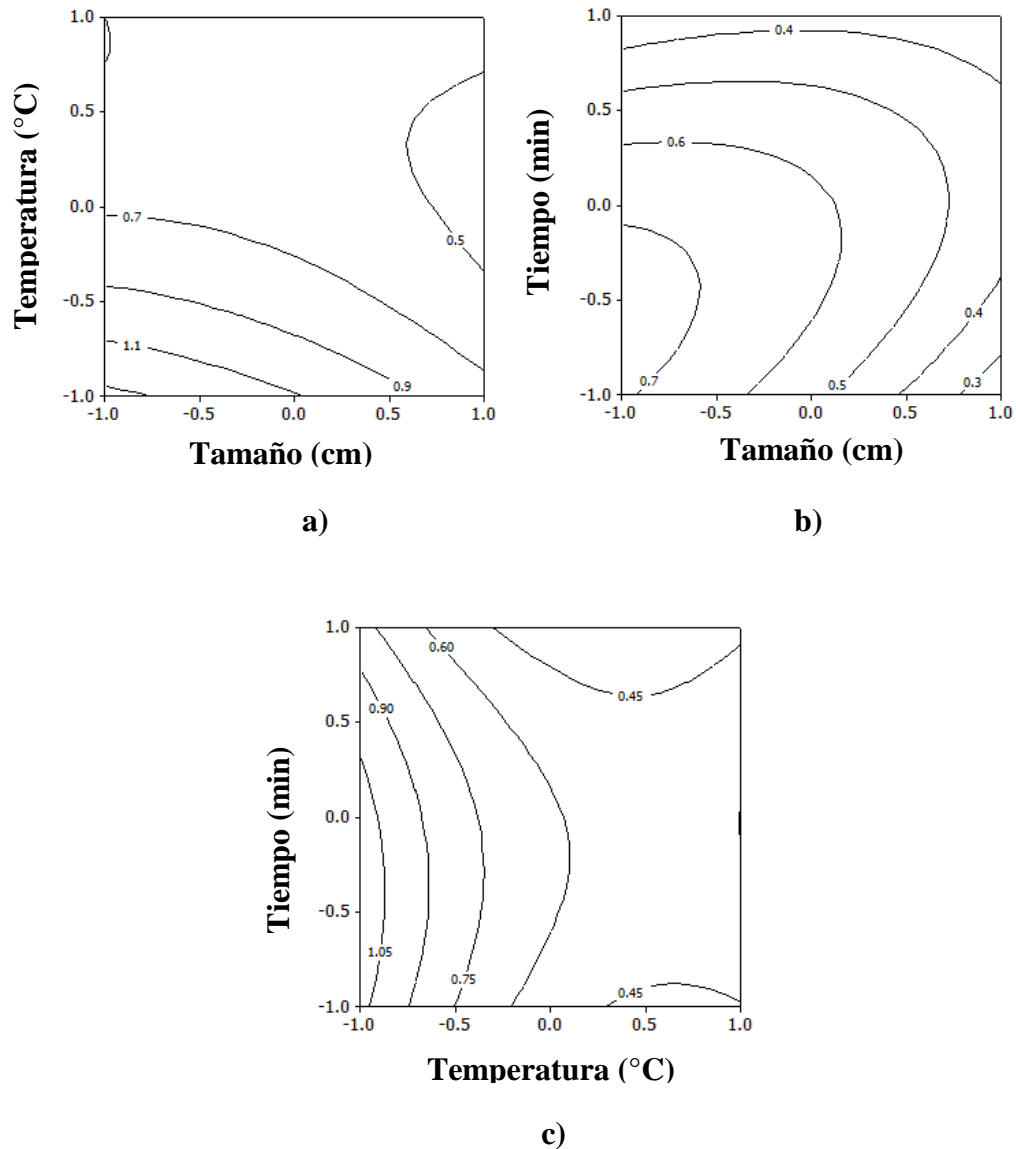
### 3.15 Gráficos de contornos

A partir de los modelos de segundo orden descritos en la sección anterior se generaron los gráficos de contornos para cada una de las variables de respuesta (humedad, actividad de agua, diferencia de color, cloruro de sodio, grasa, viabilidad, proteínas, energía, producción y costo) empleando el software Minitab 10. Se realizó un análisis de las regiones óptimas para cada factor con la finalidad de obtener las zonas factibles para localizar el valor mínimo o máximo deseado.

#### 3.15.1 Humedad

En la Figura 3.31a se observa que la región donde se tiene el mínimo contenido de humedad final (menor de 0.5 H<sub>2</sub>O/g.s.s) se encontró en el intervalo de tamaño de partícula de 2.87 a 3.5 cm (valores codificados de 0.58 y 1 respectivamente) con temperatura de secado de 56.4 a 67.2 °C (valores codificados de -0.36 y 0.72). Mientras que en la Figura 3.31b se observa que la región donde se presentó el mínimo contenido de humedad final (menor de 0.3 H<sub>2</sub>O/g.s.s) se encontró en el intervalo de tamaño de partícula de 3.155 a 3.5 cm (valores codificados de 0.77 y 1 respectivamente) con tiempo de secado de 50 a 66.9 min (valores codificados de -1 y -0.77). Finalmente en la Figura 3.31c se observa que la región donde se presentó el mínimo contenido de humedad final (menor de 0.45 H<sub>2</sub>O/g.s.s) se encontró en el intervalo de

temperatura de 62.8 a 70 °C (valores codificados de 0.28 y 1 respectivamente) con tiempo de secado de 60 a 64.2 min (valores codificados de -1 y -0.86).



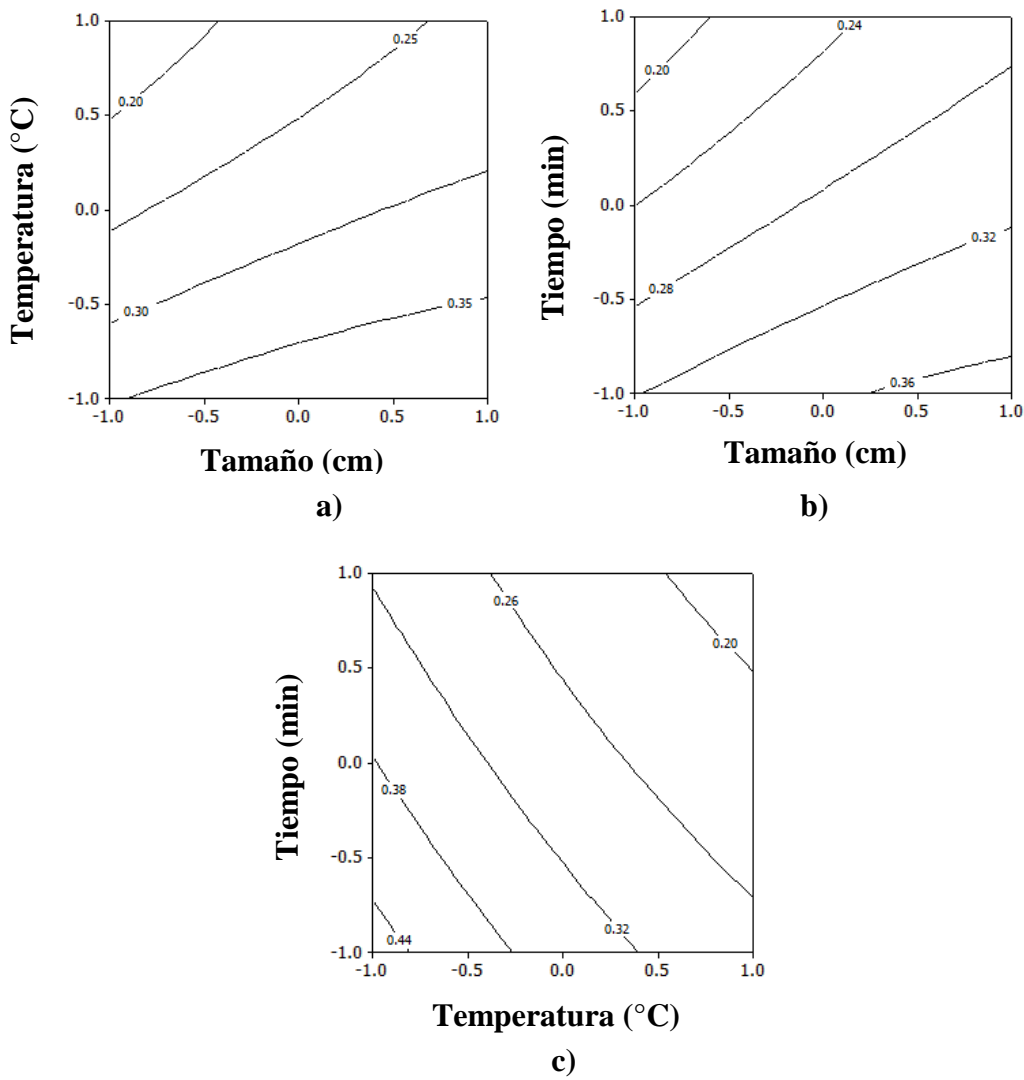
**Figura 3.31** Gráficas de contornos de humedad en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado

### 3.15.2 Actividad de agua

En la Figura 3.32a se observa que la región que presentó el mínimo contenido de actividad de agua (menor a 0.20) se obtiene a un tamaño de partícula de 0.5 a 1.37 cm (valores codificados



de -1 y -0.42) y temperatura de secado de 64.68 a 70 °C. Por otra parte en la Figura 3.32b se observa que la región que presentó el mínimo contenido de actividad de agua (menor a 0.20) se obtiene a un tamaño de partícula de 0.5 a 1.09 cm (valores codificados de -1 y -0.601) y temperatura de secado de 107.49 a 120 °C. Finalmente en la Figura 3.32c se observa que la región que mostró el mínimo contenido de actividad de agua (menor a 0.20) se obtiene a una temperatura de secado de 65.19 a 70 °C (valores codificados de 0.519 y 1) y tiempo de secado de 104.04 a 120 min (valores codificados de 0.468 y 1).

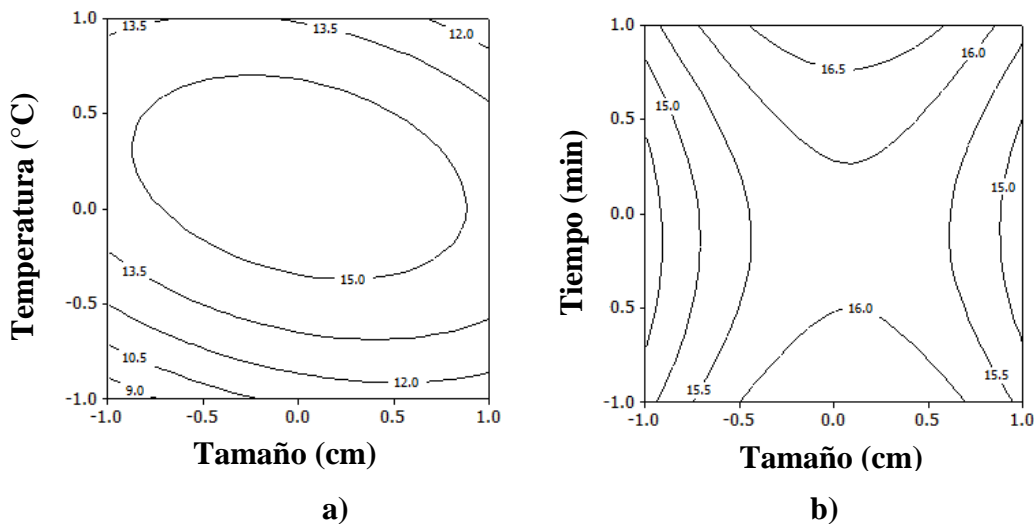


**Figura 3.32** Gráficas de contornos de actividad de agua en función del tamaño de partícula, temperatura

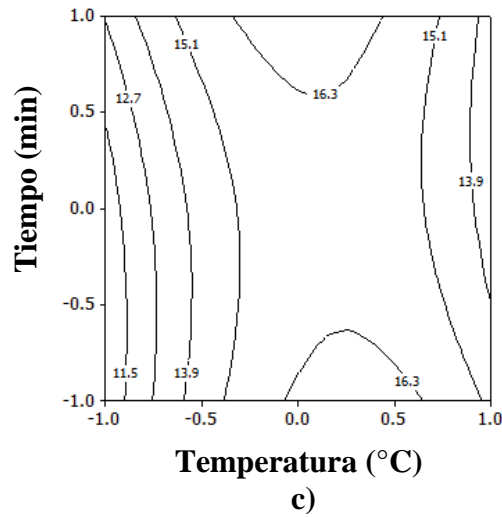
### 3.15.3 Diferencia de color

En la Figura 3.33a se observa que la región que presentó la mínima diferencia de color (menor a 9) se obtuvo a un tamaño de partícula de 0.5 a 0.872 cm (valores codificados de -1 y -0.752) y temperatura de secado de 50 a 51.25  $^{\circ}\text{C}$  (Valores codificados de -1 y -0.875).

En la Figura 3.33b se observa que la región que presentó la mínima diferencia de color (menor a 15) se obtuvo a un tamaño de partícula de 0.5 a 0.581 cm (valores codificados de -1 y -0.946) y tiempo de secado de 60 a 114.6 min (Valores codificados de -1 y 0.820). Finalmente en la Figura 3.33c se observa que la región que presentó la mínima diferencia de color (menor a 11.5) se obtuvo a una temperatura de (valores codificados de -1 y -0.946) y tiempo de secado de 60 a 114.6 min (Valores codificados de -1 y 0.820).



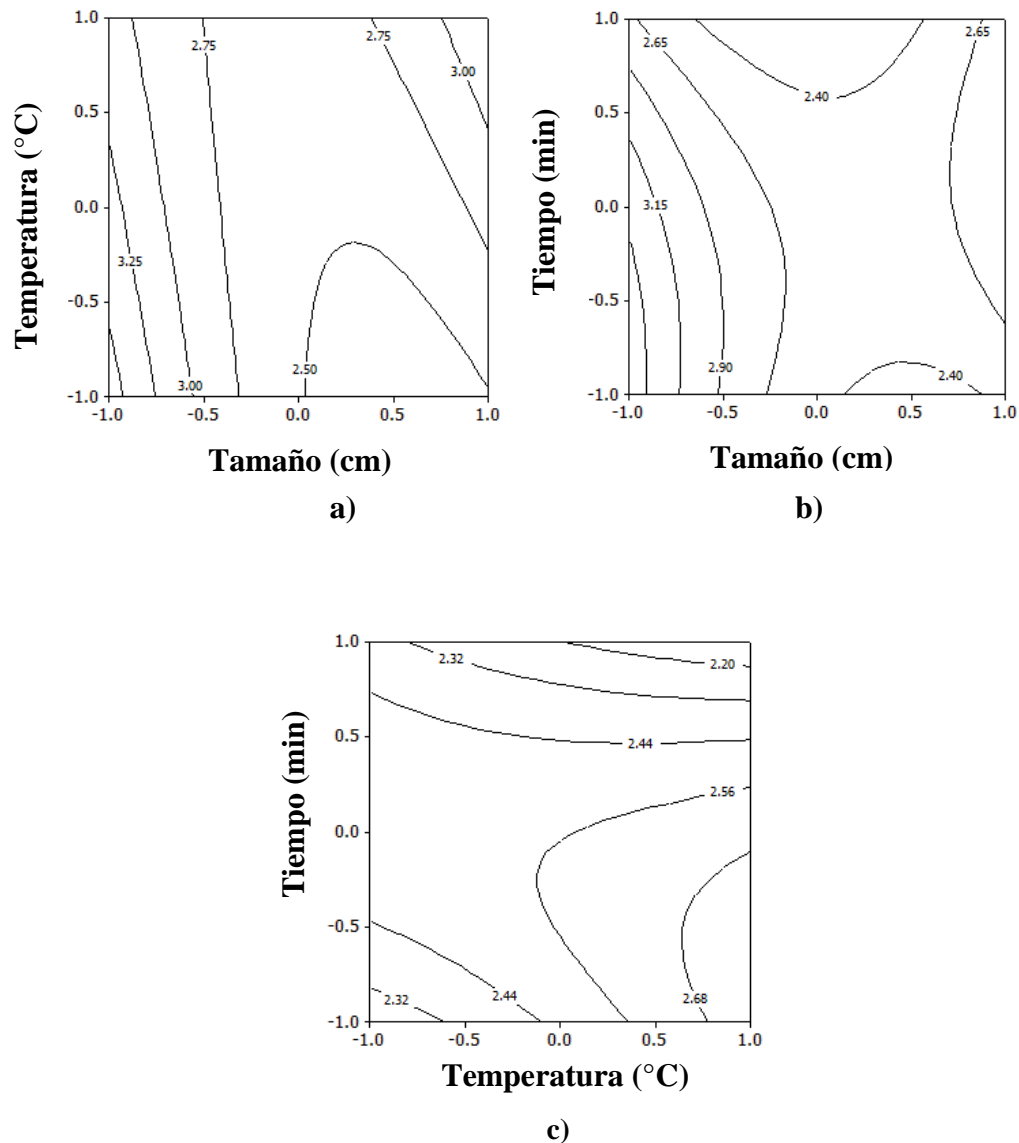
Continúa Figura 3.33...



**Figura 3.33** Gráficas de contornos de actividad de agua en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado

#### 3.15.4 Cloruro de sodio

En la Figura 3.34a se observó que la región que presenta el menor contenido de cloruro de sodio (menor a 2.50) se obtuvo a un tamaño de partícula de 2.69 a 3.5 cm (valores codificados de 0.023 y 1) y temperatura de secado de 50 a 58.29 °C (Valores codificados de -1 y -0.171). Mientras que en la Figura 3.34b se observa que la región que presentó el menor contenido de cloruro de sodio (menor a 2.40) se obtuvo a un tamaño de partícula de 1.80 a 3.24 cm (valores codificados de 0.131 y 0.87) y tiempo de secado de 50 a 65.7 min (Valores codificados de -1 y -0.81). Finalmente en la Figura 3.34c se observa que la región que presentó el menor contenido de cloruro de sodio (menor a 2.20) se obtuvo a una temperatura de 60.23 a 70 °C (valores codificados de 0.023 y 1) y tiempo de secado de 115.5 a 120 min (Valores codificados de 0.85 a 1).

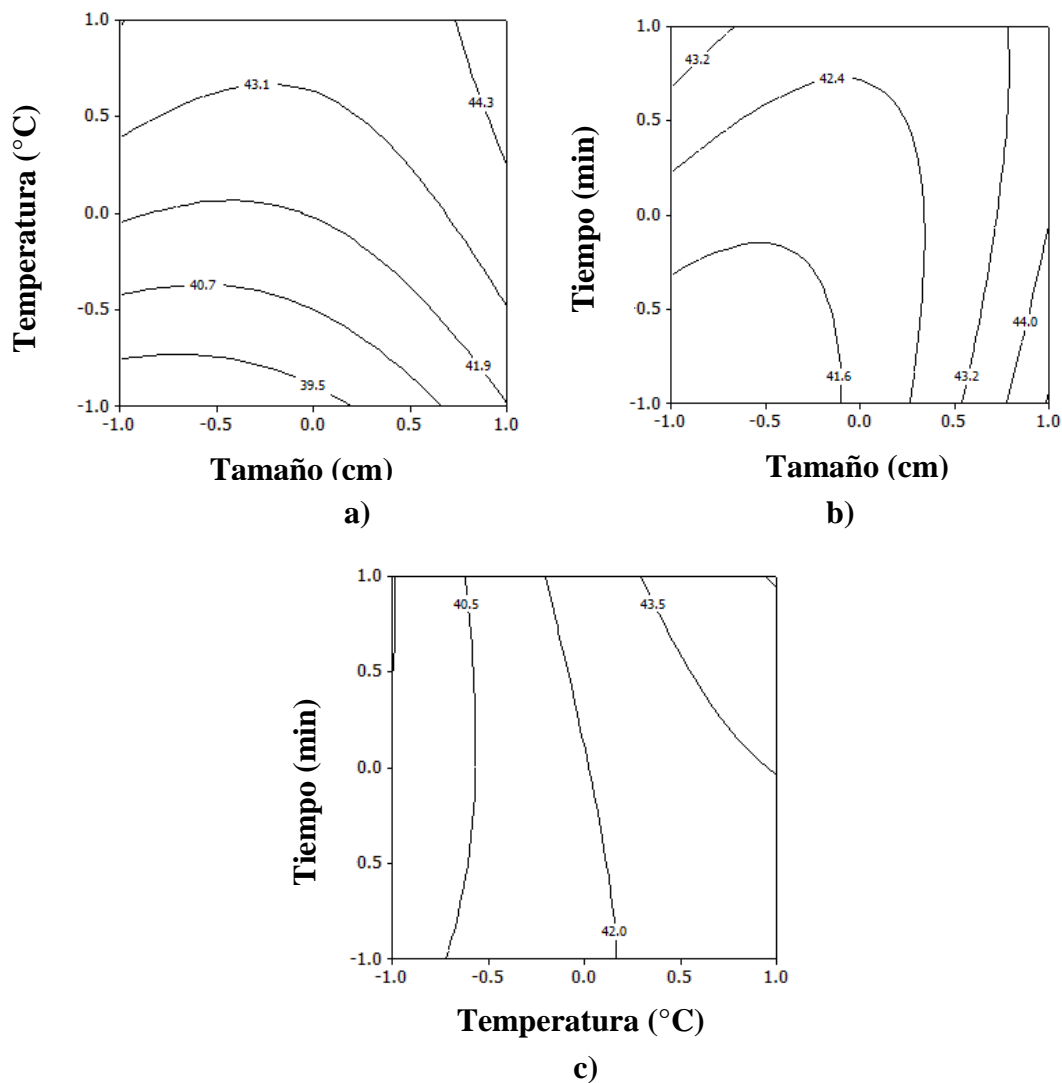


**Figura 3.34** Gráficas de contornos de cloruro de sodio en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado

### 3.15.5 Grasa

En la Figura 3.35a se observa que la región que presentó el menor contenido grasa (menor a 39.5) se obtuvo a un tamaño de partícula de 0.6 a 2.27 cm (valores codificados de -1 y 0.181) y una temperatura de secado de 50 a 52.83 (Valores codificados de -1 a -0.717). En la Figura 3.35b se observa que la región que presentó el menor contenido grasa (menor a 39.5) se

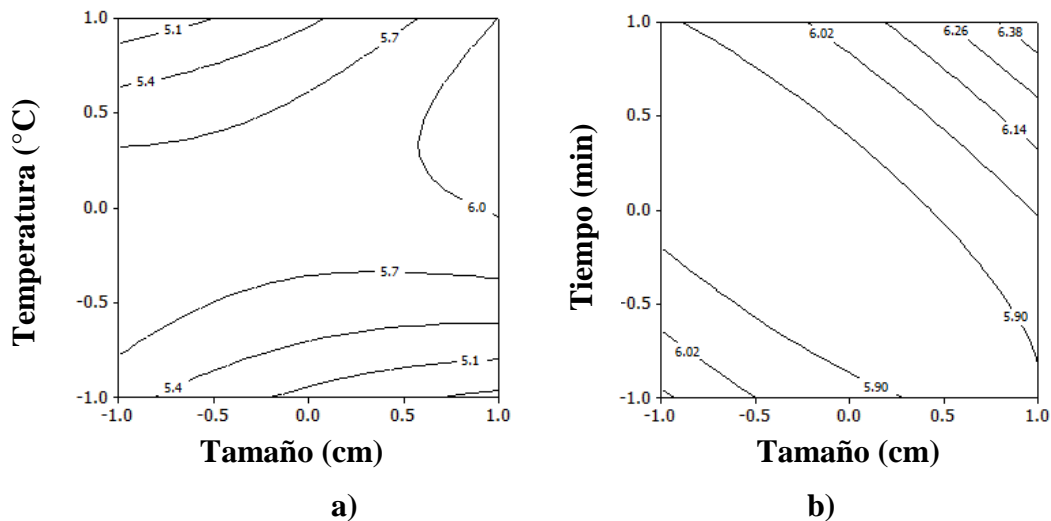
obtuvo a un tamaño de partícula de 0.5 a 1.853 cm (valores codificados de -1 y -0.098) y una temperatura de secado de 50 a 52.83 (Valores codificados de -1 a -0.717). Mientras que en la Figura 3.35c se observa que la región que presentó el menor contenido grasa (menor a 40.5) se obtuvo a una temperatura de secado de 50 a 54.35 °C (valores codificados de -1 y -0.565) y un tiempo de secado de 60 a 120 min (Valores codificados de -1 a 1).



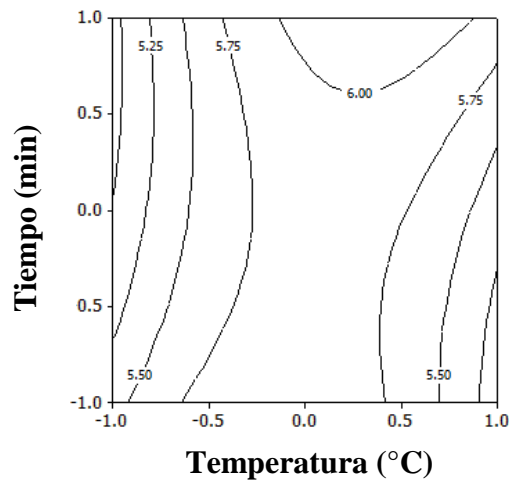
**Figura 3.35** Gráficas de contornos de contenido de grasa en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado

### 3.15.6 Viabilidad

En la Figura 3.36a se observa que la región que presentó el mayor contenido de bacterias lácticas (mayor a 6 log UFC) se obtuvo a un tamaño de partícula de 2.84 a 3.5 cm (valores codificados de 0.562 y 1) y una temperatura de secado de 59.51 a 70 °C (Valores codificados de -0.049 a 1). De igual manera en la 3.36b se observa que la región que presentó el mayor contenido de bacterias lácticas (mayor a 6.38 log UFC) se obtuvo a un tamaño de partícula de 3.16 a 3.5 cm (valores codificados de 0.778 y 1) y un tiempo de secado de 114.81 a 120 min (Valores codificados de 0.778 a 1). Finalmente en la Figura 3.36c se observa que la región que presentó el mayor contenido de bacterias lácticas (mayor a 6 log UFC) se obtuvo a una temperatura de secado de 58.52 a 68.78 °C (valores codificados de -0.148 y 0.878) y un tiempo de secado de 107.91 a 120 min (Valores codificados de 0.597 a 1).



Continúa Figura 3.36...



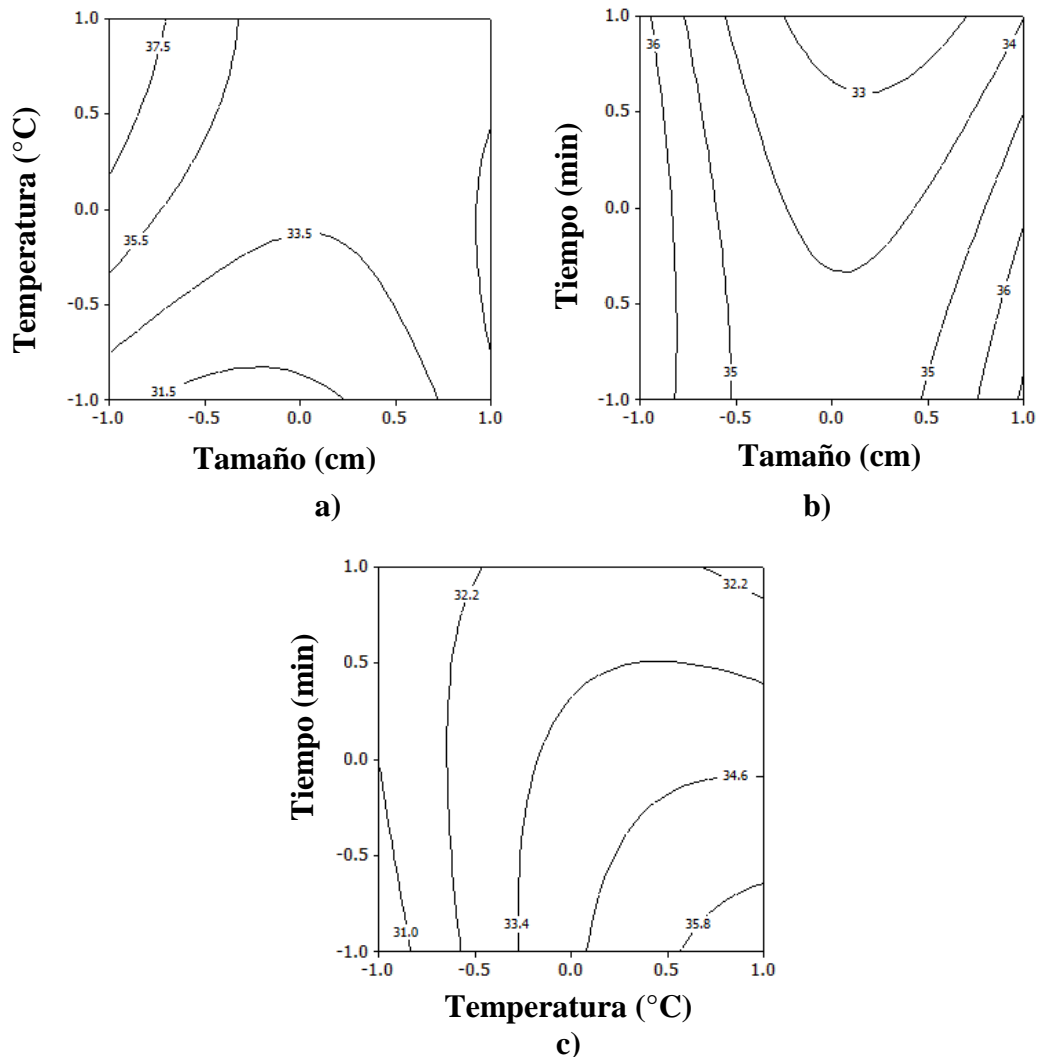
c)

**Figura 3.36** Gráficas de contornos de viabilidad en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado

### 3.15.7 Proteínas

En la Figura 3.37a se observa que la región que presentó el mayor contenido de proteínas (mayor a 37.5) se obtuvo a un tamaño de partícula de 0.5 a 0.93 cm (valores codificados de -1 y -0.709) y temperatura de secado de 61.8 a 70 °C (Valores codificados de 0.180 y 1). En la Figura 3.37b se observa que la región que presentó el mayor contenido de proteínas (mayor a 36%) se obtuvo a un tamaño de partícula de 0.5 a 0.797 cm (valores codificados de -1 y -0.802) y tiempo de secado 60 a 120 min (Valores codificados de -1 y 1).

Finalmente en la Figura 3.37c se observa que la región que presentó el mayor contenido de proteínas (mayor a 35.8%) se obtiene a una temperatura de 65.55 a 70 °C (valores codificados de 0.55 y 1) y tiempo de secado de 60 a 71.28 min (Valores codificados de -1 y -0.624).



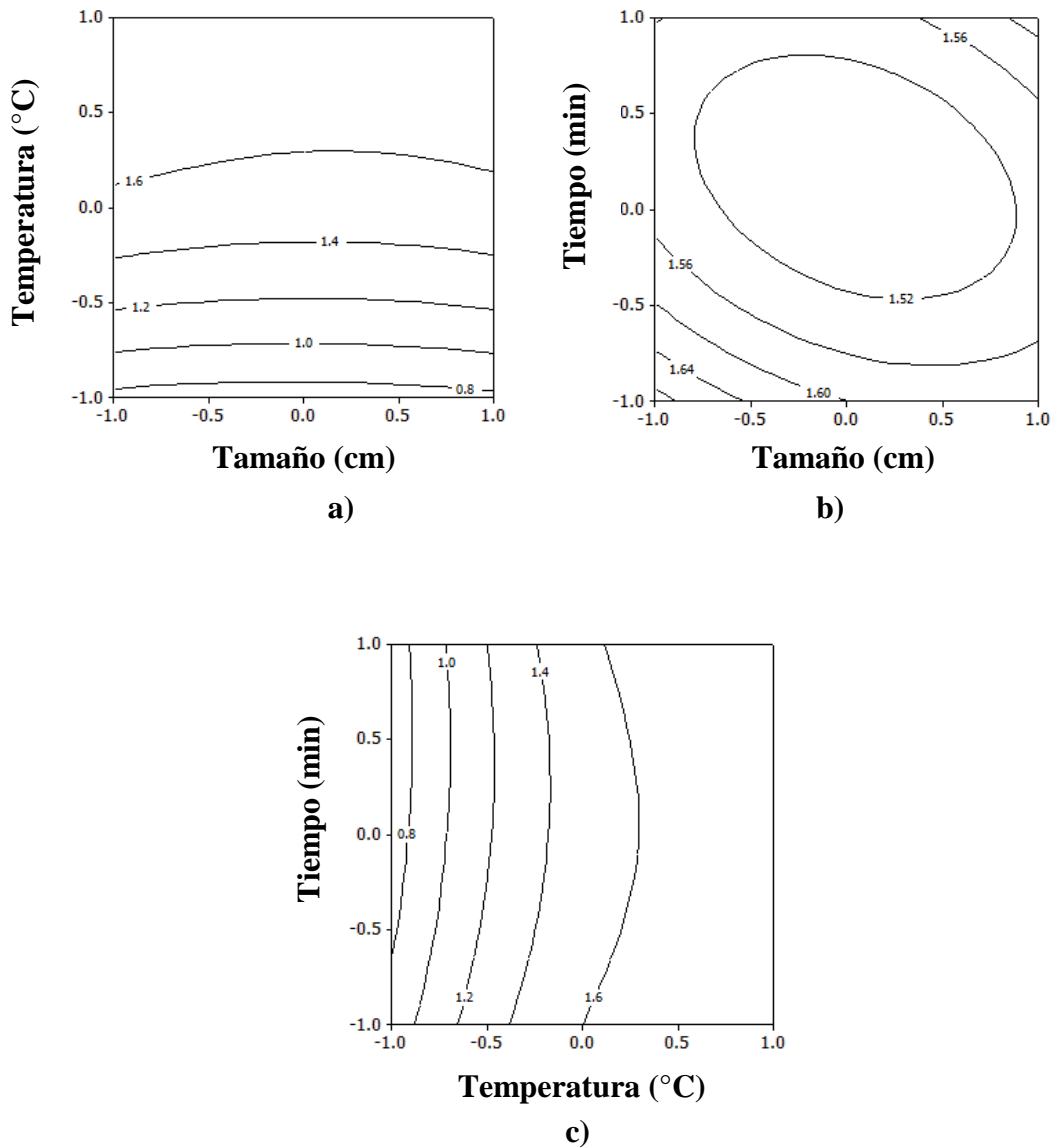
**Figura 3.37** Gráficas de contornos de proteínas en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado

### 3.15.8 Energía

En la Figura 3.38a se observa que la región que presentó menor consumo de energía (menor a 0.8 kW) se obtuvo a un tamaño de partícula 0.5 a 3.5 cm (valores codificados de -1 y 1) y una temperatura de secado de 50 a 51.02 °C (Valores codificados de -1 y -0.898). Mientras que en la Figura 3.38b se observa que la región que presentó menor consumo de energía (menor a



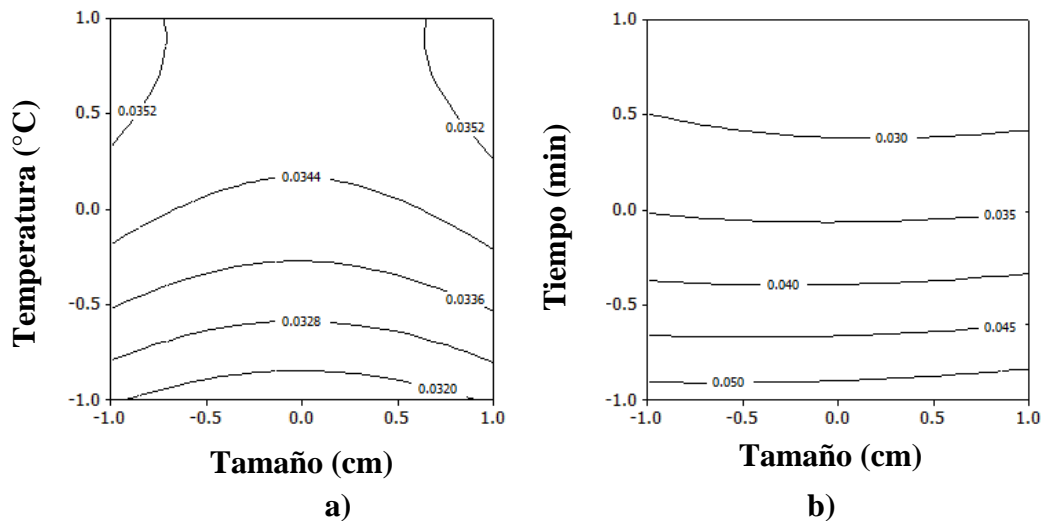
1.52 kW) se obtuvo a un tamaño de partícula 0.797 a 3.32 cm (valores codificados de -0.802 y 0.885) y tiempo de secado de 76.02 a 114.39 min (Valores codificados de -0.466 y 0.813).



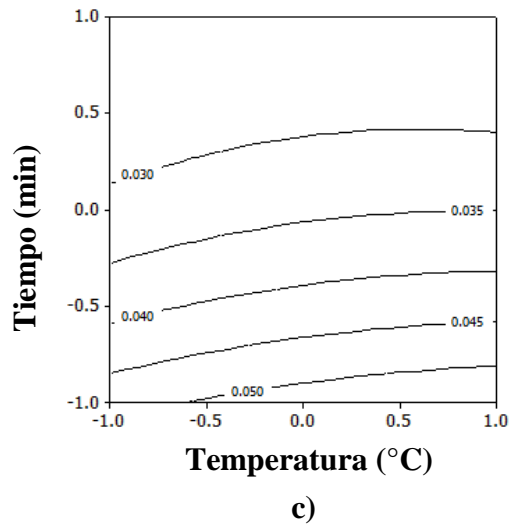
**Figura 3.38** Gráficas de contornos de energía en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado

### 3.15.9 Producción

En la Figura 3.39a se observa que la región que presentó mayor producción (mayor a 0.0352) se obtuvo a un tamaño de partícula de 0.5 a 0.947 cm (valores codificados de -1 y -0.702) y una temperatura de secado de 63.24 a 70 °C (Valores codificados de 0.324 y 1). En la Figura 3.39b se observa que la región que presentó mayor producción (mayor a 0.050) se obtuvo a un tamaño de partícula de 0.5 a 3.5 cm (valores codificados de -1 y 1) y un tiempo de secado de 60 a 65.25 min (Valores codificados de -1 y -0.825). Finalmente en la Figura 3.39c se observa que la región que presentó mayor producción (mayor a 0.050) se obtuvo a una temperatura de secado de 54.06 a 70 °C (valores codificados de -0.594 y 1) y un tiempo de secado de 60 a 66.12 min (Valores codificados de -1 y -0.796).



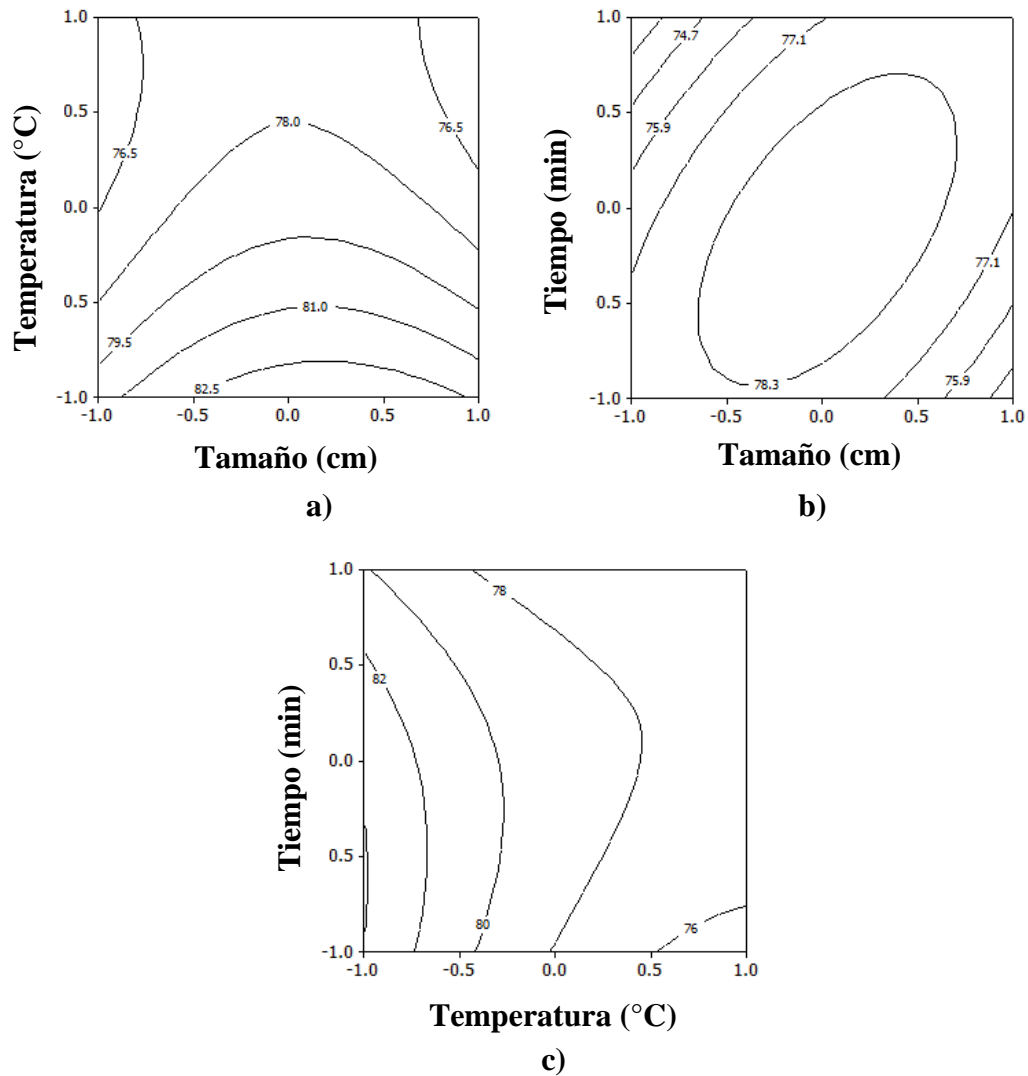
Continúa Figura 3.39...



**Figura 3.39** Gráficas de contornos de producción en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado

### 3.15.10 Costo

En la Figura 3.40a se observa que la región que presentó menor costo (menor a 76.5) se obtuvo a un tamaño de partícula de 0.5 a 0.861 (valores codificados de -1 y -0.759) y una temperatura de secado de 59.8 a 70 °C (Valores codificados de -0.020 y 1). En la Figura 3.40b se observa que la región que presentó menor costo (menor a 74.7) se obtiene a un tamaño de partícula de 0.5 a 1.055 cm (valores codificados de -1 y -0.630) y un tiempo de secado 105.75 a 120 min (Valores codificados de 0.525 y 1). Finalmente en la Figura 3.40c se observa que la región que presentó menor costo (menor a 76) se obtuvo a una temperatura de secado de 65.19 a 70 °C (valores codificados de 0.519 y 1) y un tiempo de secado de 60 a 67.62 min (Valores codificados de -1 y -0.746).



**Figura 3.40** Gráficas de contornos de costo en función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado

### 3.16 Gráficas de superposición de contornos

Para elaborar las gráficas de superposición de contornos se emplearon los valores descritos en la sección 3.15 y recopilados en la Tabla 3.13 para cada una de las variables de respuesta (humedad, actividad de agua, diferencia de color, cloruro de sodio, grasa, viabilidad,

proteínas, energía, producción y costo) como función del tamaño de partícula ( $X_1$ ), temperatura ( $X_2$ ) y tiempo de secado ( $X_3$ ).

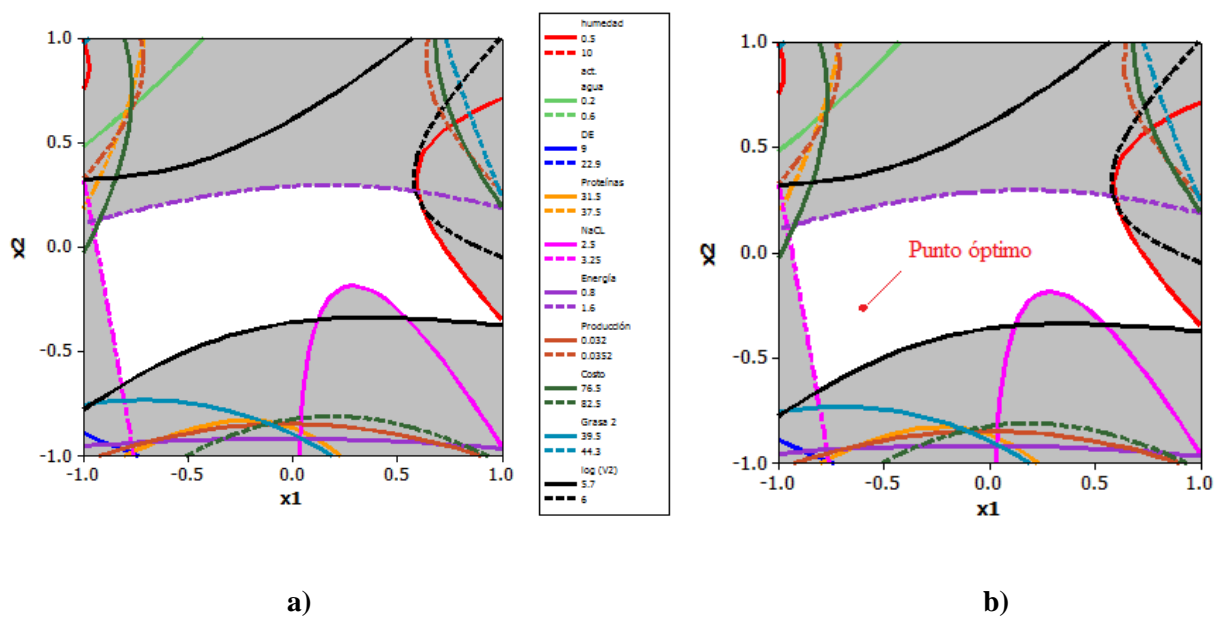
**Tabla 3.13** Puntos óptimos de operación

Variables de respuesta	Combinación de factores					
	$X_1X_2$		$X_2X_3$		$X_1X_3$	
	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
Humedad (%)	0.5	1.1	0.45	1.05	0.3	0.7
$a_w$	0.20	0.35	0.20	0.44	0.20	0.36
$\Delta E$	9.0	15	11.5	16.3	15	16.5
NaCl (%)	2.5	3.25	2.20	2.68	2.40	3.15
Grasa (%)	39.5	44.3	40.5	43.5	41.6	44
Viabilidad (log UFC)	5.7	6	5.25	6	5.90	6.38
Proteínas (%)	31.5	37.5	31	35.8	33	36
Energía (kW)	0.8	1.6	0.8	1.6	1.52	1.64
Producción (kg/h)	0.0320	0.0352	0.030	0.050	0.030	0.050
Costo (\$/kg)	76.5	82.5	76	82	74.7	78.3

Como se mencionó anteriormente, las condiciones óptimas del proceso de secado pueden ser determinadas a partir de la región derivada de la superposición de contornos en función de dos variables independientes, mientras que la otra variable independiente se mantiene constante. Esta técnica proporciona la región de operación factible al especificar los valores obtenidos en las gráficas de contorno para cada variable dependiente.

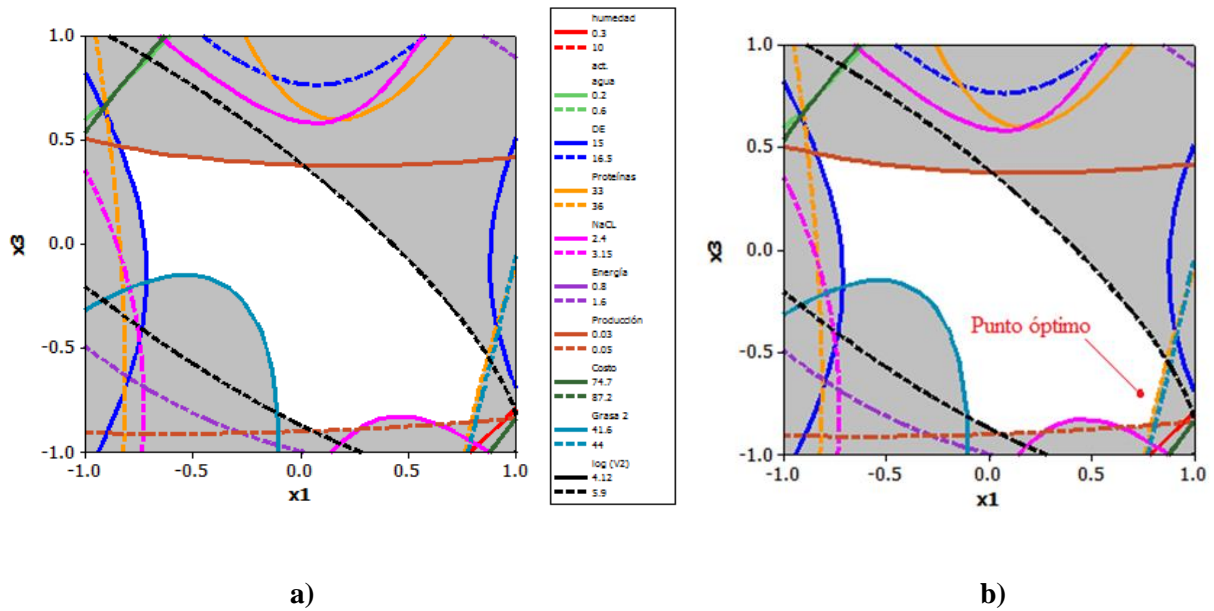
La región factible es representada en la Figura 3.41 por la zona blanca. Con la ayuda del software Minitab 10 se localizaron los puntos óptimos de operación del proceso por lecho fluidizado de queso fresco que cumplieron con las restricciones descritas en la sección 2.15.

De acuerdo con los resultados proporcionados por el Software Minitab 10, las coordenadas correspondientes al punto óptimo fueron: tamaño de partícula de 1.10 cm y temperatura de secado de 57.67 °C (Valores codificados de -0.5959 y -0.2323 Figura 3.41b).



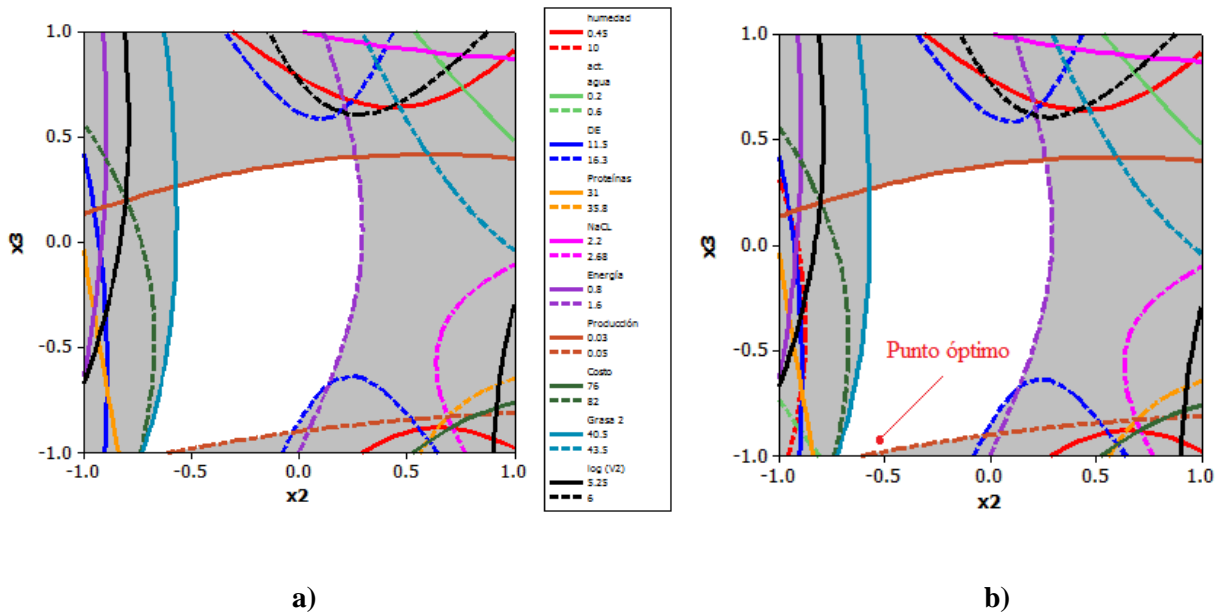
**Figura 3.41** Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado.

La gráfica de superposición de contornos en función de las variables independientes (tamaño de partícula y tiempo de secado) se muestran en la Figura 3.42a. De acuerdo con los resultados proporcionados por el software Minitab 10 las coordenadas correspondientes a los puntos estacionarios fueron: tamaño de partícula de 3.13 cm y tiempo de secado de 68.48 min (valores codificados de 0.7575 y -0.7171 respectivamente) los cuales se presentan en la Figura 3.42b.



**Figura 3.42** Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado.

Finalmente, en la Figura 3.43a se presenta la gráfica de superposición de contornos en función de las variables independientes (temperatura y tiempo de secado).



**Figura 3.43** Gráficas de superposición de contornos de las variables dependientes como función del tamaño de partícula, temperatura y tiempo de secado.

Las coordenadas de los puntos estacionarios obtenidas con el software Minitab 10 fueron: temperatura de secado de 64.84 °C y tiempo de secado de 61.21 min (valores codificados de -0.5151 y -0.9595 respectivamente) los cuales se indican en la Figura 3.43b.

El análisis de las gráficas de superposición de contornos permitieron obtener las regiones óptimas del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco las cuales fueron: tamaño de partícula de 1.1060 a 3.1363 cm, temperatura de secado de 57.6767 a 64.84 °C y tiempo de secado de 61.2121 a 68.9898 min. Con estos valores se buscó la mejor combinación de las regiones óptimas obteniendo así los siguientes puntos: tamaño de partícula de 1.7 cm, temperatura de secado de 55.5 °C y tiempo de secado de 72.12 min (valores codificados de 0.1919,-0.4343 y -0.5959 respectivamente). Cada valor codificado fue sustituido en los modelos de segundo orden descritos en la sección 3.14 para obtener los valores óptimos de las variables de respuesta.

### **3.17 Validación de las condiciones óptimas del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco**

La Tabla 3.44 muestra los resultados de las variables de respuesta obtenidas durante la validación experimental de los puntos óptimos calculados en la sección 3.15. El error relativo ( $E_r$ ) se calculó mediante la ecuación 11 descrita en la sección de materiales y métodos. Para el caso de la viabilidad y producción, el porcentaje de error fue alto debido a que se obtuvieron valores mayores a los predichos por la optimización. Mientras que para el costo el error fue debido a que se obtuvo un menor costo durante la validación. Para las demás variables de respuestas, la diferencia y el porcentaje de error son lo suficientemente bajos y pueden ser aceptables, los resultados de la verificación fueron muy próximos a los valores predichos



obtenidos de los modelos de optimización. Los resultados experimentales demostraron que las condiciones óptimas de proceso para producir queso deshidratado fueron tamaño de partícula 1.7 cm, temperatura de secado de 55 °C y tiempo de secado de 72 min.

**Tabla. 3.14** Respuestas óptimas del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco

Condiciones de Operación	Parámetros	Respuestas	Validación	E <sub>r</sub> (%)
Tamaño 1.7 cm Temperatura 55 °C Tiempo 72 min	Humedad (%)	0.71	0.77	8.12
	a <sub>w</sub>	0.37	0.36	3.38
	ΔE	14.70	17.11	14.07
	NaCl (%)	2.39	2.46	2.70
	Grasa (%)	41.39	42.86	3.40
	Viabilidad (log UFC)	5.70	6.66	14.39
	Proteínas (%)	33.08	30.79	7.43
	Energía (kW)	1.28	1.34	4.23
	Producción (kg/h)	0.04	0.047	9.81
	Costo (\$/kg)	80.46	70.85	13.56

Erbay *et al.* 2015 realizó la optimización del proceso de secado por aspersión en la producción de queso en polvo. Los resultados obtenidos para las condiciones óptimas del proceso de secado por aspersión fueron muy cercanos a los predichos por los modelos de optimización.

### 3.18 Almacenamiento de queso deshidratado

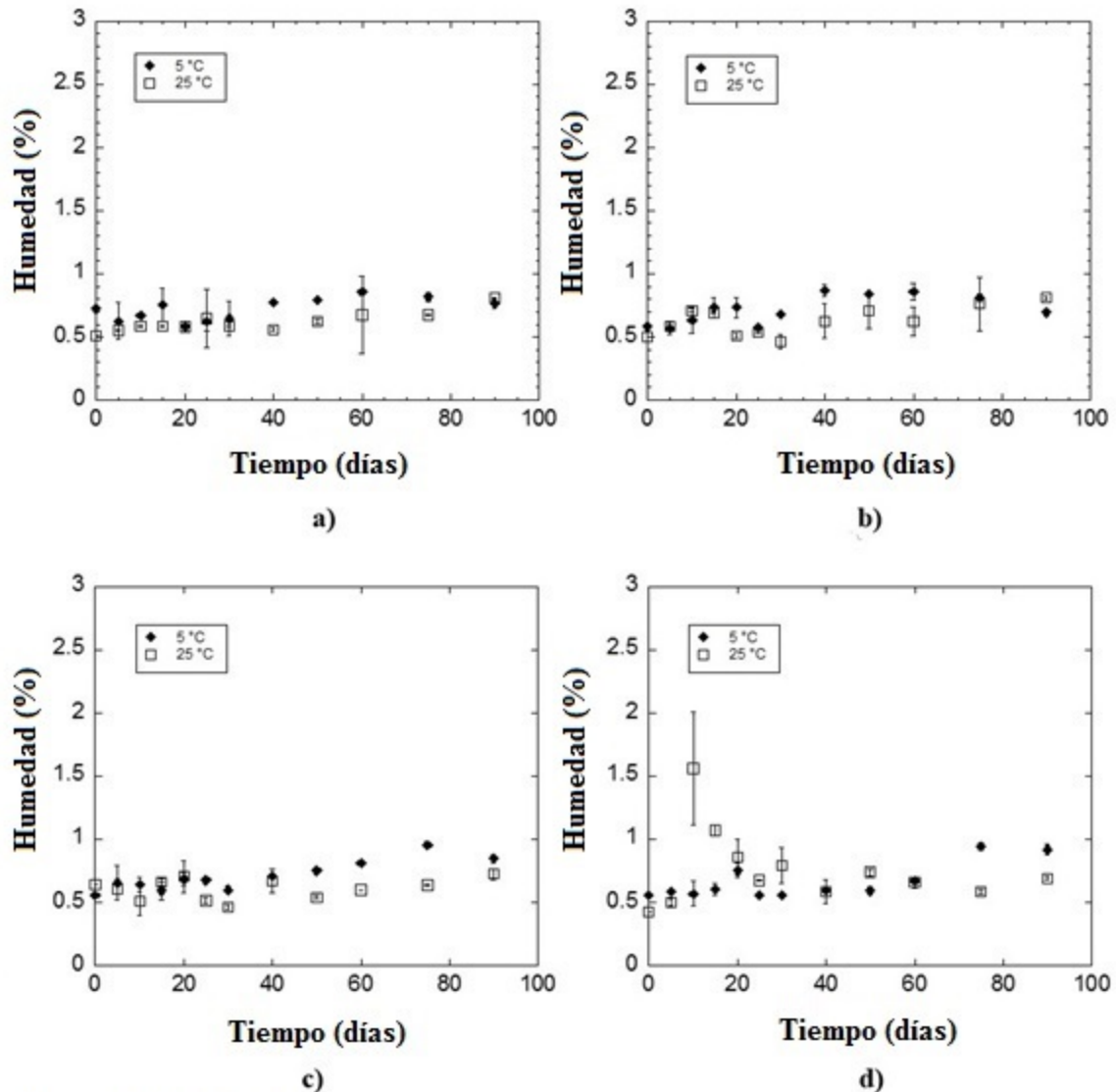
El queso fresco es uno de los quesos Latino Americanos más reconocidos y probados entre los consumidores (Hnosko *et al.* 2009). Los quesos frescos tienen una vida de anaquel muy corta debido a su pH, cercano a neutro, alta actividad de agua y bajo contenido de sal.

Generalmente, la vida de anaquel de un queso fresco bajo refrigeración es de 7 días (Del Caro *et al.* 2012; Faccia *et al.* 2012). Por esta razón, el secado por lecho fluidizado fue empleado como una alternativa eficiente para preservar alimentos perecederos (Domínguez-Niño *et al.* 2016). Sin embargo, la necesidad de un empaque apropiado para productos tradicionales ha impulsado el estudio de las condiciones de almacenamiento que aseguren la vida de anaquel deseada (Costa *et al.* 2016; Pascual-Pineda *et al.* 2017). Es bien sabido que el empaque a vacío no solo reduce la incidencia del daño oxidativo sino que también preserva la calidad sensorial en los alimentos, debido a que bajo condiciones de vacío, el oxígeno en el ambiente del empaque es reducido a <1%; por otra parte, porque el contenido de humedad y actividad de agua fue reducido durante un proceso de secado (Smith *et al.* 2004; Perera 2005; Domínguez-Niño *et al.* 2016; Costa *et al.* 2016). Por esta razón, el empaque a vacío es una alternativa interesante para almacenar muestras deshidratadas. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios fisicoquímicos y microbiológicos durante el almacenamiento de queso artesanal deshidratado, empacado en bolsas de polietileno y aluminio bajo condiciones atmosféricas y a vacío a 5 y 25 °C.

### **3.18.1 Contenido de humedad**

El contenido de humedad del queso almacenado debe mantenerse constante con el fin de mantener su estabilidad durante su almacenamiento a largo plazo. Las Figuras 3.44a y 3.44c muestran la evolución del contenido de humedad del queso deshidratado en función del tiempo de almacenamiento a 5 y 25 °C, empacado en bolsas de polietileno y aluminio bajo condiciones atmosféricas (aire). El análisis estadístico (Tukey  $\alpha=0.10$ ) indicó que existen diferencias significativas en el contenido de humedad entre los experimentos realizados. De

acuerdo a los resultados, las muestras almacenadas a 5 °C presentaron el mayor contenido de humedad que las muestras almacenadas a 25 °C para ambos tipos de bolsa. Como se puede observar en la Figura 3.44a, durante los primeros 25 días de almacenamiento a 25°C, se presentó un incremento del contenido de humedad; posteriormente, se observó una disminución en el mismo. Este comportamiento es opuesto a los resultados obtenidos por Costa *et al.* (2016), durante la optimización de empaque de porciones de queso Canestrato di Moliterno, quien reportó que durante los primeros días de almacenamiento, el contenido de humedad de todas las muestras de queso disminuyó (hasta un 19% para muestras almacenadas en empaque con atmósfera modificada 70/30 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>). Posteriormente, observaron un incremento del contenido de humedad para todas las muestras. De acuerdo a la literatura, esta tendencia puede ser justificada considerando que la humedad inicial de la muestra satura el empaque durante la primera etapa de almacenamiento y esta humedad es perdida en la parte superior del empaque. Sin embargo, esta humedad es nuevamente adsorbida por el queso y como resultado, el contenido de humedad aumenta progresivamente hasta alcanzar valores cercanos al nivel inicial (Dukalska *et al.* 2011). Por otra parte, Hymawathi y Khader, (2005) observaron, durante el almacenamiento de mango en polvo, que el incremento del contenido de humedad puede ser atribuido a cambios en el ambiente los cuales generan cambios en la humedad relativa fuera del sistema de embasado y a la permeabilidad del empaque.



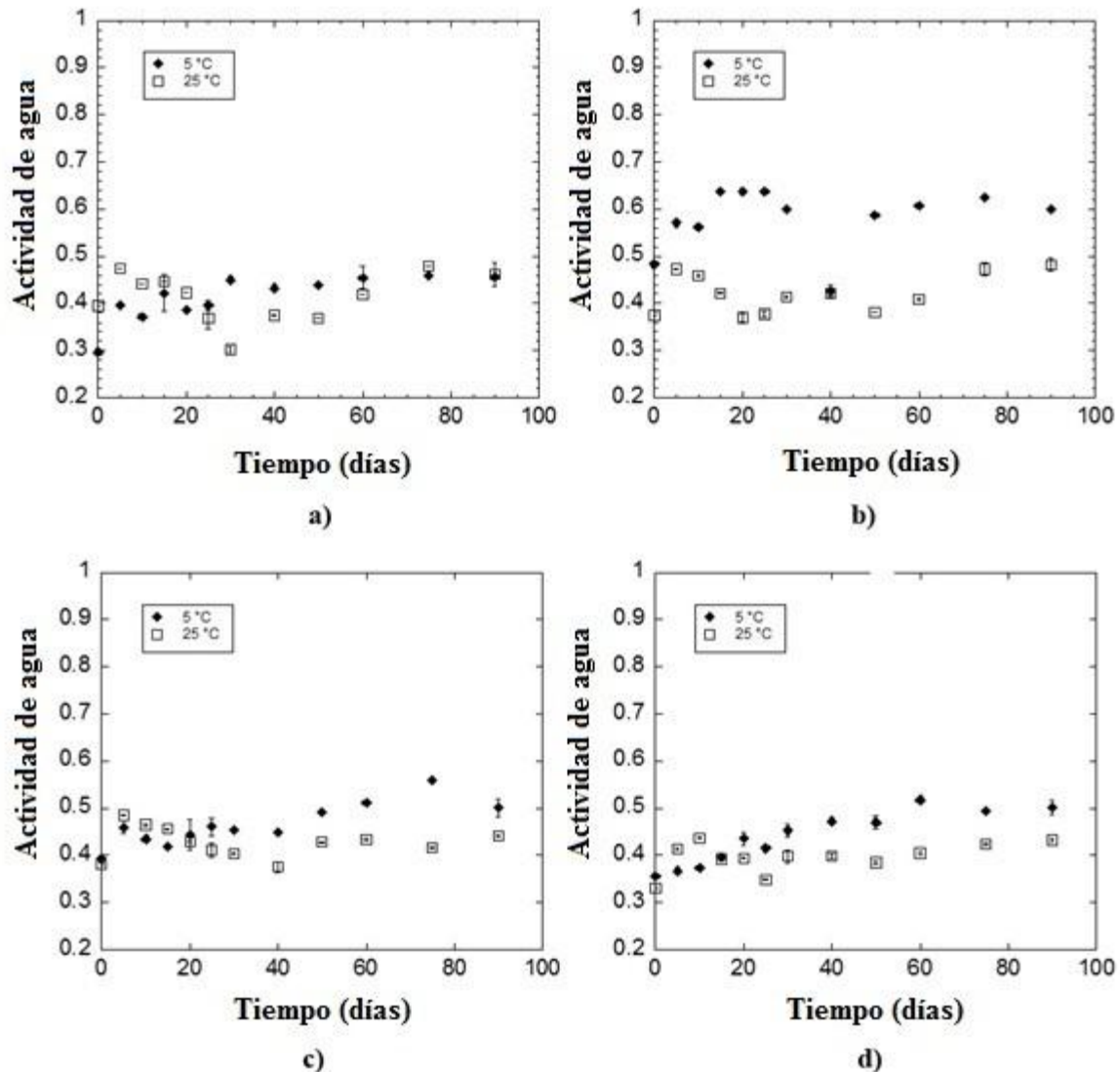
**Figura 3.44** Evolución del contenido de humedad del queso deshidratado en función del tiempo de almacenamiento: a) bolsa de polietileno (aire), b) bolsa de polietileno (vacío), c) bolsa de aluminio (aire) y bolsa de aluminio (vacío).

Finalmente, las Figuras 3.44b y 3.44d muestran la evolución del contenido de humedad del queso deshidratado almacenado en bolsas de polietileno y aluminio bajo condiciones de vacío a 5 y 25 °C. El análisis estadístico (Tukey  $\alpha=0.10$ ) indicó que no existió diferencia

significativa del contenido de humedad entre los experimentos realizados a estas condiciones de almacenamiento.

### 3.18.2 Actividad de agua

La Figura 3.45a muestra la evolución de la actividad de agua del queso deshidratado almacenado en bolsas de polietileno bajo condiciones atmosféricas (aire) a 5 y 25 °C. El análisis estadístico (Tukey  $\alpha=0.10$ ) reveló que no existió diferencia significativa de la actividad de agua entre los experimentos realizados a estas condiciones de almacenamiento. Durante los primeros días de almacenamiento a 25 °C se observó un incremento en la actividad de agua el cual está relacionado con el incremento en el contenido de humedad; sin embargo, después del quinto al treintavo día, la actividad de agua disminuyó. Posteriormente, el contenido de actividad de agua incrementó hasta alcanzar valores cercanos al nivel inicial. Este comportamiento puede estar relacionado con las propiedades de retención de vapor de agua de las bolsas (Dukalska *et al.* 2011; Siucinska *et al.* 2016). Para las muestras almacenadas a 5°C se observó una tendencia ascendente y descendente en los niveles de actividad de agua durante todo el periodo de almacenamiento. La Figura 3.45b muestra la evolución de la actividad de agua del queso deshidratado empacado en bolsas de polietileno bajo condiciones de vacío a 5 y 25 °C. El análisis estadístico (Tukey  $\alpha=0.10$ ) indicó que existe diferencia significativa entre los valores de actividad de agua de las muestras de queso deshidratado de estas condiciones de almacenamiento.



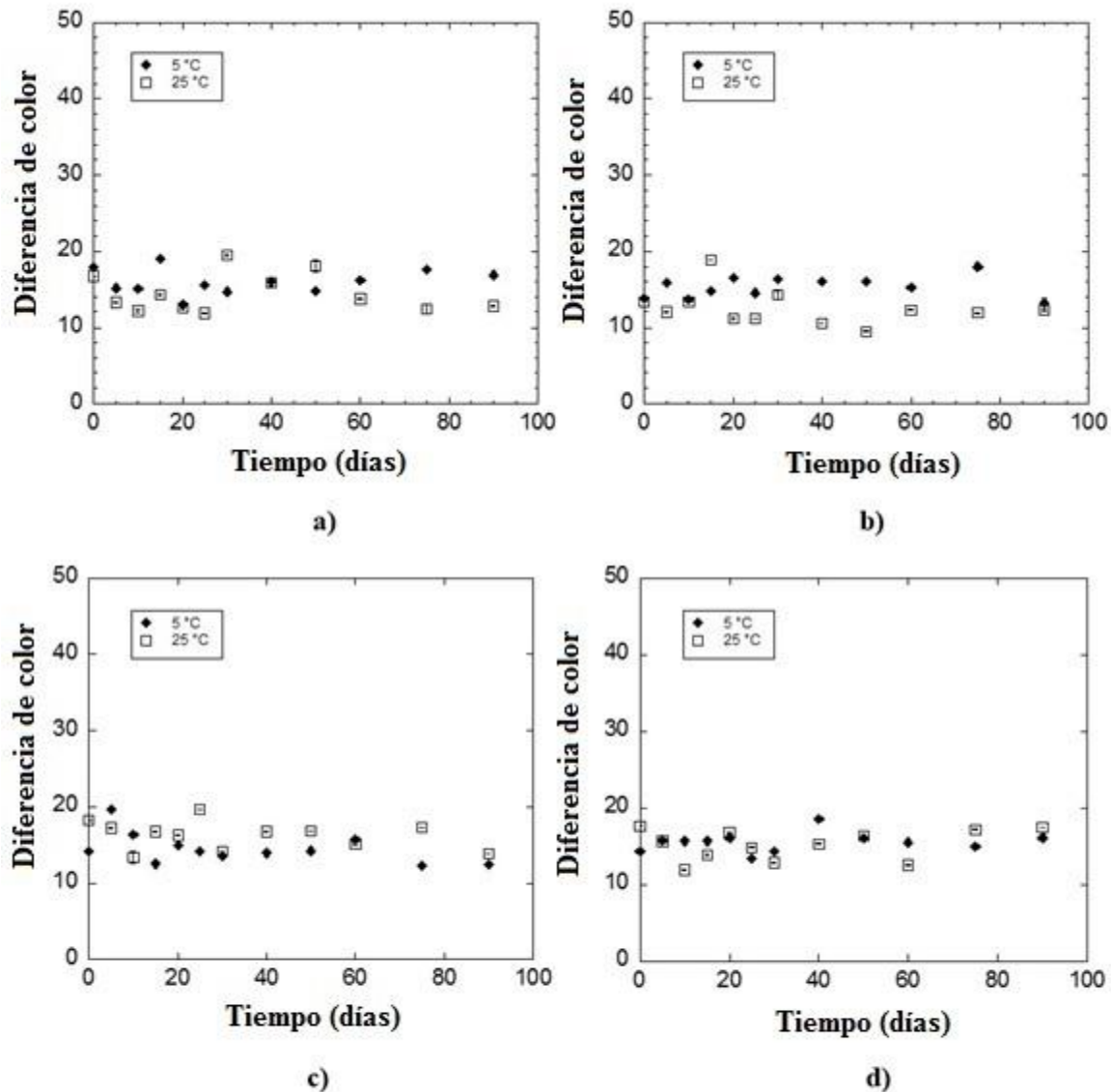
**Figura 3.45** Evolución de actividad de agua del queso deshidratado en función del tiempo de almacenamiento: a) bolsa de polietileno (aire), b) bolsa de polietileno (vacío), c) bolsa de aluminio (aire) y bolsa de aluminio (vacío).

Como se observa en la Figura 3.45b, durante los primeros diez días de almacenamiento a 5°C, los valores de actividad de agua permanecieron por debajo de 0.60; generalmente, los alimentos con  $a_w < 0.60$  son microbiológicamente más estables (Carrillo-Navas *et al.* 2011). Posteriormente, un incremento en los valores de  $a_w$  (arriba de 0.60) fueron observados; por lo

tanto, la estabilidad del producto no fue garantizada. De acuerdo a Troller y Christian, (1980), hongos xerofílicos y levaduras osmofílicas generalmente crecen a 0.60 y 0.65  $a_w$ . Para las muestras almacenadas a 25 °C se observó un incremento en  $a_w$  durante los primeros cinco días de almacenamiento; posteriormente se observó una tendencia descendente y ascendente; hasta alcanzar un valor final de actividad de agua de 0.48. Finalmente, las Figuras 3.45c y 3.45d muestran la evolución de actividad de agua de queso deshidratado empacado en bolsas de aluminio bajo condiciones atmosféricas (aire) y vacío, respectivamente. El análisis estadístico (Tukey  $\alpha=0.10$ ) reveló que existe diferencia significativa de los valores de actividad de agua entre los experimentos realizados para ambas condiciones de almacenamiento. La Figura 3.45c muestra claramente un ligero incremento en la actividad de agua durante los primeros cinco días de almacenamiento a 5 y 25 °C. Por otra parte, en la Figura 3.45d se observó una tendencia ascendente en los valores de actividad de agua durante el periodo de almacenamiento a 5°C. En general, el incremento en  $a_w$  no afectó la estabilidad del producto debido a que los valores se mantuvieron por debajo de 0.60; por lo tanto, el queso almacenado puede ser considerado libre de crecimiento microbiano (Cantalejo *et al.* 2016).

### 3.18.3 Diferencia de color

Las Figuras 3.46a y 3.46c muestran la evolución de la diferencia de color del queso deshidratado almacenado en bolsas de polietileno y aluminio bajo condiciones atmosféricas (aire) a 5 y 25 °C. El análisis estadístico (Tukey  $\alpha=0.10$ ) reveló que no existe diferencia significativa entre las muestras almacenadas a 5 y 25 °C (Figura 3.46a); sin embargo, para la Figura 3.46c el análisis estadístico (Tukey  $\alpha=0.10$ ) indicó que existe diferencia significativa en la diferencia de color entre los experimentos realizados a 5 y 25 °C.



**Figura 3.46** Evolución de la diferencia de color del queso deshidratado en función del tiempo de almacenamiento: a) bolsa de polietileno (aire), b) bolsa de polietileno (vacío), c) bolsa de aluminio (aire) y bolsa de aluminio (vacío).

De acuerdo a estos resultados, la menor diferencia de color fue obtenida en las muestras almacenadas en bolsas de aluminio a 5 °C. Durante el almacenamiento, se observó un ligero incremento en los valores de *a* y un evidente aumento en los valores de *b*; por lo tanto, se



presentó una tendencia hacia la amarillez en las muestras de queso deshidratado. Una tendencia similar sobre los parámetros de  $L$ ,  $a$  y  $b$  fue reportada por Temiz *et al.* (2010), quien reportó una disminución en la luminosidad (de 81.9 a 73.7) y una disminución en los valores de  $a$  y  $b$  durante el almacenamiento de queso Kashar. De acuerdo con la literatura, los alimentos deshidratados pierden color debido a la oxidación moléculas altamente insaturadas una vez que son expuestas a la luz, aire y cambios químicos (reacción de Maillard) durante el almacenamiento (Costa *et al.* 2016; Koca *et al.* 2007). Las Figuras 3.46b y 3.46d muestran la evolución de la diferencia de color de muestras de queso deshidratado, almacenadas en bolsas de polietileno y aluminio bajo condiciones de vacío a 5 y 25 °C. Como se observa en la Figura 3.46b, los valores más altos de la diferencia de color fueron observados a una temperatura de almacenamiento de 5 °C; mientras que las muestras almacenadas a 25 °C mostraron menores valores en la diferencia de color; por otro lado, no se apreció diferencia significativa de los valores de  $\Delta E$  entre las muestras de queso almacenadas en empaque de aluminio a vacío a 5 y 25 °C. De acuerdo con los resultados, las muestras de queso almacenado en bolsas de aluminio presentaron los valores más bajos de  $\Delta E$ .

#### **3.18.4 Contenido de proteínas, cloruro de sodio y grasa**

La Tabla 3.15 muestra los valores del contenido de proteínas de muestras de queso deshidratado al final del periodo de almacenamiento. Los resultados mostraron una variación del contenido de proteínas (arriba del 5%) con respecto al valor inicial. Como se observa en la Tabla 3.15, el mayor contenido de proteínas fue observado en las muestras almacenadas en empaques de aluminio bajo condiciones atmosféricas (aire) a 5 °C (experimento 5), así como en las muestras de queso almacenadas en bolsas de aluminio bajo condiciones de vacío a 5°C

(experimento 7) y en muestras de queso almacenadas en bolsas de aluminio a vacío a 25 °C (experimento 8). Algunos investigadores han concluido que el periodo de almacenamiento afecta significativamente la pérdida de peso y la composición química del alimento. Ehsannia y Sanjabi, (2015), durante el almacenamiento de queso procesado a 4 °C, concluyeron que el periodo de almacenamiento afectó significativamente la pérdida de peso y la composición química del queso; por lo tanto, se observó un incremento en el contenido de grasa, proteínas, cenizas y cloruro de sodio. Por otro lado, Temiz, (2010) reportó un incremento en el contenido de proteínas de 10.51 a 10.69 durante el almacenamiento de queso Kashar a 4 °C bajo atmósferas modificadas. Sin embargo, Dhalsamant *et al.* (2015) observó una disminución en el contenido de proteínas de 31.83 a 20.80 durante el almacenamiento de hongos.

**Tabla 3.15** Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del queso deshidratado al final del periodo de almacenamiento

Experimento	Contenido de proteínas (%) <sup>a</sup>	NaCl (%) <sup>a</sup>	Contenido de grasa (%) <sup>a</sup>	Lactobacilos (Log CFU/g) <sup>a</sup>	Coliformes totales (Log CFU/g) <sup>a</sup>
1	35.90 <sup>± 0.11</sup>	3.05 <sup>± 0.06</sup>	45.40 <sup>± 0.00</sup>	6.2 <sup>± 0.12</sup>	1.8 <sup>± 0.07</sup>
2	35.08 <sup>± 0.04</sup>	2.91 <sup>± 0.01</sup>	46.84 <sup>± 0.00</sup>	6.0 <sup>± 0.02</sup>	---
3	34.37 <sup>± 0.09</sup>	2.83 <sup>± 0.01</sup>	45.93 <sup>± 0.00</sup>	5.7 <sup>± 0.04</sup>	2.2 <sup>± 0.20</sup>
4	35.75 <sup>± 0.03</sup>	3.31 <sup>± 0.00</sup>	42.09 <sup>± 0.01</sup>	6.1 <sup>± 0.18</sup>	---
5	37.62 <sup>± 0.10</sup>	2.94 <sup>± 0.01</sup>	42.65 <sup>± 0.06</sup>	4.8 <sup>± 0.01</sup>	---
6	33.14 <sup>± 0.09</sup>	3.24 <sup>± 0.01</sup>	47.88 <sup>± 0.01</sup>	4.8 <sup>± 0.02</sup>	---
7	37.14 <sup>± 0.16</sup>	3.13 <sup>± 0.02</sup>	48.47 <sup>± 0.00</sup>	6.1 <sup>± 0.00</sup>	---
8	37.52 <sup>± 0.15</sup>	2.94 <sup>± 0.01</sup>	47.54 <sup>± 0.00</sup>	5.5 <sup>± 0.07</sup>	---

<sup>a</sup> Los valores representan las medias experimentales<sup>±</sup> desviación estándar

El contenido de sal en los quesos contribuye directamente a cambios bioquímicos y, simultáneamente, al desarrollo del sabor y aroma (Soares *et al.* 2015). Sin embargo, un excedente del 4% de cloruro de sodio disminuye la cantidad de colonias lácticas (Faccia *et al.*

2012). En este contexto, la cantidad de cloruro de sodio fue cuantificada al final del periodo de almacenamiento (Tabla 3.15). De acuerdo con los resultados de las muestras analizadas, no se observaron variaciones significativas ( $3.1382 \pm 0.3$ ) alrededor del valor inicial (Tabla 3.9). Los resultados indicaron que las muestras almacenadas en bolsas de polietileno bajo condiciones de vacío a 25 °C (experimento 4) y las muestras de queso almacenadas en bolsas de aluminio bajo condiciones de vacío a 5 °C (experimento 7) permanecieron cerca del nivel inicial de cloruro de sodio.

La Tabla 3.15 muestra el contenido de grasa de las muestras de queso deshidratado almacenado por un periodo de tres meses. De acuerdo con los resultados, el contenido de grasa más bajo fue observado en muestras almacenadas en bolsas de polietileno bajo condiciones atmosféricas a 25 °C (experimento 4), y en muestras almacenadas en bolsas de aluminio bajo condiciones atmosféricas a 5 °C (experimento 5). Por otro lado, el mayor contenido de grasa se observó en las muestras de queso almacenadas en bolsas de aluminio bajo condiciones de vacío a 25 °C (experimento 7). En general, no se observaron variaciones significativas con respecto al contenido inicial (de 41.88 a 48.47).

### **3.18.5 Análisis microbiológicos**

El contenido final de lactobacilos, para las ocho condiciones de almacenamiento, es mostrado en la Tabla 3.15. De acuerdo con los resultados, la cantidad de lactobacilos permaneció constante durante todo el periodo de almacenamiento. No se observaron variaciones significativas con respecto al valor inicial ( $5.48 \pm \log$  UFC/g). De acuerdo a Labuza y Altunakar, (2007), ningún microorganismo puede crecer a valores de actividad de agua menores a 0.60. Sin embargo, aunque no puedan desarrollarse, los microorganismos pueden

sobrevivir a valores de  $a_w$  bajos y si se les adiciona en el medio adecuado, pueden volver a activarse e iniciar su crecimiento nuevamente. Este efecto es congruente con los resultados obtenidos por Oyugi y Buys, (2007), durante el análisis microbiológico de queso cheddar, quien reportó que los niveles de bacterias ácido lácticas (BAL) permanecieron constantes durante el periodo de almacenamiento de 16 semanas. El conteo de BAL en queso cheddar para todos los tratamientos fue de 7.2 a 7.6 log UFC/g (semana 0) y durante la semana 16, la cantidad de BAL fue de 6.8 a 7.0 log UFC/g. Sin embargo, Akarka *et al.* 2015, reportó que al final del periodo de almacenamiento de queso mozzarella, una disminución de un ciclo logarítmico en BAL se observó en muestras almacenadas bajo condiciones aeróbicas (de 4.82 a 3.90 log UFC/g). Mientras tanto, en el almacenamiento a vacío las BAL se estabilizaron y disminuyeron ligeramente después del día 21 (de 4.82 a 3.90). La concentración de coliformes totales disminuyó de 3.20 log UFC/g hasta su total desaparición al final del periodo de almacenamiento. Un comportamiento similar fue reportado por Zantar *et al.* (2014) durante el estudio del efecto de *Thymus vulgaris* sobre la vida de anaquel de queso fresco de cabra; sus resultados demostraron una disminución moderada de  $(7 \times 10^1$  a  $2 \times 10^1$  UFC/g) en el cuarto día de almacenamiento con una desaparición total en el sexto día, esto lo atribuyeron al bajo pH del queso suave. Tejada *et al.* 2002, observaron una disminución del número de coliformes durante la etapa de congelación de la leche para el queso de oveja, de  $2.80^{\pm 0.37}$  a  $0.17^{\pm 0.29}$  log<sub>10</sub> UFC/g de muestra. Al final del periodo de almacenamiento la cantidad de hongos y levaduras sólo fueron detectados en cantidades menores a  $1.6^{\pm 0.14}$  log UFC/g de muestra. Finalmente, con respecto al pH durante el almacenamiento se observaron variaciones no significativas de pH con respecto al valor inicial ( $6.40^{\pm 0.30}$ ).



# **CONCLUSIONES**

Mediante el secado por aspersión se deshidrató suero de leche para evaluar el efecto de la temperatura y del material de pared sobre las propiedades fisicoquímicas del producto en polvo; además, se reportó el costo de producción de dicho proceso. Por otro lado, pocos estudios que han evaluado el efecto de la temperatura sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas del queso fresco; esto hace que la presente investigación haya mostrado resultados de gran significancia sobre el estudio de un queso altamente percedero. En esta investigación fue posible obtener suero de leche en polvo utilizando el proceso de secado por aspersión; y por lo tanto, es importante incrementar su producción a un bajo costo. Las variables independientes estudiadas durante el proceso de secado por aspersión influyeron significativamente ( $p \leq 0.10$ ) en términos de color, contenido de proteínas, producción, energía requerida y costo. Las condiciones óptimas de secado fueron: temperatura de entrada ( $T_{\gamma 0}$ ) de 180 °C, temperatura de salida ( $T_{\gamma s}$ ) de 84.91 °C y concentración de material de pared ( $W_g$ ) a la materia prima de 2.91%. Bajo estas condiciones, se obtuvo 0.1008 kg/h de suero de leche deshidratado, con un contenido de humedad de 2.85%, actividad de agua de 0.239, costo de producto de 19.7095 \$/kg, y consumo de energía de 2.1274kW·h/kg de producto seco. Estos valores indicaron que el uso de material de pared tiene múltiples funciones; tales como, material aditivo, agente de dispersión y agente de carga, mejorando así el costo de producción de suero de leche deshidratado.

El secado por lecho fluidizado es una alternativa eficiente para la conservación de queso, debido a la alta reducción de agua en un producto percedero por naturaleza. El análisis de las gráficas de superposición de contornos permitió obtener las regiones óptimas del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco las cuales fueron: tamaño de partícula de 1.7 cm, temperatura de secado de 55.5 °C y tiempo de secado de 72.12 min. Bajo estas condiciones de secado se obtuvieron 0.047 kg/h de producto seco, con un contenido de humedad de 0.77% y actividad de agua de 0.36, y 6.66 log UFC de lactobacilos, con un contenido de proteína y cloruro de sodio de 30.79 y 2.46%, respectivamente. Los resultados fueron muy cercanos a los predichos por los modelos de optimización.

El estudio de la estabilidad del queso deshidratado durante su almacenamiento indicó que las muestras deshidratadas deben ser almacenadas en bolsas de aluminio durante un periodo no

mayor a tres meses a una temperatura de 5 o 25 °C. A estas condiciones de almacenamiento, las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas permanecen estables. Finalmente, las muestras de queso deshidratado no solo pueden ser incluidas ampliamente en alimentos formulados, sino también pueden ser empleados como botanas y como aditivos en la industria alimentaria.



# REFERENCIAS



- Abadio, F.D.B.; Domingues, A.M.; Borges, S.V.; Olivera, V.M. Physical properties of powdered pineapple juice (*Ananas Comosus*) juice: effect of maltodextrin concentration and atomization speed. *Food Engineering* 2004, 64, 285-287.
- Aday, S.; Karagul, Y.Y. Physicochemical and sensory properties of mihalic cheese. *Food Properties* 2014, 17, 2207-2227.
- Adhikari, B.; Howes, T.; Shrestha, A. K.; Bhandari, B.R. Development of stickiness of whey protein isolate and lactose droplets during convective drying. *Chemical Engineering Process* 2007, 46, 420-428.
- Akarca, G.; Tomar, O.; Gök, V. Effect of different packaging methods on the quality of stuffed and sliced mozzarella cheese during storage. *Food Processing and Preservation* 2015, 39, 2912-2918.
- Aktas, T. Ulger, P. Daglioglu, y Hasturk, F. Changes of nutritional and physical quality characteristics during storage of osmotic pretreated apple before hot air drying and sensory evaluation. *Food Quality* 2013, 36, 411-425.
- Al-Mansour, H.E.; Al-Busairi, B.H.; Baker, C.G.J. Energy consumption of a pilot-scale spray dryer. *Drying Technology* 2011, 29, 1901-1910.
- Al-Otaibi, M. y Wilbey, R.A. Effect of temperature and salt on the maturation of white salted cheese. *Dairy Technology* 2004, 57, 57-63.
- Anandharamakrishnan, C.; Rielly, C.D.; Stapley, A.G.F. Effects of process variables on the denaturation of whey proteins during spray drying. *Drying Technology* 2007, 25, 799-807.
- Anandharamakrishnan, C.; Rielly, C.D.; Stapley, A.G.F. Spray-freeze-drying of whey proteins at sub-atmospheric pressures. *Dairy Science and Technology* 2010, 90, 321-334.

- Arboatti, A.S.; Olivares, M.L.; Sabbag, N.G.; Costa, S.C.;Zorrilla, S.E.;Sihufe, G.A. The influence of sodium chloride reduction on physicochemical, biochemical, rheological and sensory characteristics of Mozzarella cheese. *Dairy Science & Technology* 2014, 94, 373-386.
- Argyropoulos, D.; Muhammad, T. K.; Joachim, M. Effect of air temperature and pre-treatment on color changes and texture of dried *Boletus edulis* Mushroom. *Drying Technology* 2011, 29, 1890-1900.
- Augustin, M.A.; Puvanenthiran, A.; Clarke, P.T.; Sanguansri, P. Energy use for alternative full-cream milk powder manufacturing processes. *Food Engineering* 2014, 191-196.
- Badui, D.S.; Leche. In *Química de los alimentos*; Badui, D.S., Ed.; Pearson Educación.: México, 2006; 603-631.
- Baker, C.G.J.; McKenzie, K.A. Energy consumption of industrial spray dryers. *Drying Technology* 2005, 23, 365-386.
- Bas, D.; Boyaci, I.H. Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. *Food Engineering* 2007, 78, 836-845.
- Berrones-Hernández, R., Saldaña-Trinidad, S., Pantoja, J., Grajales-Bonifaz, M.C., Interiano-Grajales, O., Pérez-Pérez, K.M., Silvano-López, P.L., y Sólis-Candelaria, A. 2007. Estudio del proceso de deshidratación del queso fresco chiapaneco mediante un secador solar de convección natural. *V Congreso internacional de ingeniería Bioquímica*, 16, 1-12.
- Bhandari, B.R.; Snoussi, A.;Dumoulin, E.D.; Lebert A. Spray drying of concentrated fruit juices. *Drying Technology* 1993, 11, 1081-1092.

- Bicudo, M.O.P.; J6, J.; Oliveira, G.A.; Chaimsohn, F.P.; Sierakowski, M.R.; Freitas, R.A.; Ribani, R.H. Microencapsulation of Jucara (*Euterpe edulis* M.) pulp by spray drying using different carriers and drying temperatures. *Drying Technology* 2015, 33, 153-161.
- Bintsis, T. y Papademas, P. 2002. Microbiological quality of white brined cheeses: a review. *Journal of Dairy Technology* 3, 113-120.
- Bringas-Lantigua, M.; Exp6sito-Molina, I.; Reineccius, G.A.; L6pez-Hern6ndez, O.; Pino, J. A. Influence of spray-dryer air temperatures on encapsulated mandarin oil. *Drying Technology* 2011, 29, 520-526.
- Burande, R.R., Kumbhar, B.K., Ghosh, P.K. y Jayas, D.S. Optimization of fluidized bed drying process of green peas using response surface methodology. *Drying Technology* 2008, 26, 920-930.
- Caliskan, G.; Nur-Dirim, S. The effects of the different drying conditions and the amounts of maltodextrin addition during spray drying of sumac extract. *Food and Bioproducts Processing* 2013, 91, 539-548.
- Cantalejo, M.J.; Zouaghi, F.; Arnedo, I.P. Combined effects of ozone and freeze drying on the shelf life of Broiler chicken meat. *Food Science and Technology* 2016, 68, 400-407.
- Carrillo-Navas, H.; Gonz6lez-Rodea, D.A.; Cruz-Olivares, J.; Barrera-Pichardo, J.F.; Rom6n-Guerrero, A.; P6rez-Alonso, C. Storage stability and physicochemical properties of passion fruit juice microcapsules by spray-drying. *Revista Mexicana de Ingenieria Qu6mica* 2011, 10, 421-430.
- Ch6vez-Rodr6guez, A., L6pez-Muraira, I.G., G6mez-Leyva, J.F., Luna-Solano, G., Ort6z-Basurto, R.I. y Andrade-Gonz6lez, I. Optimization of Agave *tequilana* Weber var. Azul Juice spray drying process. *Journal of Chemistry* 2014, 1-10.

- Chitravathi, K.; Chauhan, O.P.; Raju, P.S. Postharvest shelf life extension of green chillies (*capsicum annuum L.*) using shellac based edible surface coatings. *Postharvest Biology and Technology* 2014, 92, 146-148.
- Correa, S.C., Clerici, M.T., García, J.S., Ferreira, E.B., Eberlin, M.N. y Azevedo, L. Evaluation of dehydrated marolo (*Annona crassiflora*) flour and carpels by freeze-drying and convective hot air drying. *Food Research International* 2011, 44, 2385-2390.
- Costa, C.; Lucera, A.; Lacivita, V.; Saccotelli, M.A.; Conte, A.; Del Nobile, M.A. Packaging optimization for portioned Canestrato di Moliterno cheese. *International Journal of Dairy Technology* 2016, 69, 1-9.
- Da Cunha, L.R.; García de la Cruz, A.; Menegalli, C.F. Effects of Operating Conditions on the Quality of Mango Pulp Dried in a Spout Fluidized Bed. *Drying Technology* 2006, 24, 423-432.
- Dak, M., Sagar, V.R. and Jha, S.K. Shelf life and kinetics of quality change of dried pomegranate arils in flexible packaging. *Food Packaging and Shelf Life* 2014, 2, 1-6.
- Del Caro, A.; Sanguinetti, A.M.; Fadda, C.; Murittu, G.; Santoru, A.; Piga, A. Extending the shelf life of fresh ewe's cheese by modified atmosphere packaging. *International Journal of Dairy Technology* 2012, 65, 548-554.
- Dhalsamant K.; Dash SK.; Bal L.M.; Panda M.K. Effect of perforation mediated MAP on shelf life of mushroom (*Volvariella volvacea*). *Scientia Horticulturae* 2015, 189, 41-50.
- Domínguez-Niño, A.; Buendía, G.A.N.; Cantú L.D.; Andrade, G.I.; Luna, S.G. Efecto del proceso de secado por lecho fluidizado sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas de queso fresco mexicano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 2016, 15, 869-881.

- Du, J., Ge, Z.Z., Xu, Z., Zou, B., Zhang, Y. y Li, C.M. Comparison of the efficiency of five different drying carriers on the spray drying of persimmon pulp powders. *Drying Technology* 2014, 32, 1157-1166.
- Dukalska, L.; Brasava, S.M.; Murniece, I.; Dabina, B.I.;Kozlinskis, E.;Sarvis, S. Influence of PLA film packaging on the shelf life of soft cheese *Kleo*. *World Academic of Science, Engineering and Technology* 2011, 5, 441-447.
- Ehsannia, S.;Sanjabi, M.R. Quality characterization of processed cheese inoculated by *bacillus coagulans*during cold storage: compositional and sensorial attributes and probiotic microorganism viability. *Food Processing and Preservation* 2015, 40, 1-8.
- Erbay, Z.;Koca, N. Energetic, Exergetic, and Exergoeconomic Analyses of Spray-Drying Process during White Cheese Powder Production. *Journal of Drying Technology* 2012, 30, 435-444.
- Erbay, Z.; Koca, N.; Kaymak-Ertekin, F.; Ucuncu, M. Optimization of spray drying process in cheese powder production. *Journal of Food and Bioproducts Processing* 2015, 93, 156-165.
- Faccia, M.; Mastromatteo, M.; Conte, A.; Del Nobile, A. Influence of the different sodium chloride concentrations on microbiological and physicochemical characteristics of mozzarella cheese. *Journal of Dairy Research* 2012, 9, 390-396.
- Farahnaky, A.;Kamali, E. Texture hysteresis of pistachio kernels on drying and rehydration. *Journal of Food Engineering* 2005, 166, 335-341.
- Farkye, N.Y. (2006). Significance of milk fat in milk powder. En: *Advanced Dairy Chemistry* (P.F. Fox y P.L.H. McSweeney, eds.), Pp. 451-465. Springer, New York.

- Food and Agricultural Organization of the United Nations. (2013). *Statistical yearbook world food and agriculture*. Editorial FAO, Roma.
- Filková, I., Huan, L.X. y Mujumdar, A.S. (2014). Industrial spray drying systems. En: *Handbook of Industrial Drying*, (A.S. Mujumdar, ed.), Pp. 191-193. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Garabal, J.I.; Alonso, P.R., Franco, D.; Centeno, J.A. Chemical and biochemical study of industrially produced San Simón da Costa smoked semi-hard cow's milk cheeses: effects of storage under vacuum and different modified atmospheres. *Dairy Science* 2010, 93, 1868-1881.
- Ghandi, A.; Powell, I.B.; Chen, X.D.; Adhikari, B. The effect of dryer inlet and outlet air temperatures and protectant solids on the survival of *Lactococcus lactis* during spray drying. *Drying Technology* 2012, 30, 1649-1657.
- Gharsallaoui, A.; Gaëlle, R.; Chambin, O.; Voilley, A.; Saurel, R. Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International* 2007, 40, 1107-1121.
- Grabowski, J.A., Truong, V.D., Daubert, C.R. Spray drying of amylase hydrolyzed sweet potato puree and physicochemical properties of powder. *Food Science* 2006, 71, E209-E217.
- Giménez, A.; Ares, F.; Ares, G. Sensory shelf life estimation: A review of current methodological approaches. *Food Research International* 2012, 49, 311-325.
- González, N.P. Evaluación de la caidad microbiológica de leche y queso fresco de prensa artesanal elaborado en el municipio de Jesús Carranza, Veracruz, México. Tesis, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Veracruz.

- Goula A.M.; Adamopoulos, K.G. A new technique for spray drying orange juice concentrate. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 2010, 11, 342-351.
- Goula, A.M.; Adamopoulos, K.G. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties. *Food Engineering* 2005, 66, 35-42.
- Goula, A.M.; Adamopoulos, K.G. Spray drying of tomato pulp: effect of feed concentration. *Drying Technology* 2004, 22, 2309-2330.
- Grabowski, J.A.; Truong, V.D.; Daubert, C.R. Spray drying of amylase hydrolyzed sweet potato puree and physiochemical properties of powder. *Food Science* 2006, 71, E209-E217.
- Guinee, T.P. y O'Brien, B. (2010). The quality of milk for cheese manufacture. En: *Technology of Cheesemaking*, (B.A. Law y A.Y. Tamime, ed.), Pp. 1-67. Wiley-Blackwell. Singapore, India.
- Hernández-Botello, M. T.; Chanona-Pérez, J. J.; Mendoza-Pérez, J. A.; Trejo-Valdéz, M.; Calderón-Domínguez, G.; Barriada-Pereira, J. L.; Sastre de Vicente, M. E.; Perea-Flores, M. J.; Terres-Rojas, E. Effect of the fluidized bed drying on the structure and biosorption capability of  $Pb^{+2}$  of agave epidermis. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 2014, 13, 865-885.
- Hnosko, J., Clark, S. and Van Hekken D. (2009). Latin American Cheeses. In: *The Sensory Evaluation of Dairy Products*, (S. Clark., M. Costello., M. Drake and F. Bodyfelt, eds.), Pp. 489-504. Springer, New York.
- Ho, T.M., Howes, T. and Bhandari, B.R. Methods to extend the shelf-life of cottage cheese – a review. *Journal of Dairy Technology* 2016, 68, 1-15.

- Hoon, L.K.; Joong, K.O. Investigation on drying performance and energy saving of the batch-type heat pump dryer. *Drying Technology* 2009, 27, 565-573.
- Hymavathi, T.V.; Khader, V. Carotene, ascorbic acid and sugar content of vacuum dehydrated ripe mango powders stored in flexible packaging material. *Food Composition and Analysis* 2005, 18, 181-192.
- James, C.S. (1995). Theory of analytical methods for specific food constituents. In: *Analytical Chemistry of Foods*, (S.J. Ceirwyn, Ed.), Pp 40-43, 46-50, 150-151. Springer-Science+Business Media, B.V.
- Jangam, S.V.; Mujumdar, A.S.; Basic concepts and definitions. In *Drying of foods, vegetables and fruits*; Jangam, S.V., Law, C.L., Mujumdar, A.S., Eds.; CRC Press.: Singapore, 2010; 1-30.
- Kashappa, G.H.y Hyun, J.P. Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Drying Technology* 2005, 23, 1361-1365.
- Kaya, S. and Öner, M.D. Water activity and moisture sorption isotherms of Gaziantep cheese. *Food Quality* 1996, 19, 121-132.
- Kha, C.T., Nguyen, H.M. y Roach, D.P. Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder. *Food Engineering* 2010, 98, 385-392.
- Kilic, M.; Muthukumarappan, K.; Gunasekaran, S. Kinetics of nonenzymatic browning in cheddar cheese powder during storage. *Food Processing and Preservation* 1997, 21, 379-393.



- Kim, E.H.J.; Chen, X.D.; Pearce, D. Surface composition of industrial spray-dried milk powders. 1. Development of surface composition during manufacture. *Food Engineering* 2009, 94, 163-168.
- Koca, N.;Burdurlu, H.S.; Karadeniz, F. Kinetics of colour changes in dehydrated carrots. *International Journal of Food Engineering* 2007, 78, 449-455.
- Kocabiyik, H.;Tezer, D. Drying of carrot slices using infrared radiation. *Food Science and Technology* 2009, 44, 953-959.
- Kozanoglu, B.; Martinez, J.; Alvarez, S.; Guerrero-Beltrán, J.A.;Welti-Chanes, J. Influence of Particle Size on Vacuum-Fluidized Bed Drying. *Drying Technology* 2012, 30, 138-145.
- Krishnaiah, D.; Nithyanandam, R.; Sarbatly, R. A critical review on the spray drying of fruit extract: effect of additives on physicochemical properties. *Food Science and Nutrition* 2014, 54, 449-473.
- Kudra, T. Energy aspects in drying. *Drying Technology* 2004, 22, 917-932.
- Kudra, T.; Cost-estimation methods for dryers and drying processes. In *Handbook of industrial drying*; Mujumdar A.S., Ed.; CRC Press.: Boca Raton FL, 2014; 1291-1301.
- Kurozawa, L.E.; Park, K.J.; Dupas, H.M. Spray drying of chicken meat protein hydrolysate: influence of process conditions on powder property and dryer performance. *Drying Technology* 2011, 29, 163-173.
- Labuza, T.P. and Altunakar, B. (2007). Water activity prediction and moisture sorption isotherms. In: *Water Activity in Foods*, (B. Gustavo., F. Anthony., S. Shelly., and L. Theodore, eds.), Pp 109-154. IFT PRESS.
- Law, C.L. y Mujumdar, A.S. (2014). Fluidized bed dryers. En: *Handbook of Industrial Drying*, (A.S. Mujumdar, ed.), Pp. 161-189. CRC Press, Boca Raton, FL.

- Lawless, H.T. and Heymann, H.; Color and appearance. In Sensory evaluation of food; Harry T.S. and Hildegard H., Ed.; Springer.:New York USA, 2010; 283-303.
- Liapis, A.I.;Bruttini, R. (2014). Freeze drying. En: *Handbook of Industrial Drying*, (A.S. Mujumdar, ed.), Pp. 259-282. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Lozano-Acevedo, A.; Jimenez-Fernandez, M.; Ragazzo-Sanchez, A.; Urrea-Garcia, G.; Luna-Solano, G. Fluidized bed drying process of thinly sliced potato (*Solanum tuberosum*). *American Journal Potato Research* 2011, 88, 360-366.
- Luna-Solano, G.; Salgado-Cervantes, M.A.; Rodríguez-Jimenes, G.C.; García-Alvarado, M.A. Optimization of brewer's yeast spray drying process. *Food Engineering* 2005, 68, 9-18.
- McCarthy, M.C., Wilkinson, M.C., Kelly, P.M. y Guinee, T.P. Effect of salt and fat reduction on the composition, lactose metabolism, water activity and microbiology of Cheddar cheese. *Dairy Science & Technology* 2015 95, 587-611.
- Masanet, E.; Brush, A.; Worrell, E. Energy efficiency opportunities in the U.S. Dairy processing industry. *Energy Engineering* 2014, 111, 7-34.
- Mexis, F.S.;Chouliara, E.; Kontominas, M.G. Quality evaluation of grated graviera cheese stored at 4 and 12 °C using active and modified atmosphere packaging. *Journal of Packaging Technology and science* 2011, 24,15-29.
- Min, D.B.; Ellefson, W.C.; Compositional analysis of foods. In Food analysis; Nielsen, S.S., Ed.; Springer.: New York, 2010; 105-114.
- Mishra, P.; Mishra, S.; Mahanta, L.C. Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Emblica officinalis*) juice powder. *Food and Bioproducts Processing* 2013, 92, 252-253.

- Morales-Delgado, D.Y.; Téllez-Medina, D.I.; Rivero-Ramírez, N.L.; Arellano-Cárdenas, S.; López-Cortez, S.; Hernández-Sánchez, H.; Gutiérrez-López, G.; Cornejo-Mazón. Effect of convective drying on total anthocyanin content, antioxidant activity and cellmorphometric parameters of strawberry parenchymal tissue (*Fragaria x ananassa Dutch*). *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 2014, 13, 179-187.
- Montgomery, C.A. 2012. Métodos y diseños de superficie de respuesta. En: *Diseño y Análisis de Experimentos*. (D.C. Montgomery, ed.), Pp. 467509. Iberoamericana.
- Mujumdar, A.S. (2014). Principles, classification, and selection of dryers. En: *Handbook of Industrial Drying*, (A.S. Mujumdar, ed.), Pp. 1-4. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Muñoz-López, C. 2014. Proceso de secado por charolas y liofilización de ciruela mexicana (*spondias purpurea L*). Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.
- Murthy, Z.V.P.; Joshi, D. Fluidized Bed Drying of Aonla (*Emblicaofficinalis*). *Drying Technology* 2007, 25, 883-889.
- Naidu, M.M., Khanum, H, Sulochanamma, G., Sowbhagya, H.B., Hebbar, U.H., Prakash, M. y Srinivas, P. Effect of drying methods on the quality characteristics of fenugreek (*Trigonellafoenumgraecum*) greens. *Drying Technology* 2012, 30, 808-816.
- Nath, S.; Satpathy, G.R. A systematic approach for investigation of spray drying processes. *Drying Technology* 1998, 16, 1173-1193.
- Nayak, C.A. y Rastogi, N.K. Effect of selected additives on microencapsulation of anthocyanin by spray drying. *DryingTechnology* 2010, 28, 1396-1404.
- NMX-F-089-S-1978. Determinación de extracto etéreo (Método Soxhlet) en alimentos. Foodstuffedeterminationofetherextract (Soxhlet).

- NOM-110-SSA1-1994. Norma Oficial Mexicana, Bienes y Servicios. Preparación y Dilución de Muestras de Alimentos para su Análisis Microbiológico.
- NOM-121-SSA1-1994. Norma Oficial Mexicana, Bienes y Servicios. Quesos: frescos, madurados y procesados. Especificaciones sanitarias.
- Norbrillinda, M.T.; Mahanom, H. Elyana, N.N.; Farina, N.I. Optimization of spray drying process of *Sargassum muticum* color extract. *Drying Technology* 2016, 34, 1735-1744.
- Oyugui, E.; Buys, E.M. Microbiological quality of shredded cheddar cheese packaged in modified atmospheres. *International Journal of Dairy Technology* 2007, 60, 89-95.
- Páez, R.; Lavari, L.; Vinderola, G.; Audero, G.; Cuatrin, A.; Zaritzky, N.; Reinheimer, J. Effect of heat treatment and spray drying on lactobacilli viability and resistance to simulated gastrointestinal digestion. *Food Research International* 2012, 48, 748-754.
- Páez, R.; Lavari, L.; Audero, G.; Cuatrin, A.; Zaritzky, N.; Reinheimer, J.; Vinderola, G. Study of the effects of spray-drying on the functionality of probiotic lactobacilli. *Dairy Technology* 2013, 66, 155-161.
- Pascual-Pineda, L.A.; Alamilla-Beltrán, L.; Gutiérrez-López, G.F.; Azuara, E.; Flores-Andrade, E. Predicción de condiciones de almacenamiento de alimentos deshidratados a partir de una isoterma de adsorción de vapor de agua. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 2017, 16, 207-220.
- Perera, C.O. Selected quality attributes of dried foods. *Drying Technology* 2005, 23, 717-730.
- Pérez-Francisco, J.M.; Cerecero-Enríquez, R.; Andrade-González, I.; Ragazzo-Sánchez J. A.; Luna-Solano, G. Optimization of vegetal pear drying using response surface methodology. *Drying Technology* 2008, 26, 1401-1405.

- Piatkowski, M.; Taradaichenko, M.; Zbicinski, I. Energy consumption and product quality interactions in flame spray drying. *Drying Technology* 2015, 33, 1022-1028.
- Quek, S., Chok, N.K. y Swedlund, P. The physicochemical properties of spray dried watermelon powder. *Chemical Engineering Process* 2007, 46, 386-392.
- Quintana-Zaragoza, L.; Luna-Solano, G.; Salgado-Cervantes, M.A.; Jiménez-Fernández, M.; Urrea-García, G.R.; Villegas-Santiago, J. Optimization and experimental validation of fluidized bed drying process of mango miniflakes. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2017, 16, 625-634.
- Ramírez-López, C.; Vélez-Ruiz, J.F. Quesos frescos: propiedades, métodos de determinación y factores que afectan su calidad. *Temaselectos de ingeniería de alimentos* 2012, 6, 131-148.
- Rannou, C., Queveau, D., Beaumal, V., Briand, E.D., Borgne, C.L., Meynier, A., Anton, M., Prost, C., Schuck, P., Loisel, C. Effect of spray drying and storage conditions on the physical and functional properties of standard and n-3 enriched egg yolk powders. *Food Engineering* 2015, 154, 58-68.
- Reyes, A.; Mahn, A.; Guzmán, C.; Antoniz, D. Analysis of the drying of broccoli florets in a fluidized pulsed bed. *Drying Technology* 2012, 30, 1368-1376.
- Roos, Y.; Karel, M. Applying state diagrams to food processing and development. *Food Technology* 1991, 45, 68-71.
- Rouhi, M., Sohrabvandi, S. y Mortazavian, A.M. Probiotic fermented sausage: viability of probiotic microorganisms and sensory characteristics. *Journal of Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2013, 53, 331-348.

- Sanjuán, N.; Bon, J.; Clemente, G.; Mulet, A. Changes in the quality of dehydrated broccoli florets during storage. *International Journal of Food Engineering* 2004, 62, 15-21.
- Santana, A.A.; Pereira-Martin, L.G.; Oliveira, R.A.; Kurozawa, L.E.; Park, K.J. Spray drying of babassu coconut milk using different carrier agents. *Drying Technology* 2017, 35, 76-87.
- Sharma, G.P. y Prasad, S. Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves. *Journal of Energy* 2006, 31, 1921-1926.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.SIAP. (2013). *Boletín de leche*. SAGARPA, México.
- Schmidt, S.J.; Lee, J.W. Comparison between water vapor sorption isotherms obtained using the new dynamic dewpoint isotherm method and those obtained using the standard saturated salt slurry method. *International Journal of Food Properties* 2012, 15, 236-248.
- Schuck, P.; Jeantet, R.; Tanguy, G.; Méjean, S.; Gac, A.; Lefebvre, T.; Labussière, E.; Martineau, C. Energy consumption in the processing of dairy and feed powders by evaporation and drying. *Drying Technology* 2015, 33, 176-184.
- Shahidi, F. y Han, X.Q. Encapsulation of food ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 1993, 33, 501-547.
- Sharma, G.P.; Prasad, S. Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves. *Journal of Energy* 2006, 31, 1921-1926.
- Shingare, S.P.; Thorat, N.B. Effect of Drying Temperature and Pretreatment on Protein Content and Color Changes during Fluidized Bed Drying of Finger Millets (Ragi, Eleusinecoracana) Sprouts. *Drying Technology* 2013, 31, 507-518.

- Siucinska, K.; Konopacka, D.; Frac, M.; Polubok, A. The effects of ultrasound on quality and nutritional aspects of dried sour cherries during shelf life. *Food Science and Technology* 2016, 68, 168-173.
- Smith, J.P.; Daifas, D.P.; El-Khoury, W.; Koukoutsis, J.; El-Koury, A. Shelf life and safety concerns of bakery products – a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2004, 44, 19-55.
- Soares, C., Fernando, A.L., Mendes, B. and Martins, A.P.L. The effect of lowering salt on the physicochemical, microbiological and sensory properties of Sao Joao cheese of Pico Island. *International Journal of Dairy Technology* 2015, 68, 409-419.
- Solvöl, K.M.; Sundarajan, S.; Alfaro, L.; Sathivel, S. Development of cantaloupe (*Cucumis melo*) juice powder using spray drying technology. *Food Science and Technology* 2012, 46, 287-293.
- Spalatel, C. Biotechnological valorization of whey. *Innovative Romanian Food Biotechnology* 2012, 10, 1-8.
- Taneja, A.A.; Ye, A.; Singh H. Influence of protein concentration on the stability of oil-in-water emulsions formed with aggregated milk proteins during spray drying. *Dairy Science and Technology* 2015, 95, 279-293.
- Tarhan, S.; Telci, I.; Tuncay, M.T.; Polatci, H. Peppermit drying performance of contact dryer in terms of product quality, energy consumption, and drying duration. *Drying Technology* 2011, 29, 642-651.
- Tasirin, M.S.; Puspasari, I.; Sahalan, Z.A.; Mokhtar, M.; Kamel, M.; Yaakob, Z. Drying of *Citrus sinensis* Peels in an Inert Fluidized Bed: Kinetics, Microbiological Activity, Vitamin C, and Limonene Determination. *Drying Technology* 2014, 32, 497-508.

- Tejada, L.; Sánchez, E.; Gómez, R.; Vioque, M.; Fernández, S.J. Effect of freezing and frozen storage on chemical and microbiological characteristics in sheep milk cheese. *Food Science* 2002, 67, 126-129.
- Temiz, H. Effect of modified atmosphere packaging on characteristics of sliced kashar cheese. *Food Process Preservation* 2010, 34, 926-943.
- Theppaya, T. y Prasertsan, S. Optimization of rubber wood drying by response surface method and multiple contour plots. *Drying Technology* 2004, 22, 1637-1660.
- Tonon, R.V., Brabet, C. y Hubinger, M.D. Influence of process conditions on the physicochemical properties of acai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. *Food Engineering* 2008, 88, 411-418.
- Toro-Sierra, J.; Schumann, J.; Kulozik, U. Impact of spray-drying conditions on the particle size of microparticulated whey protein fractions. *Dairy Science and Technology* 2013, 93, 487-503.
- Towler, C. (1987). Fluidized bed drying of edam cheese. *NZ. Journal of Dairy Science Technology* 22, 83-89.
- Troller, J.A. and Christian, J.H.B. (1980). Water activity-Basic Concepts. In: *Water activity and food*, (G.F. Stewart, C.O. Chichester, J. Hawthorn, E.M. Mrak, J.K. Scott, E.V. Sydow and A.I. Morgan Eds.), Pp. 1-12. Academic Press.
- Tsironi, T.N.; Taoukis, P.S. Effect of processing parameters on water activity and shelf life of osmotically dehydrated fish fillets. *Journal of Food Engineering* 2014, 123, 188-192.
- Tuyen T.T.; Truong, V.; Fukai, S.; Bhandari B. Effects of High-Temperature Fluidized Bed Drying and Tempering on Kernel Cracking and Milling Quality of Vietnamese Rice Varieties. *Drying Technology* 2009, 27, 486-494.



- Ucherek, M. An integrated approach to factors affecting the shelf life of products in modified atmosphere packaging (MAP). *Food Reviews International* 2004, 20,297-307.
- Vahidhosseini, S.M., Barati, E. y Esfahani, J.A. Green's function method (GFM) and mathematical solution for coupled equations of transport problem during convective drying. *JournalofFoodEngineering*2016, 187, 24-36.
- Vargas, P.S. Caracterización microbiológica de diversos tipos de quesos elaborados en el valle de Tulancingo Hidalgo. Tesis de licenciatura del Instituto de CienciasAgropecuarias.
- Varming, C. Beck, T.K. Petersen, M.A.;Ardo, Y. Impact of processing steps on the composition of volatile compounds in cheese powders. *DairyTechnology*2011, 64, 197-206.
- Vázquez-Chávez, L.; Vizcarra-Mendoza, M. Secado por lecho fluidizado del trigo y su calidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 2008, 7, 131-137.
- Vega, C. y Roos, Y.H. Spray-drieddairy and dairy-likeemulsionscompositionalconsiderations. *Dairy Science* 2005, 89, 383-401.
- Verma, A. y Singh, S.V. Spray drying of fruit and vegetables juices- A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2015, 55, 701-719.
- Vignolles, M.L.; Jeantet, R.; Lopez, C.; Schuck, P. Free fat, surface fat and dairy powders: interactions between process and product. A review.*Lait*2007, 87, 187-236.
- Villegas-Santiago, J.; Calderon-Santoyo, M.; Ragazzo-Sánchez, A.; Salgado-Cervantes, M.A.; Luna-Solano, G. Fluidized bed and tray drying of thinly sliced mango (*Mangiferaindica*) pretreated with ascorbic and citric acid. *Journal of Food Science and Technology* 2011, 46, 1296-1302.

- 
- Wade, W.A. (1998). Report on biomass drying technology. National renewable energy laboratory. Golden, CO. Code NREL/TP-570-25885.
- Walton D.E. The morphology of spray dried particles a qualitative view. *Drying Technology* 2000, 18, 1943-1986.
- Yan, Z.; Gallagher, M.J.; Oliveira, A.R. Sorption isotherms and moisture sorption hysteresis of intermediate moisture content banana. *Food Engineering* 2008, 86, 342-348.
- Yang, J.; Pan, Z.; Takeoka, G.; Mackey, B.; Bingol, G.; Brandl, M.T.; Garcin, K.; McHugh, T.H.; Wang. Shelf life of infrared dry roasted almonds. *Food Chemistry* 2013, 138, 671-678.
- Yazdanpanah, N.; Langrish, A.G.T. Releasing Fat in Whole Milk Powder during Fluidized Bed Drying. *DryingTechnology* 2012, 30, 1081-1087.
- Zantar, S.; Yedri, F.; Mrabet, R.; Laglaoui, A.;Bakkali, M.;Zerrouk, M.H. Effect of *Thymus vulgaris* and *origanum compactum* essential oils on the shelf life of fresh goat cheese. *Journal Essential Oil Research* 2014, 26, 76-84.