



# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA**

---

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO  
DE RECURSOS NATURALES  
(INGENIERÍA)**

## **“PROPIEDADES FÍSICAS DE JUGOS DE PITAYA SECADOS POR ASPERSIÓN”**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA  
KARINA AGUSTINA GARCÍA LUCAS**

**DIRECTORES DE TESIS  
DRA. LILIA LETICIA MÉNDEZ LAGUNAS  
DR. JUAN RODRÍGUEZ RAMÍREZ**

**SANTA CRUZ XOXOCOTLÁN, OAXACA**

**JUNIO, 2014**



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

SIP-14 BIS

*ACTA DE REVISION DE TESIS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 19 del mes de mayo del 2014 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: "Propiedades físicas de jugos de pitaya secados por aspersión",

Presentado por la alumna:

<b>García</b> Apellido paterno	<b>Lucas</b> materno	<b>Karina Agustina</b> nombre(s)							
		Con registro: <table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>9</td> </tr> </table>	A	1	2	0	0	1	9
A	1	2	0	0	1	9			

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISIÓN REVISORA**

Directores de tesis

 _____ Dra. Lilia Leticia Méndez Lagunas	 _____ Dr. Juan Rodríguez Ramírez
 _____ M. en C. Laura Victoria Aquino González	 _____ Dr. Pedro Montes García
 _____ Dr. Sadoth Sandoval Torres	

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

\_\_\_\_\_  
Dr. Rafael Pérez Pacheco





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESION DE DERECHOS**

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 19 del mes mayo del año 2014, el (la) que suscribe García Lucas Karina Agustina, alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro A120019, adscrita al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Dres. Lilia Leticia Méndez Lagunas y Juan Rodríguez Ramírez y cede los derechos del trabajo titulado: "Propiedades físicas de jugos de pitaya secados por aspersion", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: [posgradoax@ipn.mx](mailto:posgradoax@ipn.mx) ó [karigar86@hotmail.com](mailto:karigar86@hotmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

García Lucas Karina Agustina



CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACION PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
I.P.N.

# PROPIEDADES FÍSICAS DE JUGOS DE PITAYA SECADOS POR ASPERSIÓN

## RESUMEN

Las betalaínas son una fuente promisoría para la obtención de colorantes naturales y compuestos bioactivos, particularmente por sus tonalidades que abarcan de rojo a violeta y de amarillo a anaranjado. Estos colores son de interés debido a que pueden sustituir a los colorantes artificiales identificados como tóxicos. Sin embargo, las betalaínas son termolábiles y susceptibles a la degradación por factores físicos y químicos. Para mantener su estabilidad, la técnica de secado por aspersión puede ser utilizada, con este método los compuestos son encapsulados. En este trabajo se determinaron las condiciones de secado por aspersión para obtener polvos a partir de jugos de pitaya de las especies *Stenocereus griseus* y *Stenocereus pruinosus*. Jugos, suspensiones alimentadas al secador y polvos encapsulados fueron caracterizados. El contenido de humedad, rendimiento, color, isoterma de adsorción, temperatura de transición vítrea y morfología de los polvos fueron determinados. El color se midió con un colorímetro MiniScan, el ángulo de tono y el croma fueron calculados. Las isotermas de adsorción se obtuvieron con un VTI-SA+ y la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) se determinó empleando un calorímetro diferencial de barrido (DSC). La morfología de las partículas se analizó con un microscopio electrónico de barrido (SEM) y finalmente el contenido de humedad y el rendimiento fueron determinados por diferencia de peso y por la relación de masa recuperada/masa alimentada, respectivamente. Un diseño factorial  $2^3$  fue usado para evaluar el efecto de las condiciones de secado sobre las propiedades físicas. En general, no se encontraron diferencias importantes en las propiedades de los polvos de las dos especies de pitaya. Se encontró que el % de encapsulantes tuvo un efecto significativo en el rendimiento, mientras que el contenido de humedad y el color fueron afectados por todas las condiciones de secado. Los datos experimentales de isotermas de adsorción fueron ajustados a los modelos de GAB y BET y los datos de  $T_g$  se ajustaron al modelo de Gordon-Taylor. Las isotermas de adsorción

tuvieron un comportamiento tipo III, comúnmente observadas en alimentos ricos en azúcares. Los parámetros del modelo de GAB fueron calculadas con un valor de  $R^2 > 0.99$  y los del modelo de Gordon-Taylor con un valor de  $R^2 > 0.95$ . El factor que tuvo mayor efecto en la adsorción de agua y  $T_g$  fue el % de encapsulantes. Para calcular las condiciones críticas (actividad de agua y contenido de humedad críticos) de almacenamiento a 25 °C para los polvos se emplearon los ajustes de los modelos de GAB y Gordon-Taylor. La morfología de las partículas fue esférica con una superficie lisa sin colapsos. El tratamiento P7 (150 °C, 2 L/h y 90 % de encapsulantes) presentó las mejores características físicas, a estas condiciones de secado se asegura la obtención de polvos estables con una vida de anaquel prolongada y una menor pérdida del color, sugiriendo una mejor retención de las betalaínas. La actividad de agua crítica y contenido de humedad crítico para una temperatura de almacenamiento de 25 °C para polvos PG, OG y OA (tratamiento P7) fueron: 0.210 y 0.036 g H<sub>2</sub>O/g s.s., 0.252 y 0.043 g H<sub>2</sub>O/g s.s. y 0.247 y 0.043 g H<sub>2</sub>O/g s.s., respectivamente.

Dirigida por:

Dra. Lilia Leticia Méndez Lagunas

Dr. Juan Rodríguez Ramírez

## PHYSICAL PROPERTIES OF SPRAY DRIED PITAYA JUICE

### ABSTRACT

Betalains are a promising source of natural dyes and bioactive compounds as their tonalities range from red to violet and yellow to orange. These colors are of particular interest because they can replace artificial colorants that have been identified as toxic. Betalains, however, are thermolabile and thus susceptible to degradation caused by physical and chemical factors. Spray drying, as an encapsulation technique, can be employed so as to ensure their stability. In this work, the spray drying conditions were determined in order to obtain powders from the pitaya juice of the species *Stenocereus griseus* and *Stenocereus pruinosus*. The juices, the suspensions fed into the drier and the encapsulated powders were all characterized. Moisture content, yield, color, adsorption isotherm, glass transition temperature and powder morphology were determined. Color was measured with a MiniScan colorimeter and hue and chroma were calculated. The adsorption isotherms were obtained using VTI-SA+, the glass transition temperature ( $T_g$ ) was determined with a differential scanning calorimeter (DSC). Particle morphology was analyzed with a scanning electron microscope (SEM) and moisture content and yield were determined by weight difference and the mass recovered/mass fed relation, respectively. A  $2^3$  factorial design was used to evaluate the effect of drying conditions on physical properties. In general, no important differences were found between powder properties for either of the two pitaya species. It was found that the % of encapsulants had a significant effect on the yield and that moisture content and color were affected by all drying conditions. The experimental data of adsorption isotherms was fitted to BET and GAB models and the  $T_g$  data was fitted to a Gordon-Taylor model. The adsorption isotherms had a type III behavior, commonly observed in sugar-rich foods. The GAB model parameters were calculated with a value of  $R^2 > 0.99$  and the Gordon-Taylor parameters were calculated with a value of  $R^2 > 0.95$ . The factor with the greatest effect on water adsorption and  $T_g$  was the % of encapsulants. GAB and Gordon-

Taylor models were used to calculate the critical conditions (critical water activity and moisture content) of storage at 25 °C for powders. The particle morphology was spherical, with a smooth surface and without collapses. The P7 treatment (150 °C, 2 L/h and 90 % of encapsulants) had the best physical characteristics. These drying conditions assure stable powders with a long shelf life and less color loss, resulting in better betalain retention. Critical water activity ( $a_{wc}$ ) and critical moisture content ( $X_c$ ) at a storage temperature of 25°C for treatment P7, were 0.210 and 0.036 g H<sub>2</sub>O/g d.s. (powder PG), 0.252 and 0.043 g H<sub>2</sub>O/g d.s. (powder OG) and 0.247 and 0.043 g H<sub>2</sub>O/g d.s (powder OA), respectively.

Directed by

Dra. Lilia Leticia Méndez Lagunas

Dr. Juan Rodríguez Ramírez

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por permitirme alcanzar una meta más.

Al CONACYT, por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de Maestría.

Al CIIDIR-IPN-OAXACA, por las facilidades brindadas para la realización de esta tesis.

A mis directores de tesis Dra. Lilia Leticia Méndez Lagunas y Dr. Juan Rodríguez Ramírez, por su apoyo, paciencia, atención y consejos.

Al comité revisor, por sus correcciones y comentarios.

Al Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI), por la beca otorgada durante los periodos: Enero-Diciembre 2012, Enero-Diciembre 2013 y Enero-Junio 2014.

A la Coordinación de Cooperación Académica (CCA), por el apoyo de transporte otorgado para realizar mi estancia académica en la Universidad Purdue.

A la Universidad Purdue, especialmente al Dr. Osvaldo Campanella, por permitirme realizar parte de mi trabajo experimental en su laboratorio y al Dr. Bhavesh Patel por su paciencia y apoyo.

A mis padres Ángel y Socorro, por darme la vida y ayudarme a realizar mis sueños.

A mis hermanas Ángela y Cecilia, por ser mis mejores amigas y animarme en momentos difíciles.

A mis abuelitos Luis y Silvia, por su amor y apoyo incondicional.

A mis tíos Sylvia, María Luisa y Luis, por sus consejos.

A mis padrinos Darío y Carmen, por su cariño, confianza, apoyo y por creer en mí.

A mis primos Alejandro, Octavio y Leonardo, por regalarme momentos de alegría.

A mi novio Arturo, por su infinita paciencia, cariño y apoyo.

A todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron a la realización de esta tesis.

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	iv
<b>LISTA DE TABLAS</b>	vii
<b>LISTA DE ANEXOS</b>	viii
<b>NOMENCLATURA</b>	ix
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Justificación	5
1.4. Hipótesis	6
1.5. Objetivos	6
1.5.1. Objetivo general	6
1.5.2. Objetivos específicos	7
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	8
2.1. Las cactáceas <i>Stenocereus</i>	8
2.1.1. La pitaya	8
2.2. Betalaínas	9
2.2.1. Factores que afectan la estabilidad de las betalaínas	11
2.2.2. Reacciones de degradación por tratamiento térmico	12
2.3. Secado por aspersión	13
2.3.1. Etapas del secado por aspersión	14
2.3.2. Encapsulantes para el secado por aspersión	16
2.3.2.1. Maltodextrinas	16
2.3.2.2. Pectinas	17
2.3.3. Cambios físicos del material durante el secado por aspersión	17
2.4. Caracterización del polvo	19
2.4.1. Contenido de humedad	19

2.4.2. Actividad de agua	20
2.4.3. Isoterma de adsorción de humedad	21
2.4.3.1. Tipos de isothermas	22
2.4.3.2. Modelo de Brunauer-Emmett-Teller (BET)	22
2.4.3.3. Modelo de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)	23
2.4.3.4. Comparación de los modelos BET y GAB	24
2.4.3.5. Área de superficie del sólido	25
2.4.4. Temperatura de transición vítrea	25
2.4.4.1. Modelo de Gordon-Taylor.	27
2.4.5. Color	27
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>30</b>
3.1. Materia prima	30
3.2. Obtención de jugos	30
3.3. Medición de grados brix y sólidos totales en jugos	30
3.4. Preparación de suspensiones	31
3.5. Secado por aspersión	31
3.6. Propiedades físicas de polvos	33
3.6.1. Contenido de humedad	33
3.6.2. Rendimiento	33
3.6.3. Color	33
3.6.4. Isothermas de adsorción	34
3.6.5. Temperatura de transición vítrea	34
3.6.6. Morfología de las partículas	35
3.7. Diseño experimental y análisis de datos	36
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>38</b>
4.1. Grados brix y sólidos totales de jugos y suspensiones	38
4.2. Efecto de las condiciones del proceso de secado en las propiedades físicas de polvos	39

4.2.1. Efecto en el rendimiento	39
4.2.2. Efecto en el contenido de humedad	42
4.2.3. Efecto en el color	44
4.3. Isotermas de adsorción	58
4.4. Temperatura de transición vítrea	62
4.5. Estabilidad del producto bajo condiciones críticas	66
4.6. Morfología de las partículas	68
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>72</b>
5.1. Conclusiones	72
5.2. Recomendaciones	73
<b>REFERENCIAS</b>	<b>74</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>87</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Pitaya de <i>Stenocereus pruinosus</i> .	9
Figura 2.	Estructura química del ácido betalámico (a), betacianinas (b) y betaxantinas (c) (Modificado de Herbach et al., 2006).	10
Figura 3.	Estructura de la maltodextrina.	16
Figura 4.	Estructura de la pectina.	17
Figura 5.	Representación esquemática de los cambios físicos experimentados por las gotas del líquido alimentado durante el secado por aspersión ( $T_g$ =temperatura de transición vítrea, $T_{superficie}$ =temperatura de la superficie de la partícula durante el secado) (Modificado de Bhandari et al., 1997b).	18
Figura 6.	Isoterma de adsorción de humedad (Modificado de Basu et al., 2006).	21
Figura 7.	Tipos de isotermas (Modificado de Martínez et al., 1998).	22
Figura 8.	Espacio de color CIELAB (Konica minolta, 2014).	28
Figura 9	Espacio de color $L^*C^*h$ (Modificado de Konica minolta, 2014).	29
Figura 10.	Secador por aspersión escala piloto.	32
Figura 11.	Efecto de $E_{m/p}$ sobre el rendimiento de polvos.	40
Figura 12.	Efecto de las condiciones de secado en el rendimiento de polvos PG, (a) Efecto de $F_a$ , (b) Efecto de $T_e - E_{m/p}$ y (c) Efecto de $F_a - E_{m/p}$ .	41
Figura 13.	Efecto de $T_e - F_a$ en el rendimiento de polvos OG.	41
Figura 14.	Efecto de $T_e$ sobre $X_{bs}$ (%) de polvos.	43
Figura 15.	Efecto de $F_a$ sobre $X_{bs}$ (%) de polvos.	43
Figura 16.	Efecto de $E_{m/p}$ sobre $X_{bs}$ (%) de polvos.	44
Figura 17.	Efecto de las condiciones de secado sobre $L^*$ de polvos OG, (a) Efecto de $T_e$ , (b) Efecto de $F_a$ , c) Efecto de $E_{m/p}$ y d) Efecto de $T_e - E_{m/p}$ .	47
Figura 18.	Efecto de las condiciones de secado sobre $L^*$ de polvos OR, (a)	48

	Efecto de $T_e$ , (b) Efecto de $F_a$ , c) Efecto de $E_{m/p}$ y d) Efecto de $F_a - E_{m/p}$ .	
Figura 19.	Efecto de las condiciones de secado sobre $L^*$ de polvos PG, (a) Efecto de $T_e$ , (b) Efecto de $F_a$ y c) Efecto de $T_e - E_{m/p}$ .	49
Figura 20.	Efecto de las condiciones de secado sobre $L^*$ de polvos OA, (a) Efecto de $T_e$ y (b) Efecto de $T_e - F_a$ .	49
Figura 21.	Efecto de las condiciones de secado sobre $h$ de polvos PG, (a) Efecto de $T_e$ , (b) Efecto de $F_a$ , (c) Efecto de $E_{m/p}$ y (d) Efecto de $T_e - E_{m/p}$ .	51
Figura 22.	Efecto de las condiciones de secado sobre $h$ de polvos OR, (a) Efecto de $T_e$ , (b) Efecto de $F_a$ , (c) Efecto de $T_e - F_a$ y (d) Efecto de $T_e - E_{m/p}$ .	52
Figura 23.	Efecto de las condiciones de secado sobre $h$ de polvos OA, (a) Efecto de $T_e$ , (b) Efecto de $F_a$ y (c) Efecto de $F_a - E_{m/p}$ .	53
Figura 24.	Efecto de las condiciones de secado sobre $h$ de polvos OG, (a) Efecto de $T_e$ , (b) Efecto de $F_a$ , (c) Efecto de $E_{m/p}$ y (d) Efecto de $T_e - F_a$ .	54
Figura 25.	Efecto de las condiciones de secado sobre $C^*$ de polvos PG, (a) Efecto de $T_e$ , (b) Efecto de $E_{m/p}$ , (c) Efecto de $T_e - F_a$ y (d) Efecto de $F_a - E_{m/p}$ .	55
Figura 26.	Efecto de las condiciones de secado sobre $C^*$ de polvos OR, (a) Efecto de $F_a$ , (b) Efecto de $E_{m/p}$ y (c) Efecto de $T_e - F_a$ .	56
Figura 27.	Efecto de las condiciones de secado sobre $C^*$ de polvos OA, (a) Efecto de $T_e$ , (b) Efecto de $F_a$ , (c) Efecto de $E_{m/p}$ y (d) Efecto de $T_e - E_{m/p}$ .	57
Figura 28.	Efecto de las condiciones de secado sobre $C^*$ de polvos OG, (a) Efecto de $T_e$ , (b) Efecto de $E_{m/p}$ y (c) Efecto de $T_e - E_{m/p}$ .	58
Figura 29.	Isotermas de adsorción de agua de polvos PG.	59
Figura 30.	Isotermas de adsorción de agua de polvos OG.	59
Figura 31.	Isotermas de adsorción de agua de polvos OA.	60
Figura 32.	Termogramas obtenidos del análisis DSC en polvo PG	62

	tratamiento P3 a diferentes $a_w$ .	
Figura 33.	Temperatura de transición vítrea en función del contenido de humedad de polvos PG.	65
Figura 34.	Temperatura de transición vítrea en función del contenido de humedad de polvos OG.	65
Figura 35.	Temperatura de transición vítrea en función del contenido de humedad de polvos OA.	66
Figura 36.	Relación entre la temperatura de transición vítrea-actividad de agua y contenido de humedad al equilibrio-actividad de agua del polvo PG tratamiento P7.	67
Figura 37.	Micrografías de partículas de polvo OG diferentes tratamientos, (a) P1, (b) P2, (c) P3 y (d) P4.	69
Figura 38.	Micrografías de partículas de polvo OG diferentes tratamientos, (a) P5, (b) P6, (c) P7 y (d) P8.	70
Figura 39.	Micrografías de partículas de diferentes polvos con el tratamiento P3, (a) OA, (b) OR y (c) PG.	71

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Comportamiento de una partícula amorfa en función de los grados que sobrepasa su $T_g$ durante el secado (Bhandari et al., 1997b).	19
Tabla 2.	Contenido de humedad en base húmeda y base seca (Modificado de Figura & Teixeira, 2007).	20
Tabla 3.	Condiciones utilizadas para la obtención de isothermas de adsorción.	34
Tabla 4.	Diseño experimental.	36
Tabla 5.	Grados brix y sólidos totales de jugos y suspensiones.	38
Tabla 6.	Rendimiento de polvos.	39
Tabla 7.	Contenido de humedad de polvos.	42
Tabla 8.	Valores de color de polvos PG.	45
Tabla 9.	Valores de color de polvos OG.	45
Tabla 10.	Valores de color de polvos OR.	46
Tabla 11.	Valores de color de polvos OA.	46
Tabla 12.	Parámetros del modelo de GAB para polvos.	61
Tabla 13.	Parámetros del modelo de BET para polvos.	61
Tabla 14.	Temperatura de transición vítrea de polvos acondicionados a diferentes $a_w$ .	63
Tabla 15.	Parámetros estimados para el modelo de Gordon-Taylor para polvos.	64
Tabla 16.	Valores de actividad de agua crítica ( $a_{wc}$ ) y contenido humedad crítico ( $X_c$ ) de polvos.	67

## TABLA DE ANEXOS

Anexo A.	Ejemplo para calcular la cantidad de encapsulantes adicionados al jugo	87
Anexo B.	Especificaciones del secador por aspersión Niro-atomizer	87
Anexo C.	Temperaturas del aire de salida del secador	88
Anexo D.	Polvos de jugos de pitaya	89
Anexo E.	Contenido de humedad de polvos	90
Anexo F.	Rendimiento de polvos	92
Anexo G.	Análisis de varianza de propiedades físicas de polvos	93
Anexo H.	Contenido de humedad al equilibrio de polvos	107
Anexo I.	Fracción de masa de agua de polvos	109
Anexo J.	Relación temperatura de transición vítrea-actividad de agua y contenido de humedad al equilibrio-actividad de agua de polvos	112

## NOMENCLATURA

$a_w$	Actividad de agua
$a_{wc}$	Actividad de agua crítica
H <sub>2</sub> O	Agua
ANOVA	Análisis de varianza
DMA	Análisis dinámico mecánico
TMA	Análisis termomecánico
h	Ángulo de tono (°)
S <sub>A</sub>	Área de superficie del sólido (m <sup>2</sup> /g de sólido)
A <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Área de una molécula de agua (m <sup>2</sup> )
BET	Brunauer-Emmett-Teller
DSC	Calorímetro diferencial de barrido
MDSC	Calorímetro diferencial de barrido modulado
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbonato de potasio
LiCl	Cloruro de litio
MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	Cloruro de magnesio hexahidratado
NaCl	Cloruro de sodio
R <sup>2</sup>	Coefficiente de correlación
pH	Concentración de iones de hidrógeno
k	Constante del modelo de Gordon-Taylor
C	Constante relacionada con el calor de sorción de la monocapa
K	Constante relacionada con el calor de sorción de la multicapa
X <sub>bh</sub>	Contenido de humedad base húmeda (g H <sub>2</sub> O/g s.h.)
X <sub>bs</sub>	Contenido de humedad base seca (g H <sub>2</sub> O/g s.s.)
X <sub>c</sub>	Contenido de humedad crítico (g H <sub>2</sub> O/g s.s.)
X <sub>m</sub>	Contenido de humedad de la monocapa (g H <sub>2</sub> O/g s.s.)
X <sub>eq</sub>	Contenido de humedad en el equilibrio (g H <sub>2</sub> O/g s.s.)
b*	Coordenada de color (amarillo o azul)
a*	Coordenada de color (rojo o verde)

C*	Croma
ICG	Cromatografía de gases inversa
DE	Equivalente de dextrosa
SE	Error estándar
$x_w$	Fracción de masa de agua (g H <sub>2</sub> O/g s.h.)
df	Grados de libertad de la ecuación ajustada
G.L.	Grados de libertad en el análisis de varianza
GAB	Guggenheim-Anderson-de Boer
HR	Humedad relativa
L*	Luminosidad
$m_{H_2O}$	Masa de agua (g)
P <sub>1</sub>	Masa de la cápsula con el residuo seco (g)
P <sub>2</sub>	Masa de la cápsula con la cama de gasa (g)
$m_{s.s.}$	Masa de sólido seco (g)
$m_{total}$	Masa total (g)
SEM	Microscopio electrónico de barrido
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Nitrato de magnesio
$\alpha$	Nivel de significancia
N <sub>A</sub>	Número de Avogadro (moléculas/mol)
n	Número de datos experimentales
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de fósforo
P <sub>p</sub>	Peso del polvo (g)
PM <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Peso molecular del agua (g/mol)
PVP	Polivinilpirrolidona
OA	Polvos producidos con jugo de pitaya anaranjada de <i>S. pruinosa</i>
PG	Polvos producidos con jugo de pitaya guinda de <i>S. grisea</i>
OG	Polvos producidos con jugo de pitaya guinda de <i>S. pruinosa</i>
OR	Polvos producidos con jugo de pitaya roja de <i>S. pruinosa</i>
p	Presión de vapor del agua de un alimento
p <sub>o</sub>	Presión de vapor del agua pura

F	Prueba de Fisher
y	Rendimiento (%)
NMR	Resonancia magnética nuclear
s.h.	Sólido húmedo
s.s.	Sólido seco
S <sub>T</sub>	Sólidos totales (g/L)
RSS	Suma de cuadrados residual
T <sub>superficie</sub>	Temperatura de la superficie de la partícula (°C)
T <sub>g</sub>	Temperatura de transición vítrea (°C)
T <sub>gs</sub>	Temperatura de transición vítrea de los sólidos anhidros (°C)
T <sub>gw</sub>	Temperatura de transición vítrea del agua (°C)
T <sub>e</sub>	Temperatura del aire de entrada (°C)
T <sub>s</sub>	Temperatura del aire de salida (°C)
M <sub>Cal</sub>	Valor estimado a través de la ecuación de ajuste
M	Valor medido experimentalmente
F <sub>a</sub>	Velocidad de flujo de alimentación (L/h)
V <sub>M</sub>	Volumen alimentado de muestra (L)
V	Volumen de la muestra (cm <sup>3</sup> )
E <sub>m/p</sub>	% de encapsulantes

## 1. INTRODUCCIÓN

La pitaya es el fruto producido por la cactácea columnar del género *Stenocereus*, rica en nutrientes y ha generado interés por sus beneficios potenciales hacia la salud. El color característico y la actividad antioxidante de estos frutos se debe a la presencia de betalaínas (García-Cruz et al., 2012; García-Cruz et al., 2013), pigmentos naturales que son afectados en su estabilidad por factores como: pH, actividad de agua, luz, oxígeno y temperatura (Herbach et al., 2006). La estabilidad de dichos pigmentos podría mejorarse utilizando una técnica encapsulante.

Una técnica de encapsulado adecuada para productos sensibles al calor es el secado por aspersion (Abadio et al., 2004; Ferrari et al., 2012). En ella un compuesto bioactivo queda atrapado o incrustado en un biopolímero, el cual lo protege de las condiciones ambientales (oxígeno, agua, luz, etc.) mejorando su estabilidad (Desai & Park, 2005). Diferentes tipos de agentes encapsulantes son utilizados en la industria alimentaria entre los que se encuentran carbohidratos, gomas y proteínas.

Los productos obtenidos del secado por aspersion tienen potencial económico y beneficios como reducción en su volumen o peso, fácil manejo y transporte y mayor vida de anaquel (Shrestha et al., 2007).

Para evaluar la estabilidad de estos productos al almacenamiento se utilizan la temperatura de transición vítrea y la actividad de agua (Goula et al., 2008).

El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de las condiciones de secado por aspersion en las propiedades físicas de polvos de jugos de pitaya, tales como: rendimiento, contenido de humedad, color, isoterma de adsorción, temperatura de transición vítrea y morfología.

## 1.1. Antecedentes

El proceso de secado por aspersion ha sido utilizado desde principios del siglo XX. Aunque existen patentes para el secado por aspersion de huevos y leche desde 1850, la atomizacion industrial de alimentos aparecio hasta 1913 en un proceso desarrollado para leche. El primer equipo fue desarrollado por el aleman Kraus en 1912, pero comercialmente se conoció gracias al danés Nyro en 1933 (Masters, 1991). Este método ha sido adaptado a otros productos como café, té, jugos de frutas, enzimas, proteínas, etc.

Bhandari es uno de los autores que ha estudiado durante años el efecto del secado por aspersion en productos ricos en azúcares, en trabajos como Bhandari et al., 1993 y Bhandari et al., 1997a, en el que lleva a cabo el secado por aspersion de jugos de grosella negra, albaricoque, frambuesa, piña y miel, respectivamente y Bhandari et al., 1997b en el que analizaron el comportamiento de diferentes azúcares durante el proceso de secado.

Otros autores que han estudiado el efecto del secado por aspersion en las propiedades de polvos de jugos de frutas y que sirvieron como base para la presente investigacion se muestran a continuacion.

Tonon et al. (2008) estudiaron el efecto de las condiciones del proceso de secado por aspersion en el rendimiento, contenido de humedad, higroscopicidad y morfología de polvos de pulpa de acai. Las condiciones empleadas fueron: temperatura del aire de entrada de 138 °C a 202 °C, velocidad de flujo de alimentacion de 5 a 25 g/min y concentracion de maltodextrina de 10 a 30 %. Ellos encontraron que el contenido de humedad del polvo y rendimiento del proceso fue afectado positivamente por la temperatura del aire de entrada y negativamente por el flujo de alimentacion, el rendimiento del proceso también fue influenciado negativamente por la concentracion de maltodextrina, la higroscopicidad de los polvos disminuye con un incremento de la concentracion de maltodextrina,

decremento de la temperatura del aire de entrada e incremento del flujo de alimentación, las partículas producidas, a elevadas temperaturas y concentraciones de maltodextrina, fueron grandes y un gran número de ellas mostró una superficie lisa. En otro estudio, Tonon et al. (2011) realizaron isotermas de adsorción de polvos de jugo de acai y encontraron que los modelos que mejor se ajustaron a los datos experimentales fueron BET y GAB.

Obon et al. (2009) analizaron polvos de jugo de frutos de *Opuntia stricta* y encontraron cavidades en la corteza de algunas partículas individuales. Ellos sugieren que las esferas huecas fueron formadas en el proceso de secado por aspersión.

Saéñz et al. (2009) estudiaron polvos de compuestos bioactivos de tuna de *Opuntia ficus* secados por aspersión y observaron partículas esféricas irregulares con una superficie ampliamente abollada atribuyendo esa formación a la contracción de las partículas durante el proceso de secado.

Ferrari et al. (2012) evaluaron el efecto de las condiciones del secado por aspersión en el contenido de humedad, higroscopicidad, contenido de antocianinas y color de polvos de jugo de zarzamora. Las condiciones utilizadas en el secado fueron: temperatura del aire de entrada de 140 a 180 °C y concentraciones de maltodextrina de 5 a 25 %. Estos autores encontraron que los polvos producidos con altas concentraciones de maltodextrina fueron menos higroscópicos, menos rojos y tuvieron un contenido de humedad menor, los polvos producidos a altas temperaturas mostraron un contenido de humedad bajo, menor higroscopicidad y una mayor pérdida de antocianinas. Concluyen que las mejores condiciones de procesamiento para preservar el contenido de antocianinas y las características de color del polvo fueron a 140-150 °C y 5-7 % de maltodextrina.

Tze et al. (2012) secaron por aspersión jugo de pitahaya roja utilizando temperaturas de aire de entrada de 145, 155, 165 y 175 °C y concentraciones de maltodextrina de 20 y 30 %. Ellos analizaron las propiedades fisicoquímicas de los polvos obtenidos y encontraron un contenido de humedad menor al 10 %, una temperatura de transición vítrea entre 59 y 74 °C y una correlación significativa entre el contenido de betacianina y el valor de luminosidad ( $L^*$ ), concluyen que el polvo producido a 155 °C con 20 % de maltodextrina tuvo el más alto contenido de betalaínas.

Lee et al. (2013) evaluaron las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes de polvo de jugo de pitahaya roja obtenido mediante secado por aspersión a una temperatura del aire de entrada de 120 °C y concentración de maltodextrina de 30 % (w/v). Ellos obtuvieron valores de temperatura de transición vítrea entre 17 y -4.3 °C para humedades relativas entre 33 y 75 %, partículas esféricas con superficie lisa y con un tamaño entre 3 y 7  $\mu\text{m}$ , bajo contenido de betacianina, ácido ascórbico y fenoles totales comparado con el jugo antes del secado, concluyen que el secado por aspersión causa pérdida de algunos compuestos bioactivos.

## **1.2. Planteamiento del problema**

Los frutos de las cactáceas *Stenocereus* son exóticos, de sabor agradable y ricos en nutrientes, pero de disponibilidad limitada debido a que son de temporal y tienen una vida de anaquel corta. Por esta razón, se requiere evaluar procesos para la transformación del producto que garanticen su estabilidad.

Una técnica puede ser el secado por aspersión. En este proceso se obtienen productos de buena calidad y ha sido ampliamente utilizado para producir polvos de jugo de fruta (Cano-Chauca et al., 2005; Quek et al., 2007). Para secar jugos por aspersión es necesario adicionar encapsulantes de alto peso molecular. Sin embargo, la utilización de encapsulantes modifica las propiedades del

producto final (León-Martínez et al., 2010). Las propiedades físicas de los polvos secados por esta técnica dependen de las condiciones de operación como son: la temperatura del aire de entrada, velocidad de atomización, flujo de alimentación, tipo y concentración de encapsulantes. Por esta razón es necesario evaluar el efecto de las condiciones de secado por aspersión (temperatura del aire de secado, velocidad de flujo de alimentación y % de encapsulantes) en las propiedades físicas de polvos de jugos de pitaya para garantizar la calidad y estabilidad del producto final.

### **1.3. Justificación**

Actualmente la industria alimentaria ha incrementado su interés en el uso de colorantes naturales por la fuerte demanda de los consumidores por productos naturales, debido a que los colorantes artificiales han sido asociados a problemas de toxicidad y carcinogenicidad en el cuerpo humano (Boo et al., 2012). En Estados Unidos y en la Unión Europea las betalaínas están autorizadas para su uso como colorante en alimentos y se comercializan con el nombre de “rojo remolacha (E162)”. Su presentación en el mercado es en forma de concentrados o en polvos producidos por secado por aspersión. Este colorante ha sido utilizado con éxito en productos como caramelos duros, yogures, helados, sustitutos de carnes, mezclas de bebidas en polvo, mezcla para pasteles y refrescos (Marmion, 2012).

Una fuente alternativa para la obtención de este pigmento puede ser la pitaya, fruto de una cactácea que presenta tolerancia a elevadas temperaturas y largos períodos de sequía.

Por las propiedades de este pigmento, es necesario aplicar el secado por aspersión como técnica encapsulante, la cual proporciona protección a los compuestos sensibles y permite una liberación controlada de dichos compuestos (Desai & Park, 2005). Este proceso ofrece tiempos cortos de contacto (5-100 s) y

temperaturas relativamente bajas, lo que permite que algunas propiedades de los alimentos como sabor, color y nutrientes, puedan conservarse en porcentajes altos (Master, 1991, Kuts & Samsonyuk, 1989, Shiga et al., 2001), mejorando la estabilidad del producto final, disminuyendo la actividad de agua y la actividad microbiana, los cambios físicos y químicos durante el almacenamiento.

En el jugo de pitaya es de interés conservar las betalaínas, compuestos termolábiles que son sensibles durante los procesos de conservación. En particular se pretende encapsular estos compuestos, que son responsables del color y la actividad antioxidante, usando el método de secado por aspersion. Obtener un producto que tenga una estructura estable favorecerá la retención de las betalaínas, sin embargo, no se cuenta con información acerca del efecto de las condiciones de secado en las propiedades físicas del jugo de pitaya encapsulado, las cuales tienen una fuerte influencia en la retención de las betalaínas.

#### **1.4. Hipótesis**

- Las condiciones del proceso de secado (temperatura del aire de entrada, velocidad de flujo de alimentación y % de encapsulantes) afectan significativamente el rendimiento, contenido de humedad y color de polvos.
- Los polvos obtenidos mediante secado por aspersion son estables a condiciones ambientales.

#### **1.5. Objetivos**

##### **1.5.1. Objetivo general**

- Evaluar el efecto de las condiciones del proceso de secado por aspersion (temperatura del aire de entrada, velocidad de flujo de alimentación y % de encapsulantes) en las propiedades físicas de polvos de jugos de pitaya.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Establecer las condiciones del proceso de secado por aspersión para la obtención de polvos de jugos de pitaya.
- Caracterizar los polvos mediante algunas propiedades físicas.
- Evaluar el efecto de la temperatura de entrada, velocidad de flujo de alimentación y % de encapsulantes en el contenido de humedad, rendimiento, color, isoterma de adsorción, temperatura de transición vítrea y morfología de polvos.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Las cactáceas *Stenocereus*

Las cactáceas son una familia de plantas originarias del continente americano constituida por alrededor de 1500 a 2000 especies. Los miembros de esta familia se distribuyen desde Canadá hasta Argentina, en México se encuentran entre 550 a 900 especies, en las que se tiene un 79 % de endemismo (Bravo-Holis, 1978, Barthlott & Hunt, 1993; CONABIO, 2000).

Dentro de las cactáceas columnares (*pachycereae*), el género *Stenocereus* incluye 24 especies, de las cuales 22 son nativas de México, y de estas, 20 son endémicas (Arreola-Nava, 1999). En el sureste de México, principalmente en la región de la Mixteca conformada por los estados de Oaxaca y Puebla, se cultivan cactáceas de la especie *Stenocereus griseus* y *Stenocereus pruinosus* (Mercado & Granados, 1999; Luna-Morales et al., 2001; Martínez & Bonilla, 2005). Dichas especies producen frutas comestibles llamadas pitayas, estas son recolectadas para autoconsumo y comercialización debido a su importancia nutricional y económica.

#### 2.1.1. La pitaya

La pitaya (Figura 1) es un fruto con sabor dulce, de forma redonda u ovoide, su epidermis es de color verde o roja dependiendo de la madurez y posee una gran cantidad de espinas. Su pulpa con abundantes semillas negras puede presentar diferentes coloraciones (guinda, rojo, anaranjado, amarillo y blanco) dependiendo de la variedad. El color característico de estos frutos se debe principalmente a las betalaínas. La pitaya se produce en el mes de Mayo y tiene una vida de anaquel entre tres y siete días dependiendo del tipo de pitaya y condiciones de almacenamiento (Mercado & Granados, 1999; Martínez & Bonilla, 2005); se consume en fresco o procesada (jugo, helado, yogurt y mermelada).



Figura 1. Pitaya de *Stenocereus pruinosus*.

## 2. 2. Betalaínas

Las betalaínas son pigmentos naturales nitrogenados, solubles en agua. Se clasifican en dos grupos: las betacianinas de color rojo-violeta y las betaxantinas de color amarillo-anaranjado. La unidad estructural base de estos pigmentos es el ácido betalámico (Figura 2a) que unido con un cyclo-3,4-dihidroxifenilalanina (ciclo-Dopa) forman las betacianinas (Figura 2b), mientras que con un aminoácido o amina forman las betaxantinas (Figura 2c) (Azeredo, 2009). Las betacianinas y betaxantinas que se han identificado en las cactáceas son la betanina, filocactina e indicaxantina, respectivamente (Stintzing & Carle, 2007).

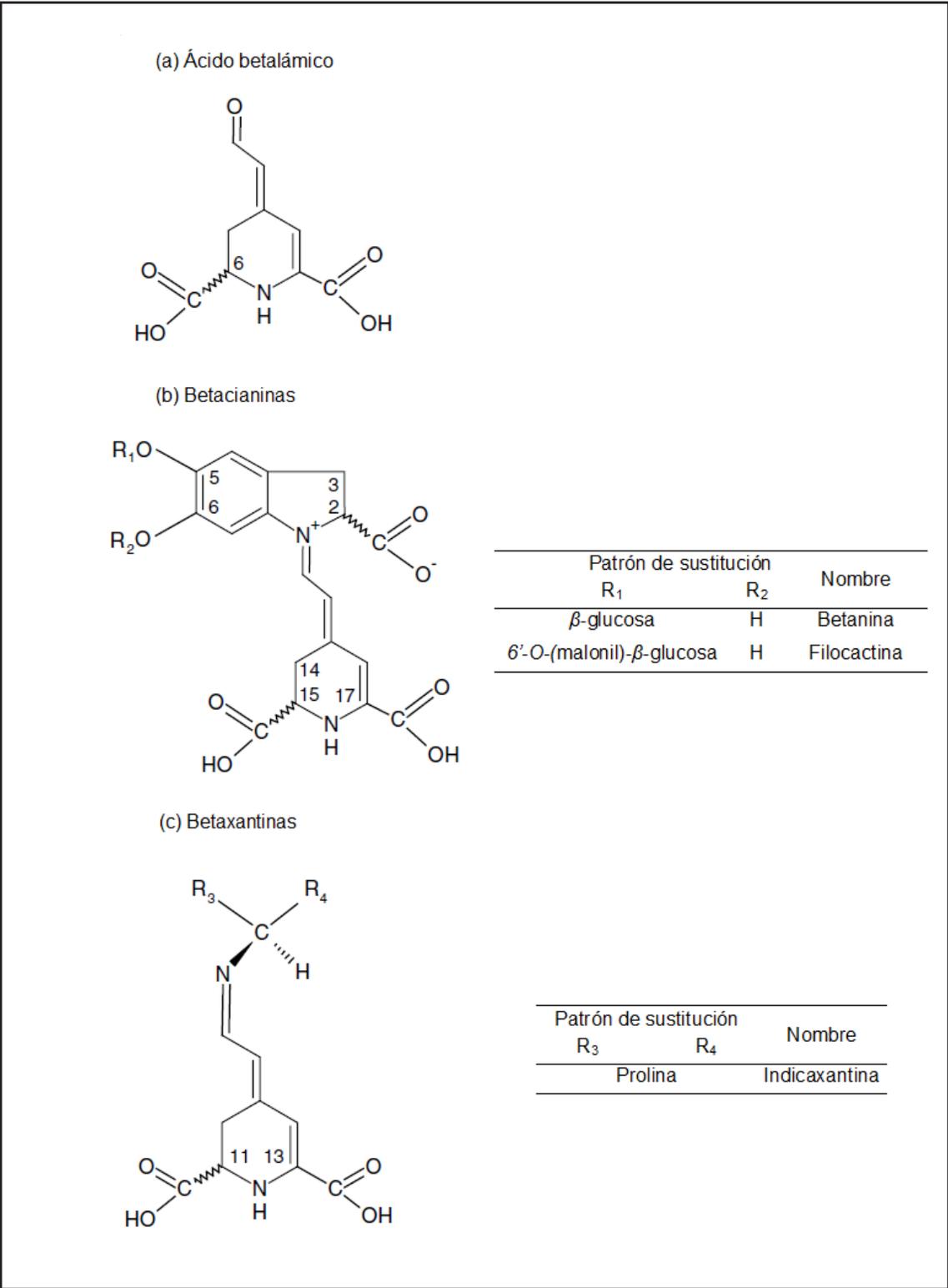


Figura 2. Estructura química del ácido betalámico (a), betacianinas (b) y betaxantinas (c) (Modificado de Herbach et al., 2006).

### 2.2.1. Factores que afectan la estabilidad de las betalaínas

Los principales factores que influyen en la estabilidad de las betalaínas son: temperatura, pH, actividad de agua, oxígeno, luz y cationes metálicos (Herbach et al., 2006).

- Temperatura.- Es un factor crítico en la estabilidad de las betalaínas durante el procesamiento y almacenamiento de los alimentos. La degradación térmica de las betalaínas sigue una cinética de reacción de primer orden (Herbach et al., 2006; Azeredo, 2009).
- pH.- Las betalaínas son estables en un intervalo de pH entre 3.5-7, lo que hace posible su aplicación en alimentos con baja acidez. El pH óptimo para la estabilidad de la betanina se encuentra entre 5-6 (Azeredo, 2009).
- Actividad de agua ( $a_w$ ).- Las betalaínas presentan mayor estabilidad en alimentos con bajo contenido de humedad y  $a_w$ , esto se atribuye a la reducida movilidad del reactante o a la limitada solubilidad del oxígeno. Valores de  $a_w$  inferiores a 0.63 favorecen la estabilidad de la betanina (Herbach et al., 2006; Azeredo, 2009).
- Oxígeno.- La reacción entre betalaínas y oxígeno molecular causa el oscurecimiento del producto y la degradación del pigmento. La estabilidad de la betanina decrece linealmente con el incremento en la concentración de oxígeno (Herbach et al., 2006; Azeredo, 2009).
- Luz.- La degradación de las betalaínas inducida por luz es dependiente del oxígeno, debido a que en condiciones anaerobias el efecto de la luz es insignificante en la estabilidad (Herbach et al., 2006; Azeredo, 2009).
- Cationes metálicos.-Varios estudios demuestran que los cationes metálicos como hierro, cobre, estaño y aluminio aceleran la degradación de la betanina (Herbach et al., 2006; Azeredo, 2009).

### 2.2.2. Reacciones de degradación por tratamiento térmico.

Durante el tratamiento térmico las betalaínas pueden ser degradadas por descarboxilación, hidrólisis, deshidrogenación, isomerización y desglicosilación resultando en algunos casos en una reducción gradual del color (Azeredo, 2009).

- Descarboxilación. Teóricamente, la descarboxilación puede ocurrir en los carbonos C<sub>2</sub>, C<sub>15</sub> y C<sub>17</sub> de las betacianinas y en el C<sub>11</sub> y C<sub>13</sub> de las betaxantinas. Cuando la descarboxilación ocurre en C<sub>2</sub> y C<sub>15</sub> se mantienen las características cromáticas del precursor (betanina), mientras que cuando ocurre en C<sub>17</sub> las características cambian (compuesto de coloración rojo-anaranjado). Se ha observado que la escisión de un grupo carboxilo de betanina, betanidina e indicaxantina cuando se sometió en agua hirviendo dio lugar a máximos de absorbancia más pequeños en comparación con las betalaínas auténticas (Herbach et al., 2006).
- Hidrólisis. La hidrólisis de las betalaínas se produce por la ruptura hidrolítica del enlace aldimina, esto se ha observado en tratamientos térmicos y en condiciones de pH mayores a 6. La hidrólisis de la betanina produce no solo una disminución de la intensidad del color sino también un considerable cambio de color hacia el amarillo, debido a que la ruptura de la betanina genera ácido betalámico (amarillo brillante) y ciclo-Dopa-5-O-β-glucósido (incolora) (Herbach et al., 2006).
- Deshidrogenación. La deshidrogenación de betalaínas generan la formación de neobetanina que se caracteriza por tener un color amarillo. Se ha confirmado la formación de neobetanina en jugo de remolacha sometido a tratamiento térmico bajo condiciones aerobias (Herbach et al., 2004).
- Isomerización. La isomerización puede ser considerada una modificación estructural más que una reacción de degradación. Las betalaínas están acompañadas de su isómero y su relación depende del tipo de fuente. La betanina se isomeriza en el carbono C<sub>15</sub> a isobetanina, la cual muestra propiedades cromáticas idénticas a la betanina. Se ha demostrado que la

isomerización se produce en condiciones ácidas, alcalinas y tratamientos térmicos (Herbach et al., 2004 y 2006).

- Desglicosilación. La molécula de glucosa puede separarse de la betanina bajo condiciones fuertemente ácidas, a altas temperaturas y en presencia de  $\beta$ -glucosidasa, resultando en un color rojo violeta intenso por la formación de una aglicona de menor estabilidad debido a su mayor susceptibilidad a la oxidación (Herbach et al., 2006).

### **2.3. Secado por aspersión**

El secado por aspersión es un proceso en el cual un producto líquido (solución, emulsión o suspensión) es atomizado en una corriente de gas caliente (aire o nitrógeno) para obtener instantáneamente un polvo (Gharsallaoui et al., 2007). Esta técnica produce partículas con un tamaño entre 1-600  $\mu\text{m}$ . El secado por aspersión es apropiado para productos sensibles al calor, debido a que ofrece temperaturas relativamente bajas y tiempos de residencia cortos (5-100 s) (Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 1996; Filková et al., 2006).

Los productos para ser secados por aspersión se clasifican en dos grupos: productos no pegajosos y productos pegajosos. Los productos pegajosos son generalmente difíciles de secar. Durante el proceso de secado estos pueden permanecer como jarabe o pegarse en la pared del secador resultando en bajos rendimientos del producto y problemas operacionales. El polvo de jugo de fruta es considerado un producto pegajoso. El comportamiento pegajoso es atribuido a la baja temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de los azúcares de bajo peso molecular como la fructuosa (5 $^{\circ}$  C), glucosa (31  $^{\circ}$ C) y sacarosa (62  $^{\circ}$ C) y ácidos orgánicos como el ácido cítrico, ácido málico y ácido tartárico, los cuales constituyen más del 90 % de los sólidos en los jugos de frutas (Bhandari et al., 1997b; Fazaeli et al., 2012). La  $T_g$  es un rango de temperatura en el cual un sólido amorfo cambia de un estado vítreo a un estado gomoso. Una solución a este problema es la adición

de encapsulantes de alto peso molecular para incrementar la  $T_g$  del material y lograr un secado eficiente.

Este proceso de secado produce polvos de buena calidad, con baja actividad de agua, de fácil transporte y almacenamiento. Las propiedades físicas del producto obtenido dependen de las condiciones de operación empleadas (temperatura del aire de entrada y salida, velocidad de flujo de alimentación y velocidad de atomización) así como de las características y composición del líquido alimentado (viscosidad, concentración y tipo de sólidos presentes) (Colina, 2010; Phisut, 2012).

### **2.3.1. Etapas del secado por aspersion**

El proceso de secado por aspersion consiste en cuatro etapas: atomización de la solución, contacto de la solución atomizada con el aire secante, evaporación del agua y recuperación del producto (Masters, 1991).

- Atomización de la solución. La atomización es la etapa más importante del proceso de secado. El principal objetivo de esta etapa es crear una superficie máxima de transferencia de calor entre el aire seco y el líquido con la finalidad de optimizar la transferencia de masa y calor. El fluido puede ser atomizado en pequeñas gotas mediante presión o energía centrífuga (Masters, 1991; Gharsallaoui et al., 2007). El atomizador rotario es un tipo de atomizador que utiliza la fuerza centrífuga, es ampliamente usado debido a que producen una atomización homogénea y el tamaño de las partículas se puede controlar variando la velocidad de atomización (Filková et al., 2006). A mayor velocidad de atomización la partícula será más pequeña. A una velocidad de atomización constante, el tamaño de la partícula aumenta cuando la velocidad de alimentación se incrementa. Este tipo de atomizador se utiliza para fluidos poco homogéneos, con sólidos en suspensión y de elevada viscosidad (Colina, 2010).

- Contacto de la solución atomizada con el aire secante. Existen tres formas de contacto aire caliente-gota: flujo en paralelo, flujo en contracorriente y mixto. En el flujo en paralelo, el líquido es atomizado en la misma dirección que el flujo de aire caliente, la temperatura del aire caliente de entrada puede estar entre 150 y 220 °C, la evaporación se realiza de forma instantánea y el producto seco se expondrá a temperaturas moderadas (50-80 °C), limitando las degradaciones térmicas (Masters, 1991; Filková et al., 2006; Gharsallaoui et al., 2007).
- Evaporación del agua. La velocidad de evaporación se lleva a cabo en dos periodos: periodo de velocidad constante y periodo de velocidad decreciente. En el periodo de velocidad constante la difusión de humedad desde dentro de las gotas permite mantener la superficie saturada de líquido, el tamaño de la gota decrece y la temperatura de la superficie permanece constante y la temperatura del aire de secado disminuye conforme gana humedad. En el periodo de velocidad decreciente la velocidad de migración de la humedad a la superficie de la gota no es suficiente para mantenerla saturada, en este momento se presentan zonas secas sobre la superficie y se alcanza el punto crítico de humedad, en donde la gota ya no puede reducir más su tamaño y su temperatura empieza a aumentar. En este punto el aire de secado llega a la temperatura y humedad críticas, su temperatura disminuye hasta la establecida por el final del proceso aumentando su humedad. La velocidad de secado y tiempo dependen de las características del producto y la temperatura del aire de entrada (Masters, 1991; Treybal, 1996).
- Recuperación del producto. La separación del producto se hace regularmente mediante un ciclón que se encuentra colocado en la parte externa del secado, en el se recolectan partículas finas, mientras que las partículas más densas son recuperadas en la base de la cámara del secador (Gharsallaoui et al., 2007). Los ciclones emplean la fuerza centrífuga para separar las partículas y son ampliamente utilizados, debido

a que son de bajo costo, altamente eficientes y de fácil limpieza (Colina, 2010).

### 2.3.2. Encapsulantes para el secado por aspersión

Los encapsulantes son polímeros hidrofílicos de alto peso molecular que se usan en el secado por aspersión para proteger componentes alimenticios sensibles frente a condiciones ambientales desfavorables, enmascarar o preservar sabores y aromas, limitar las pérdidas de compuestos volátiles y para reducir problemas de pegajosidad de alimentos ricos en azúcares en la pared del secador (Tonon et al., 2008; Colina, 2010). Entre los encapsulantes utilizados con mayor frecuencia en la industria se encuentran (Colina, 2010):

- Carbohidratos. Almidones, maltodextrinas, celulosas y pectinas.
- Gomas vegetales. Goma arábica, goma guar, goma xantana y carragenina.
- Proteínas. Suero de leche y proteína de soya.

#### 2.3.2.1. Maltodextrinas

Las maltodextrinas constan de unidades de D-glucosa unidas principalmente por enlaces glicosídicos (1-4) y tienen un equivalente de dextrosa (DE) inferior a 20. El DE de las maltodextrinas determina su capacidad de reducción y esta inversamente relacionado con su peso molecular promedio (Kenyon, 1995; Bemiller & Whistler, 1996). Las maltodextrinas ofrecen ventajas como aroma y sabor neutro, buena solubilidad, baja viscosidad a altas concentraciones de sólidos y costo relativamente bajo (Carneiro et al., 2013).

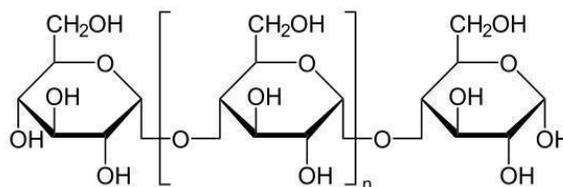


Figura 3. Estructura de la maltodextrina.

### 2.3.2.2. Pectinas

Las pectinas son heteropolisacáridos de alto peso molecular con unidades de  $\alpha$ -(1-4)-D-ácido galacturónico parcialmente metilados interrumpidos por la inserción de algunos residuos de ramnosa. Se obtienen a partir de subproductos de la industrialización de cítricos y manzanas. Su peso molecular depende de la procedencia y procesamiento. Las pectinas son solubles en agua y tienen baja viscosidad comparadas con gomas vegetales (Wandrey et al., 2009; Basu et al., 2013).

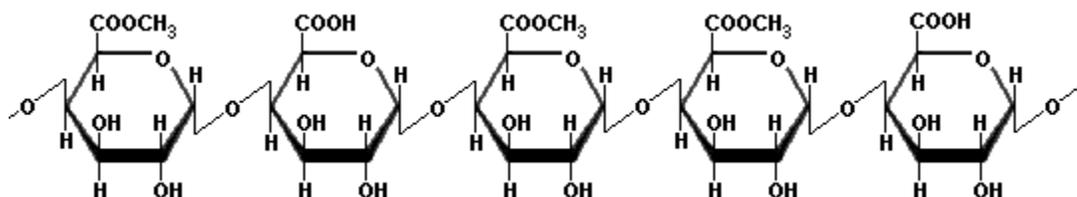


Figura 4. Estructura de la pectina.

### 2.3.3. Cambios físicos del material durante el secado por aspersión

#### Formación del sólido amorfo

La rápida eliminación de agua en los líquidos alimentados durante el secado por aspersión, da lugar a la formación de productos amorfos, o con algunas regiones microcristalinas dispersas en la matriz amorfa (Bhandari et al., 1997b). El estado amorfo o vítreo corresponde a un estado sólido de no equilibrio en el cual las moléculas que forman el material se encuentran organizadas al azar ocupando un volumen mayor que el del estado cristalino (Liu et al., 2006; Abiad et al., 2009).

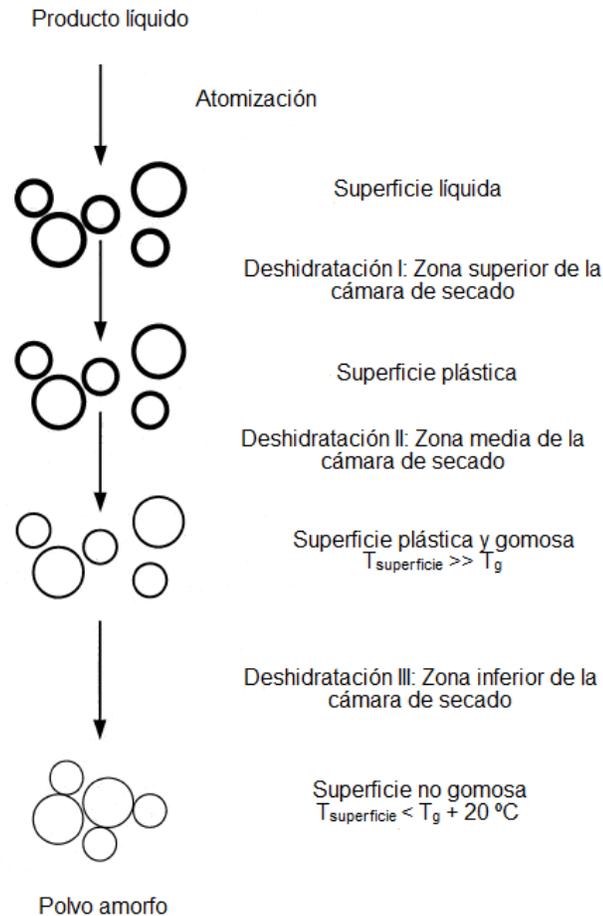


Figura 5. Representación esquemática de los cambios físicos experimentados por las gotas del líquido alimentado durante el secado por aspersión ( $T_g$ =temperatura de transición vítrea,  $T_{\text{superficie}}$ =temperatura de la superficie de la partícula durante el secado) (Modificado de Bhandari et al., 1997b).

En la Figura 5 se muestra como se forma el polvo amorfo durante el secado por aspersión. Inicialmente las gotas son dispersadas individualmente por todo el volumen de la cámara de secado, con una alta probabilidad de que las partículas se aglomeren debido a su alto contenido de humedad. El líquido de la superficie es removido rápidamente (deshidratación I), dando lugar a la formación de una gota más concentrada, la cual presenta plasticidad en la superficie (deshidratación II). Conforme avanza el secado esta superficie plástica va aumentando su temperatura, superando la  $T_g$  de la matriz (Bhandari & Howes, 1999). Este aumento de temperatura se invierte al realizarse un enfriamiento rápido al final del

proceso de secado, dando como resultado un sólido amorfo estable a las condiciones del proceso. En este momento la temperatura de la superficie de la partícula puede alcanzar la temperatura del aire de salida (Bhandari et al., 1997b). Si en las condiciones de secado se sobrepasa la  $T_g$  del sólido amorfo ( $T_g+20$ ), este pasará a estado gomoso perdiendo sus propiedades, resultando en un polvo pegajoso. En la Tabla 1 se presenta el comportamiento de una partícula amorfa en función de los grados que sobrepasa su  $T_g$  durante el secado.

Tabla 1. Comportamiento de una partícula amorfa en función de los grados que sobrepasa su  $T_g$  durante el secado (Bhandari et al., 1997b).

Temperatura por encima de la $T_g$	Características del producto
10	Muestran adhesiones
20	Gomosidad
30-50	Cristalización a temperatura ambiente
>50	Colapso total y fluidez

## 2.4. Caracterización del polvo

### 2.4.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad es la cantidad de agua que contiene un alimento y es expresado normalmente en porcentaje. Matemáticamente, esto es la relación de la masa de agua contenida en el alimento (adsorbente) sobre la masa total del alimento conteniendo la humedad (adsorbato). Sin embargo, también se puede expresar como la relación de masa de agua (adsorbato) dividido por la masa de materia seca (adsorbente). Estas dos formas de expresar el contenido de humedad son conocidas como contenido de humedad en base húmeda ( $X_{bh}$ ) y contenido de humedad en base seca ( $X_{bs}$ ), respectivamente (Tabla 2) (Figura & Teixeira, 2007).

Tabla 2. Contenido de humedad en base húmeda y base seca (Modificado de Figura & Teixeira, 2007).

$X_{bh}$	$X_{bs}$
$X_{bh} = \frac{m_{H_2O}}{m_{total}}$	$X_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{s.s.}}$
$X_{bh} = \frac{m_{H_2O}}{m_{s.s.} + m_{H_2O}}$	$X_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{total} - m_{H_2O}}$
$X_{bh}$ en g H <sub>2</sub> O/g s.h.	$X_{bs}$ en g H <sub>2</sub> O/g s.s.

### 2.4.2. Actividad de agua

La actividad de agua ( $a_w$ ) se define como la relación entre la presión de vapor del agua de un alimento ( $p$ ) y la presión de vapor del agua pura ( $p_o$ ) a la misma temperatura (ecuación 1) (Labuza, 1975). La actividad del agua de un alimento puede ser considerado como la humedad relativa de equilibrio del material alimenticio. Cuando un alimento entra en equilibrio con la atmósfera que lo rodea, la actividad de agua en el alimento es igual a la humedad relativa (HR) de la atmósfera que lo rodea. Una vez alcanzado el equilibrio, el alimento no ganará ni perderá humedad con el tiempo (Figura & Teixeira, 2007). La  $a_w$  se expresa en valores comprendidos entre 0 para un producto totalmente seco y 1 para el agua pura.

$$a_w = \frac{p}{p_o} = \frac{HR}{100} \quad (1)$$

La actividad acuosa juega un papel muy importante en la estabilidad química y en la calidad de un alimento y es un parámetro para controlar el crecimiento microbiano. La actividad de agua es una propiedad intrínseca y se relaciona de manera no lineal con el contenido de humedad mediante la isoterma de adsorción (Badui, 2006).

### 2.4.3. Isotherma de adsorción de humedad

La isoterma de adsorción representa la cinética con la que un alimento absorbe agua y se construye gráficamente relacionando el contenido de humedad en el equilibrio ( $X_{eq}$ ) con la actividad de agua ( $a_w$ ) del alimento, en un intervalo dado y a una temperatura constante (Figura 6) (Basu et al., 2006).

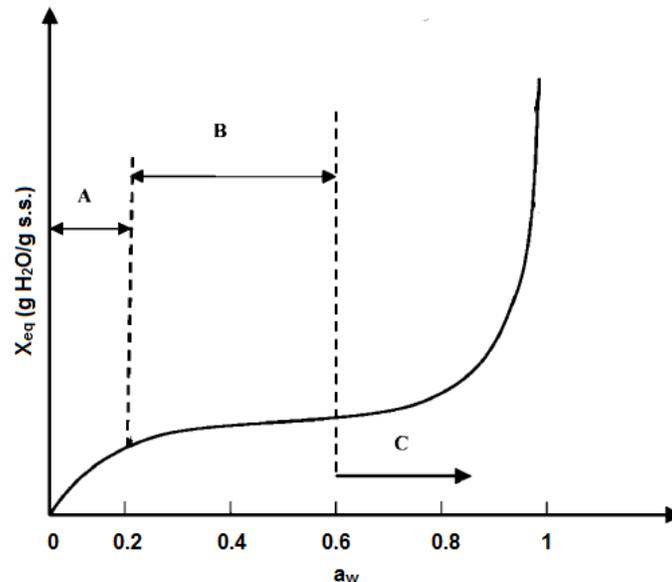


Figura 6. Isotherma de adsorción de humedad (Modificado de Basu et al., 2006).

El conocimiento de la isoterma de adsorción ayuda a predecir la estabilidad del alimento almacenado en distintas condiciones.

El fenómeno de adsorción ocurre en la interfase entre el alimento y la atmósfera que lo rodea (líquido o gas). La velocidad a la que se lleva a cabo este fenómeno depende principalmente de las características físicas y químicas de la interfase (Figura & Teixeira, 2007).

La isoterma se puede dividir en tres intervalos en función de la  $a_w$  para interpretar el grado de interacción del agua con el alimento (Figura 6). El agua en la región A se encuentra fuertemente ligada a grupos hidrofílicos y polares de los componentes del alimento y presenta una entalpía de vaporización

considerablemente mayor que la del agua pura. En la región B, las moléculas de agua se encuentran unidas con menos fuerza que en la zona anterior y la entalpía de vaporización es ligeramente mayor que la requerida por el agua pura. Las propiedades del agua en la zona C son similares a las del agua libre. El agua se encuentra retenida en los capilares y grietas del alimento, y es capaz de actuar como un disolvente (Basu et al., 2006).

### 2.4.3.1. Tipos de isotermas

Brunauer et al. (1940) estableció 5 tipos de isotermas con base en la adsorción de gases de Van der Waals (Figura 7). La isoterma tipo I corresponde normalmente a fenómenos de quimisorción que suceden en una sola capa, en los sitios activos de la superficie. Las isotermas tipo II y III son las más comunes en alimentos no porosos ricos en azúcares. Los tipos IV y V corresponden a isotermas de productos porosos, la meseta de las curvas está asociada a la saturación capilar (Martínez et al., 1998).

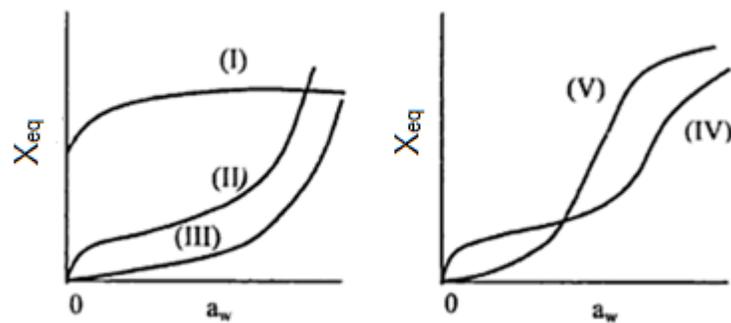


Figura 7. Tipos de isotermas (Modificado de Martínez et al., 1998).

### 2.4.3.2. Modelo de Brunauer-Emmett-Teller (BET)

El modelo de BET (Brunauer et al., 1938) es ampliamente utilizado para caracterizar la adsorción de agua en alimentos en una región de  $a_w$  entre 0.05-0.45 (ecuación 2). Este modelo se ha desarrollado bajo las suposiciones siguientes: la velocidad de condensación sobre la primera capa es igual a la

velocidad de evaporación de la segunda capa y la energía de interacción de todo el adsorbato en la primera capa es la misma (Rizvi, 1986; Basu et al., 2006).

$$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 - a_w + C \cdot a_w)} \quad (2)$$

Donde  $X_{eq}$  es contenido de humedad en el equilibrio en g H<sub>2</sub>O/g s.s.,  $a_w$  es la actividad de agua,  $X_m$  es contenido de humedad de la monocapa en g H<sub>2</sub>O/g s.s. y  $C$  es una constante relacionada con el calor de sorción de la monocapa.

#### 2.4.3.3. Modelo de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)

El modelo de GAB (ecuación 3) es una extensión de los modelos de Langmuir y BET. Este modelo se basa en la suposición de adsorción física localizada en multicapas sin interacciones laterales. La primera capa de agua cubre uniformemente la superficie y se encuentra fuertemente unida en una monocapa. Las capas de agua posteriores tienen menos interacción con la superficie, estas capas son llamadas multicapas. Capas sucesivas presentan propiedades similares a las del agua libre (Van den Berg & Bruin 1981; Van den Berg, 1984; Quirijns et al., 2005b).

$$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)} \quad (3)$$

Donde,  $X_{eq}$  es el contenido de humedad en el equilibrio en g H<sub>2</sub>O/g s.s.,  $X_m$  es el contenido de humedad de la monocapa en g H<sub>2</sub>O/g s.s.,  $C$  es una constante relacionada con el calor de sorción de la monocapa,  $K$  es una constante relacionado con el calor de sorción de la multicapa y  $a_w$  es la actividad de agua.

Los parámetros de este modelo tienen significado físico y los valores que pueden tomar son:  $C \geq 1$ ,  $0 < K < 1$  y  $X_m > 0$  (Quirijns et al., 2005a).  $C$  es una medida de la fuerza de enlace de las moléculas de agua en los sitios activos primarios. Cuanto más grande es el valor de  $C$ , el agua está más fuertemente ligada en la monocapa y más grande es la diferencia de entalpía entre las moléculas de la monocapa y las de la multicapa.  $K$  es nombrado factor de corrección, debido a que corrige las propiedades de las moléculas de agua de la multicapa con respecto a las del agua libre. Cuando  $K$  se acerca a 1, no hay distinción entre las moléculas de la multicapa y las del agua libre. En este caso las moléculas de agua más allá de la monocapa no se estructuran en una multicapa, pero si tienen las mismas características que las moléculas del agua libre; y la ecuación de GAB se reduce a la ecuación de BET. Cuando el valor de  $K$  es bajo, las moléculas de agua adsorbidas se estructuran en una multicapa.  $X_m$  es el valor de la monocapa y mide la disponibilidad de los sitios activos para la adsorción de agua de un material (Quirijns et al., 2005b).

#### 2.4.3.4. Comparación de los modelos BET y GAB

Las isothermas de BET y GAB están estrechamente relacionadas debido a que se derivan del mismo modelo estadístico. El modelo de GAB representa un refinamiento sobre el modelo de BET y comparte con el dos constantes ( $X_m$  y  $C$ ) y debe su versatilidad a la introducción de una tercera constante ( $K$ ). La regresión de los datos experimentales de sorción para cada uno de estos modelos dará dos conjuntos de valores de  $X_m$  y  $C$ . El valor de  $X_m$  dado por la isoterma de BET es siempre menor que el valor de  $X_m$  derivado de GAB y, reversiblemente, el valor de  $C$  dado por BET es siempre mayor que el valor dado por GAB. Se ha demostrado que existen razones matemáticas y físicas para las desigualdades establecidas por la ecuación 4 (Basu et al., 2006).

$$X_{m \text{ BET}} < X_{m \text{ GAB}} \quad C_{\text{BET}} > C_{\text{GAB}} \quad (4)$$

#### 2.4.3.5. Área de superficie del sólido

El área de superficie del sólido (ecuación 5) es el área de superficie total disponible para uniones hidrófilicas y puede ser determinada a partir del contenido de humedad de la monocapa (Cadden, 1988; Cassini et al., 2006).

$$S_A = X_m \cdot \left( \frac{1}{PM_{H_2O}} \right) \cdot N_A \cdot A_{H_2O} = 3.5 \times 10^3 X_m \quad (5)$$

Donde  $S_A$  es la área de superficie del sólido en  $m^2/g$  de sólido,  $X_m$  es el contenido de humedad de la monocapa en g agua/g s.s.,  $PM_{H_2O}$  es el peso molecular del agua (18 g/mol),  $N_A$  es el número de Avogadro ( $6 \times 10^{23}$  moléculas/mol) y  $A_{H_2O}$  es el área de una molécula de agua ( $10.6 \times 10^{-20} m^2$ ).

#### 2.4.4. Temperatura de transición vítrea

La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) se define como el rango de temperatura en el cual un sólido amorfo cambia de un estado vítreo a un estado gomoso. En el estado vítreo, las moléculas presentan un grado de inmovilidad similar al de los sólidos cristalinos, mientras que en estado gomoso la movilidad molecular incrementa drásticamente y el material adquiere propiedades mecánicas viscoelásticas (Martínez et al., 1998).

Se ha observado que el contenido de humedad de un alimento afecta directamente el valor de la  $T_g$  del alimento, a mayor contenido de humedad menor  $T_g$ . El agua es considerada el plastificante universal en los alimentos. El efecto de un plastificante en la transición vítrea puede ser explicado por dos mecanismos: 1) las moléculas del plastificante bloquean las fuerzas atractivas entre las moléculas del material y 2) las moléculas del plastificante incrementan el espacio entre las moléculas del material, ambos mecanismos proveen un volumen libre mayor

(espacio disponible para movimientos moleculares de rotación y traslación) (Attenburrow & Davis, 1993).

El fenómeno de transición vítrea es generalmente caracterizado por un rápido cambio en las propiedades físicas, mecánicas, eléctricas y térmicas de un material (Rahman, 1999). Cuando la temperatura incrementa por encima de la  $T_g$ , muchas de las propiedades físicas del material cambian, incluyendo el aumento del volumen libre, capacidad calorífica, coeficiente de expansión térmico, coeficiente dieléctrico y cambios en las propiedades viscoelásticas (Genin & René, 1995).

La  $T_g$  de materiales amorfos se puede determinar mediante la medición continúa de diversas propiedades físicas como una función de la temperatura. Estas mediciones pueden incluir el volumen específico, la deformación, la conductividad, la elasticidad y propiedades térmicas, se puede determinar el rango de transición vítrea identificando las temperaturas en las que estas propiedades cambian significativamente. Debido a la propiedad medida, los métodos para caracterizar la transición vítrea se pueden clasificar como: calorimétricos, termodinámicos, volumétricos y espectroscópicos. Estos incluyen: calorimetría diferencial de barrido (DSC) y calorimetría diferencial de barrido modulada (MDSC), análisis termomecánico (TMA), análisis dinámico mecánico (DMA), cromatografía de gases inversa (ICG) y resonancia magnética nuclear (NMR) (Abiad et al., 2009).

El método DSC es ampliamente utilizado en alimentos. En este método el flujo de calor es medido como la energía necesaria para mantener una diferencia de temperatura cercana a 0 entre una muestra y un material de referencia inerte. Las dos muestras están sujetas a regímenes de temperatura idénticos en un ambiente refrigerado o calentado (Van der Plaats, 1984; Ma et al., 1990).

El método MDSC es una mejora del método DSC, la resolución y la sensibilidad son mayores para detectar transiciones débiles o cuando dos transiciones ocurren dentro de un mismo rango de temperaturas (Abiad et al., 2009). En este método se aplica un perfil de temperatura (enfriamiento/calentamiento) diferente a la muestra y a la referencia. Una onda sinusoidal se superpone sobre la rampa de temperatura lineal estándar. La velocidad de calentamiento que se aplica a la muestra se controla por tres parámetros experimentales que son: velocidad de calentamiento, amplitud de modulación y frecuencia de modulación. El MDSC facilita la separación de las transiciones reversibles (capacidad calorífica, transición vítrea) y no reversibles (cristalización, evaporación, etc.) (Gill et al., 1993).

#### 2.4.4.1. Modelo de Gordon-Taylor

El modelo de Gordon-Taylor predice la temperatura de transición vítrea de mezclas binarias anhidras y se basa en la suposición de que los dos componentes son miscibles y sus volúmenes libres son aditivos (Gordon & Taylor, 1952).

$$T_g = \frac{(1-x_w) \cdot T_{gs} + k \cdot x_w \cdot T_{gw}}{(1-x_w) + k \cdot x_w} \quad (6)$$

Donde  $T_g$ ,  $T_{gs}$ ,  $T_{gw}$  son la temperatura de transición vítrea (°C) de la mezcla, sólidos anhidros y agua, respectivamente,  $x_w$  es la fracción de masa de agua (g H<sub>2</sub>O/g s.h.) y  $k$  es una constante del modelo.  $T_{gw} = -135$  °C (Johari et al. 1987).

#### 2.4.5. Color

El color es definido como la energía radiante del espectro visible (380 a 770 nm) que detecta la retina humana. Es un atributo importante que refleja el atractivo sensorial y la calidad de los polvos producidos mediante secado por aspersion.

El espacio de color CIELAB ( $L^*a^*b^*$ ) (Figura 8) es actualmente el más recomendado para medir el color en alimentos. En este espacio  $L^*$  denota luminosidad en una escala de 0 (negro) a 100 (blanco); la coordenada  $a^*$ , el color rojo (valores positivos) o verde (valores negativos) y la coordenada  $b^*$ , el color amarillo (valores positivos) o azul (valores negativos) (Sant'Anna et al., 2013).

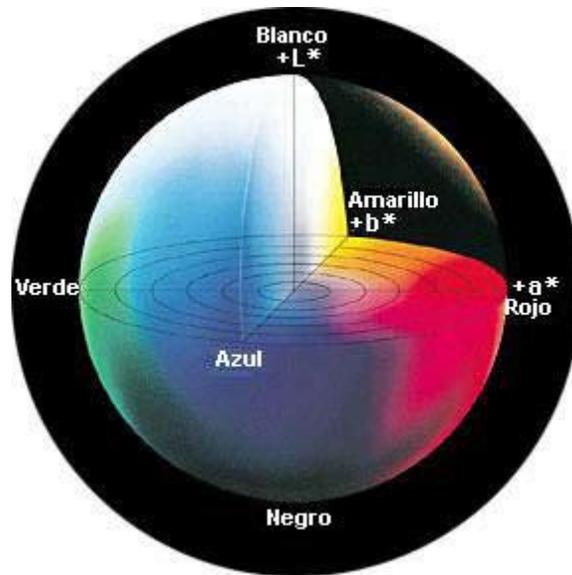


Figura 8. Espacio de color CIELAB (Konica minolta, 2014).

El espacio de color  $L^*C^*h$  utiliza el mismo diagrama que el espacio de color CIELAB, pero en coordenadas cilíndricas. En este espacio  $L^*$  denota luminosidad, croma ( $C^*$ ) es la saturación o viveza de un color y el ángulo de tono ( $h$ ) es el valor en grados que corresponde al diagrama tridimensional de color ( $0^\circ$  para rojo,  $90^\circ$  para amarillo,  $180^\circ$  para verde y  $270^\circ$  para azul). Los valores de  $C^*$  y  $h$  pueden ser calculados con las ecuaciones 7 y 8, respectivamente (Sant'Anna et al., 2013).

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (7)$$

$$h = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (8)$$



### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Materia prima**

En esta investigación se utilizaron frutos de *Stenocereus griseus* (variedad guinda) procedentes del municipio de Huiziltepec, Puebla y adquiridos en la Central de Abastos de la Ciudad de Oaxaca; y frutos de *Stenocereus pruinosus* (variedad guinda, rojo y anaranjado) recolectados en la localidad de Santo Domingo Tianguistengo, Oaxaca. Los frutos se mantuvieron en congelación para conservarlos hasta su utilización.

#### **3.2. Obtención de jugos**

Para la obtención de jugos, los frutos se descongelaron y se lavaron para retirar espinas. Las pitayas se seccionaron a la mitad para retirar la pulpa y clasificarla por especie y variedad. La pulpa se estrujó manualmente sobre un colador casero, el jugo recolectado se filtró en un tamiz metálico (No. 100 para el jugo de pitaya de *S. griseus* y No. 60 para el jugo de pitaya de *S. pruinosus*) para eliminar los restos de materia orgánica y garantizar un buen filtrado. El jugo filtrado se congeló para su conservación.

#### **3.3. Medición de grados brix y sólidos totales en jugos**

Los grados brix se determinaron con un refractómetro manual con compensación de temperatura (RHB-32ATC, Westover). Las mediciones se hicieron por triplicado.

Los sólidos totales se determinaron adaptando la norma mexicana (NMX-F-510-1988) para sólidos totales en leche. La muestra se homogeneizó evitando la formación de espuma; se midieron 2 cm<sup>3</sup> y se depositaron en una cápsula a peso constante, con cama de gasa. La cápsula se colocó en un baño de vapor, hasta

sequedad, posteriormente se transfirió a la estufa y se dejó secar a 98-100 °C durante 3 horas. Transcurrido este tiempo, la cápsula se dejó enfriar en un desecador y se pesó. Las determinaciones se hicieron por triplicado. Los sólidos totales se calcularon con la siguiente ecuación:

$$S_T = \left( \frac{P_2 - P_1}{V} \right) \cdot 1000 \quad (9)$$

Donde  $S_T$  son los sólidos totales en g/L,  $P_2$  es la masa de la cápsula con el residuo seco en g,  $P_1$  es la masa de la cápsula con la cama de gasa en g y  $V$  es el volumen de la muestra en  $\text{cm}^3$ .

### **3.4. Preparación de suspensiones**

Las suspensiones se prepararon con jugo y una mezcla de maltodextrina (13 DE, Cytecsa) y pectina (Cytecsa). La mezcla de encapsulantes se adicionó en un 60 % (40/20 %, maltodextrina/pectina) y 90 % (60/30 %, maltodextrina/pectina) calculado en base a los sólidos totales del jugo (Anexo A). Las suspensiones se homogeneizaron en una licuadora (6640, Osterizer) a la más alta velocidad por 5 minutos y se mantuvieron con agitación magnética (400 rpm) por 1 hr, posteriormente se les determinaron grados brix y sólidos totales.

### **3.5. Secado por aspersión**

Para la obtención de polvos a partir de las suspensiones se utilizó un secador por aspersión escala piloto, en paralelo, (Mobile Minor, Niro-atomizer) (Figura 10) equipado con un atomizador rotatorio (TS-Menor, M02/A).



Figura 10. Secador por aspersión escala piloto.

El secador se alimentó con agua potable en dos ocasiones antes de iniciar una corrida (15 min para su estabilización) y después de finalizar la corrida (10 min). Las suspensiones se mantuvieron en agitación constante (400 rpm) durante el proceso de secado y se alimentaron a temperatura ambiente (25 °C). La velocidad de atomización se mantuvo constante (27,500 rpm). Después de alimentar agua al final de la corrida, el equipo se dejó enfriar, cuando la temperatura del aire de salida ( $T_s$ ) se encontraba alrededor de los 50 °C se abrió la tapa del secador y con la ayuda de un cepillo se removió el producto seco de las paredes y fue arrastrado por el ventilador hasta llegar al frasco colector. El polvo obtenido fue cuantificado, sellado al vacío en una bolsa de polietileno y almacenado en un desecador con sílica-gel hasta su análisis. El polvo producido con jugo de pitaya guinda de *S. griseus* fue identificado como PG y los polvos producidos con jugo de pitaya guinda, roja y anaranjada de *S. pruinosa* se identificaron como OG, OR y OA, respectivamente.

## 3.6. Propiedades físicas de polvos

### 3.6.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad base seca ( $X_{bs}$ ) de todos los polvos se determinó por el método de pérdida de peso con estufa de vacío. Se depositaron  $0.49 \pm 0.04$  g de muestra en una cápsula a peso constante y se introdujeron en una estufa de vacío (1410, VWR Scientific) a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 h a una presión de 2.7 kPa con un desecante (sílica gel) en el interior. El recipiente fue retirado de la estufa y colocado en un desecador antes de pesarlo. El proceso se repitió hasta obtener un peso constante. Las determinaciones se hicieron por duplicado. Los resultados fueron expresados en %.

### 3.6.2. Rendimiento

El rendimiento de polvos se determinó con la siguiente ecuación (García-Cruz et al., 2013):

$$y = \frac{P_p - X_{bh} \cdot P_p}{V_M \cdot S_T} \cdot 100 \quad (10)$$

Donde  $y$  es el rendimiento en %,  $P_p$  es el peso del polvo en g,  $X_{bh}$  es el contenido de humedad del polvo en base húmeda,  $V_M$  es el volumen alimentado de muestra (suspensión) en L y  $S_T$  son los sólidos totales en g/L.

### 3.6.3. Color

El color de todos los polvos se determinó utilizando un colorímetro MiniScan EZ (HunterLab), empleando el iluminante D65 (luz de día), el ángulo de observación de  $10^{\circ}$  y el espacio de color CIELAB ( $L^*a^*b^*$ ). Las mediciones se realizaron por triplicado. El ángulo de tono ( $h$ ) y croma ( $C^*$ ) se calcularon usando las ecuaciones 7 y 8, respectivamente.

### 3.6.4. Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción se determinaron mediante el método dinámico de vapor de sorción usando un VTI-SA+ (TA Instruments). Los polvos PG (tratamiento P1-P8), OG (tratamientos P3, P7 y P8) y OA (tratamiento P3 y P7) se depositaron en viales de color ámbar y se colocaron en un microclima que contenía  $P_2O_5$  para equilibrarlos a una humedad relativa de 0 %. El VTI-SA+ se calibró usando NaCl y PVP. La presión del aire extra seco en la entrada del equipo fue de 20 psi y el flujo de aire en la microbalanza se mantuvo a 80 cc/min. La tara de la microbalanza se realizó cuando las válvulas DRY y SAMPLE fueron abiertas (el peso se mantuvo estable en un rango  $\pm 0.0002$  mg). Se colocaron  $7.55 \pm 0.04$  g de muestra en la canastilla de aluminio correspondiente y las condiciones introducidas al software del equipo para la obtención de las isotermas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Condiciones utilizadas para la obtención de isotermas de adsorción.

Secado		
Temperatura	25 °C	
Rapidez de calentamiento	2 °C/min	
Criterio de equilibrio	0.005 % peso en 4 min	
Máximo tiempo de secado	60 min	
Isotermas de adsorción		
Temperatura	25 °C	
Tiempo de paso de secado a isoterma	Esperar HR	
Criterio de equilibrio	0.001 % peso en 5 min	0.005 % peso en 4 min
Máximo tiempo de equilibrio	600 min	
Pasos de humedad relativa	5, 10, 15, 20, 25, 30 %	40, 50 60, 70, 80 %

### 3.6.5. Temperatura de transición vítrea

Los polvos PG (tratamiento P1-P8), OG (tratamientos P3, P7 y P8) y OA (tratamiento P3 y P7) se equilibraron en desecadores que contenían soluciones salinas saturadas con diferente  $a_w$  (LiCl: 0.11,  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ : 0.33,  $K_2CO_3$ : 0.43 y

Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>: 0.53) a 25 °C para después determinarles la temperatura de transición vítrea (T<sub>g</sub>).

La T<sub>g</sub> de polvos PG se determinó usando un MDSC (Q2000, TA Instruments) y el software Universal Analysis 2000 versión 4.5A (TA Instruments). 9.8 ± 3.1 mg de muestras fueron colocados en celdas de aluminio y sellados herméticamente. Se utilizó una celda vacía como referencia. El escaneo consistió en mantener la celda a -40 °C por 10 min seguido de un calentamiento hasta 120 °C a una velocidad de 2 °C/min con una modulación de ± 1.272 °C cada 60 s. Las determinaciones se realizaron por duplicado. La T<sub>g</sub> fue tomada como el punto medio de la transición.

La T<sub>g</sub> de polvos OG y OA se determinó en un DSC (Diamond, Perkin Elmer). 9.5 ± 0.9 mg de muestras fueron sellados herméticamente en celdas de aluminio. Como referencia se utilizó una celda vacía. Las pruebas se realizaron manteniendo la celda a -40 °C por 10 min seguido de un calentamiento hasta 80 °C a una velocidad de 10 °C/min. La T<sub>g</sub> fue tomada como el punto medio de la transición.

### **3.6.6. Morfología de las partículas**

La morfología del polvo PG tratamiento P3 fue evaluada usando un microscopio electrónico de barrido (SEM) Nova NanoSEM 200 (FEI). El polvo fue recubierto con platino en un recubridor de pulverización catódica 208 HR (Cressington Scientific Instruments). El SEM se operó a un voltaje de aceleración de 5 kV y a una amplificación de 1200x.

La morfología de polvos OG (tratamientos P1 - P8), OR (tratamiento P3) y OA (tratamiento P3) se analizó en un SEM JSM-7800F (JEOL). Las muestras se fijaron sobre un portamuestra de aluminio usando una cinta conductiva de carbón

doble cara adhesiva. El SEM se operó a un voltaje de aceleración de 1 kV y a una amplificación de 500x.

### 3.7. Diseño experimental y análisis de datos

En este estudio se utilizó para el secado por aspersión un diseño factorial  $2^3$  (Tabla 4) para analizar el efecto por separado y combinado de los siguientes factores: temperatura del aire de entrada ( $T_e$ ), velocidad de flujo de alimentación ( $F_a$ ) y % de encapsulantes ( $E_{m/p}$ ) en el rendimiento, contenido de humedad y color de polvos. Las pruebas de secado se realizaron por duplicado. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) en el software NCSS 2007 versión 7.1.20 (Hintze, J., Kaysville, Utah, USA).

Tabla 4. Diseño experimental.

Tratamiento	$T_e$ (°C)	$F_a$ (L/h)	$E_{m/p}$ (%)
P1	150	1.5	60
P2	180	1.5	60
P3	150	2.0	60
P4	180	2.0	60
P5	150	1.5	90
P6	180	1.5	90
P7	150	2.0	90
P8	180	2.0	90

Los datos experimentales de las isotermas de adsorción en el intervalo de  $a_w$  de 0.05-0.80 se ajustaron al modelo de GAB (ecuación 3) y en el intervalo de  $a_w$  de 0.05-0.40 se ajustaron al modelo de BET (ecuación 2) con una regresión no lineal usando la herramienta Solver de Microsoft Excel. Los valores iniciales de los parámetros del modelo de GAB introducidos en el software ( $C \geq 1$  y  $K \leq 1$ ) se delimitaron de acuerdo a su sentido físico (Quirijns et al., 2005a) y el valor inicial de  $C$  ( $\geq 1.01$ ) en el modelo de BET se delimitó de acuerdo a los valores finales obtenidos para GAB. El área de superficie del sólido fue determinada a partir del contenido de humedad de la monocapa ( $X_m$ ) (ecuación 4). La calidad del ajuste de

los modelos se evaluó con el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), suma de cuadrados residual (RSS) (ecuación 11) y error estándar (SE) (ecuación 12).

$$RSS = \sum_{i=1}^n (M - M_{Cal})^2 \quad (11)$$

Donde M es el valor medido experimentalmente,  $M_{Cal}$  es el valor estimado a través de la ecuación de ajuste y n es el número de datos experimentales.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M - M_{Cal})^2}{df}} \quad (12)$$

Donde df representa los grados de libertad de la ecuación ajustada.

Los datos experimentales de  $T_g$  y contenido de humedad (obtenidos a partir de las isothermas de adsorción, Tablas I.2 y I.4) se ajustaron al modelo de Gordon-Taylor (ecuación 5) con una regresión no lineal usando la herramienta Solver de Microsoft Excel. La calidad del ajuste del modelo se evaluó con el coeficiente de correlación ( $R^2$ ).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Grados brix y sólidos totales de jugos y suspensiones

En la Tabla 5 se presentan los valores promedio y desviación estándar de grados brix y sólidos totales ( $S_T$ ) de jugos de pitaya y suspensiones (jugo + mezcla de encapsulantes). Los valores de grados brix obtenidos en jugos de pitaya de ambas especies son mayores a los reportados por Ayala & Beltran (2007) y García-Cruz et al. (2013); por lo tanto, presentan una mayor cantidad de azúcares. Los  $S_T$  en jugos fueron determinados para calcular la cantidad de mezcla encapsulante que se adiciona al jugo antes de ser sometido a secado y los  $S_T$  en suspensiones se determinaron para calcular el rendimiento de secado. Se observa en la Tabla 5 un incremento significativo de la cantidad de  $S_T$  cuando se adicionan encapsulantes a los jugos de pitaya.

Tabla 5. Grados brix y sólidos totales de jugos y suspensiones.

Especie	Muestra	Grados brix	$S_T$ (g/L)
<i>S. griseus</i>	Jugo guinda	10.2 ± 0.2	87.55 ± 2.33
	Suspensión 60 %	14.6 ± 0.2	136.65 ± 2.88
	Suspensión 90 %	17.0 ± 0.2	167.40 ± 2.90
<i>S. pruinosa</i>	Jugo guinda	11.0 ± 0.2	94.87 ± 1.96
	Suspensión 60 %	15.6 ± 0.2	153.15 ± 2.05
	Suspensión 90 %	17.6 ± 0.2	177.22 ± 4.25
	Jugo rojo	10.4 ± 0.2	87.67 ± 0.94
	Suspensión 60 %	14.7 ± 0.2	134.02 ± 2.43
	Suspensión 90 %	16.7 ± 0.2	159.23 ± 4.60
	Jugo anaranjado	11.6 ± 0.2	101.47 ± 1.20
	Suspensión 60 %	16.4 ± 0.2	158.98 ± 2.80
	Suspensión 90 %	18.4 ± 0.2	183.92 ± 3.88

## 4.2. Efecto de las condiciones del proceso de secado en las propiedades físicas de polvos

### 4.2.1. Efecto en el rendimiento

El rendimiento de polvos se encontró entre 58.99 y 73.20 % (Tabla 6). Bhandari et al. (1997a) consideraron como criterio para un secado por aspersion eficiente un 50 % de producto recuperado (muestras recolectadas durante el secado y barridas de la pared del secador). En base a este criterio los resultados obtenidos en esta investigación se consideran satisfactorios.

Estadísticamente se encontró un efecto significativo ( $\alpha=0.05$ ) del  $E_{m/p}$  sobre el rendimiento de todos los polvos (PG, OG, OR y OA),  $F_a$  fue significativo para los polvos PG, mientras que la combinación de los factores  $T_e - E_{m/p}$  y  $F_a - E_{m/p}$  fue significativa para los polvos PG y la combinación  $T_e - F_a$  para polvos OG (Tablas G.1 a G.4).

Tabla 6. Rendimiento de polvos.

Tratamiento	y (%)			
	PG	OG	OR	OA
P1	59.41 ± 0.97	68.23 ± 3.20	64.32 ± 4.41	64.65 ± 4.09
P2	62.43 ± 0.19	60.99 ± 0.98	60.83 ± 0.09	61.82 ± 2.77
P3	59.94 ± 2.80	60.75 ± 1.97	59.97 ± 1.53	62.84 ± 1.32
P4	61.98 ± 0.48	60.96 ± 2.55	63.81 ± 3.06	62.26 ± 1.74
P5	67.32 ± 2.35	69.95 ± 2.78	71.37 ± 4.54	72.78 ± 0.17
P6	64.04 ± 0.55	66.62 ± 1.09	69.27 ± 1.99	69.06 ± 3.61
P7	64.21 ± 1.04	66.37 ± 2.09	72.95 ± 2.65	73.20 ± 1.02
P8	58.99 ± 1.26	69.99 ± 1.84	71.21 ± 6.70	68.94 ± 4.96

Mayores rendimientos de todos los polvos (PG, OG, OR y OA) se obtuvieron con  $E_{m/p}$  alto (Figura 11). Este comportamiento se atribuye a que un incremento del  $E_{m/p}$  aumenta los sólidos en la alimentación y mejora el rendimiento. Resultados similares fueron reportados por Papadakis et al. (2006),

Quek et al. (2007) y Fazaeli et al. (2012) estudiando el secado por aspersión de jugo de pasa, jugo de sandía y jugo de mora negra, respectivamente. Sin embargo, Tonon et al. (2008) observaron que un incremento en la concentración del encapsulante (maltodextrina) disminuye el rendimiento de polvos de acai.

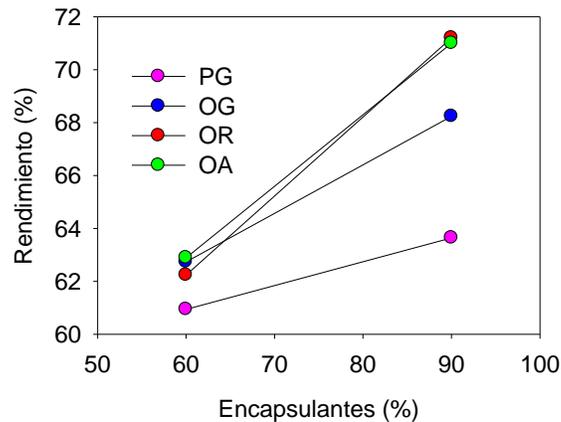


Figura 11. Efecto de  $E_{m/p}$  sobre el rendimiento de polvos.

El mayor rendimiento de polvos PG se obtuvo con una  $T_e$  y  $F_a$  bajas y  $E_{m/p}$  alto (Figura 12). Altos rendimientos en polvos OG se obtuvieron a  $T_e$  y  $F_a$  bajas (Figura 13).  $T_e$  bajas disminuyen los cambios en la estructura y estado termoplástico del material reduciendo la adherencia de los polvos en la pared del secador (Goula & Adamopoulos, 2005a; Chegini & Ghobadian, 2007). Comportamientos similares fueron observados por Chegini & Ghobadian (2007), León-Martínez et al. (2010), Şahin et al. (2011) y Lee et al. (2013) estudiando el secado por aspersión de jugo de naranja, mucilago de nopal, te de montaña y jugo de pitahaya roja, respectivamente.  $F_a$  bajas incrementan el rendimiento debido a que la cantidad de fluido que se atomiza es menor y se produce una mayor transferencia de masa y calor, resultando en un secado eficiente (Chegini & Ghobadian, 2007). Resultados similares fueron obtenidos por Tonon et al. (2008) en polvos de pulpa de acai.

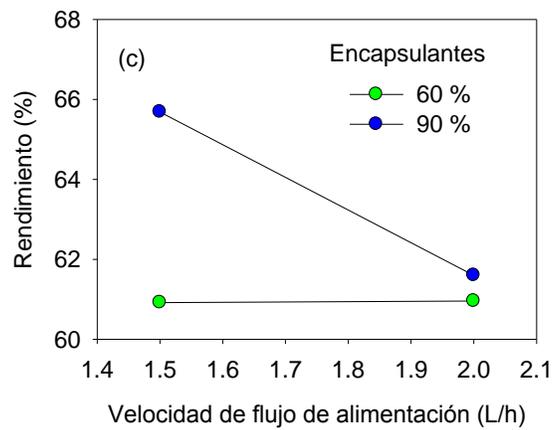
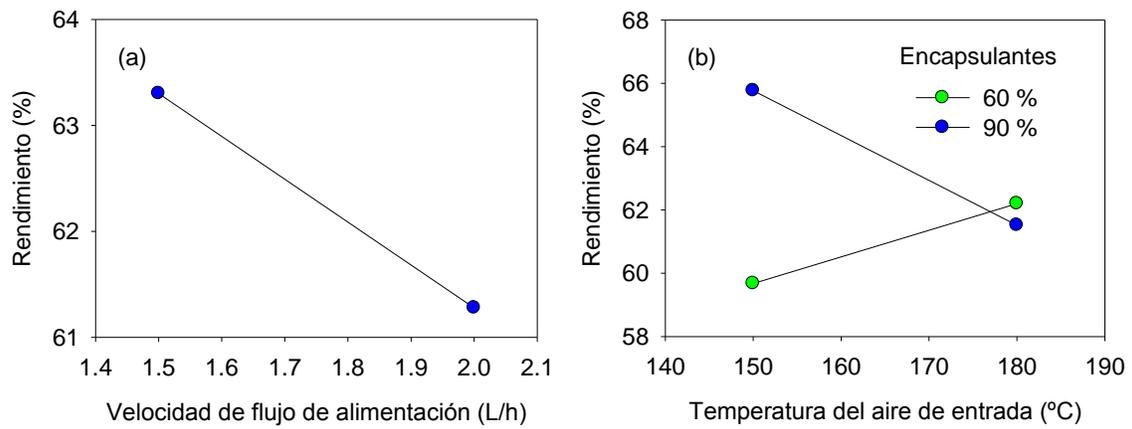


Figura 12. Efecto de las condiciones de secado en el rendimiento de polvos PG, (a) Efecto de  $F_a$ , (b) Efecto de  $T_e - E_{m/p}$  y (c) Efecto de  $F_a - E_{m/p}$ .

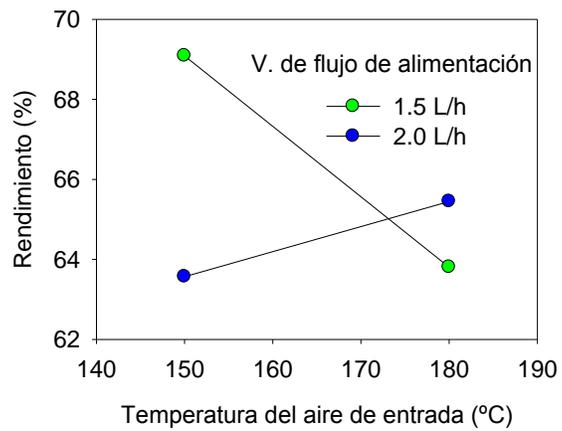


Figura 13. Efecto de  $T_e - F_a$  en el rendimiento de polvos OG.

#### 4.2.2. Efecto en el contenido de humedad

El contenido de humedad de todos los polvos es menor al 4 % (Tabla 7), esto garantiza la estabilidad del producto. El contenido de humedad de todos los polvos fue afectado significativamente ( $\alpha = 0.05$ ) por  $T_e$ ,  $F_a$  y  $E_{m/p}$ , mientras que la combinación de los factores  $F_e - E_{m/p}$  fue significativa para los polvos OG, OR y OA (Tablas G.5 a G.8).

Tabla 7. Contenido de humedad de polvos.

Tratamiento	$X_{bs}$ (%)			
	PG	OG	OR	OA
P1	3.47 ± 0.17	3.24 ± 0.14	3.87 ± 0.41	3.62 ± 0.31
P2	2.98 ± 0.33	2.63 ± 0.34	2.83 ± 0.37	3.44 ± 0.15
P3	3.98 ± 0.31	3.43 ± 0.37	4.88 ± 0.37	4.24 ± 0.12
P4	3.44 ± 0.21	2.81 ± 0.39	3.58 ± 0.48	3.57 ± 0.19
P5	3.33 ± 0.39	2.85 ± 0.36	3.66 ± 0.25	3.40 ± 0.14
P6	2.74 ± 0.16	2.05 ± 0.24	2.52 ± 0.12	2.83 ± 0.27
P7	3.42 ± 0.31	3.41 ± 0.34	3.73 ± 0.12	3.44 ± 0.32
P8	2.95 ± 0.37	2.79 ± 0.17	3.14 ± 0.33	2.88 ± 0.24

Los resultados muestran que el contenido de humedad de todos los polvos decrece con un incremento de  $T_e$  (Figura 14). Cuando  $T_e$  es alta, se genera un mayor gradiente de temperatura entre la alimentación atomizada y el aire secante, resultando en una mayor fuerza impulsora para evaporar el agua produciendo polvos con bajo contenido de humedad (Tonon et al., 2008). Goula & Adamopoulos (2005b), Grabowski et al. (2006), Obon et al. (2009) y Ferrari et al. (2012) reportaron que el contenido de humedad de polvos de jugo de tomate, polvos de puré de camote, polvos de jugo de tuna y polvos de jugo de zarzamora, respectivamente, decrece al incrementar  $T_e$ .

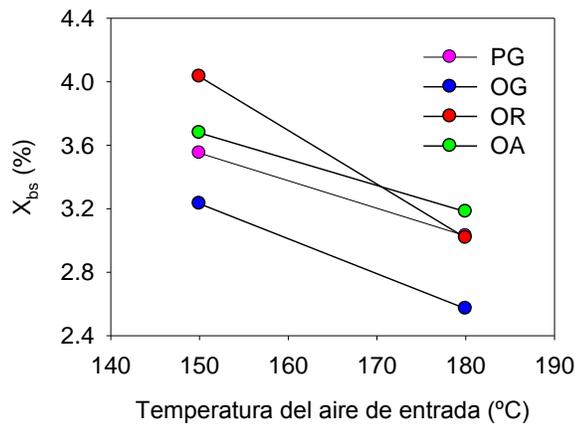


Figura 14. Efecto de  $T_e$  sobre  $X_{bs}$  (%) de polvos.

En este estudio se observó que cuando  $F_a$  decrece se reduce el contenido de humedad de todos los polvos (Figura 15). Valores bajos de  $F_a$  aumentan el tiempo de contacto entre la partícula y el aire de secado, ocasionando una mayor eficiencia en la transferencia de calor y dando como resultado una alta evaporación del agua (Tonon et al., 2008). Estos resultados son congruentes con los obtenidos en polvos de mucilago de nopal (León-Martínez et al., 2010) y polvos de jugo de pitahaya roja (Yunus et al., 2011).

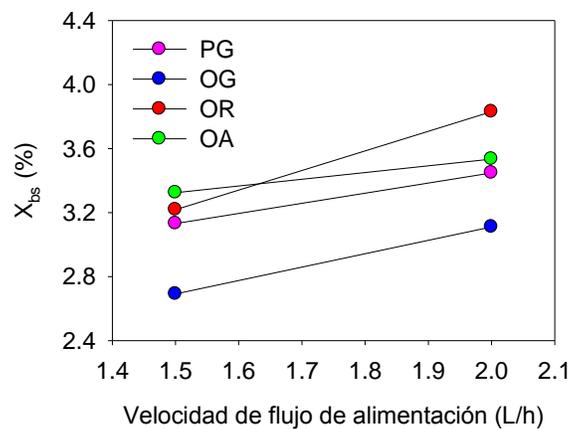


Figura 15. Efecto de  $F_a$  sobre  $X_{bs}$  (%) de polvos.

Los resultados muestran que un incremento del  $E_{m/p}$  disminuye el contenido de humedad de todos los polvos (Figura 16), debido a que se aumenta la cantidad

de sólidos presentes en la alimentación y se reduce la cantidad de agua a evaporar. Abadio et al. (2004), Quek et al. (2007), Kha et al. (2010) y Fazaeli et al. (2012) observaron el mismo comportamiento en polvos de jugo de piña, polvos de jugo de sandía, polvos de jugo de Gac y polvos de jugo de mora negra, respectivamente.

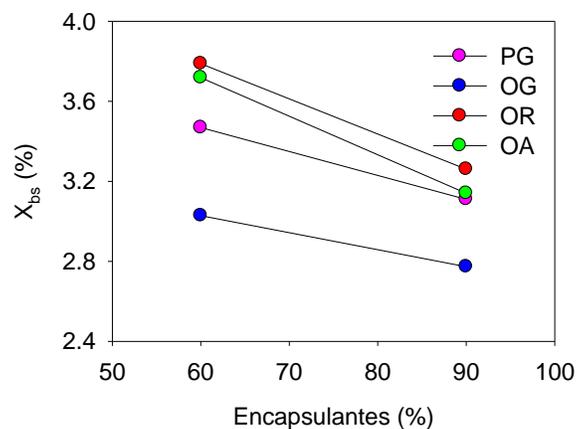


Figura 16. Efecto de  $E_{m/p}$  sobre  $X_{bs}$  (%) de polvos.

#### 4.2.3. Efecto en el color

Los valores de color de todos los polvos se muestran en las Tablas 8 a 11. En polvos PG,  $L^*$  fue afectada significativamente ( $\alpha = 0.05$ ) por  $T_e$  y  $F_a$  y por la combinación  $T_e - E_{m/p}$  mientras que  $h$  fue afectado significativamente por  $T_e$ ,  $F_a$  y  $E_{m/p}$  y por las combinaciones  $T_e - F_a$ ,  $T_e - E_{m/p}$  y  $F_a - E_{m/p}$ . En  $C^*$  los efectos principales  $T_e$  y  $E_{m/p}$  y las combinaciones  $T_e - F_a$  y  $F_a - E_{m/p}$  mostraron efectos significativos ( $\alpha = 0.05$ ) (Tablas G.9 a G.11).

En polvos OG,  $L^*$  y  $h$  fueron afectados significativamente ( $\alpha = 0.05$ ) por  $T_e$ ,  $F_a$  y  $E_{m/p}$  y por la combinación  $T_e - E_{m/p}$  para el caso de  $L^*$  y por las combinaciones  $T_e - F_a$  y  $T_e - E_{m/p}$  en el caso de  $h$ . En  $C^*$  los efectos principales  $T_e$  y  $E_{m/p}$  y la combinación de ambos mostraron efectos significativos ( $\alpha = 0.05$ ) (Tablas G.12 a G.14).

En polvos OR,  $L^*$  fue afectada significativamente ( $\alpha=0.05$ ) por  $T_e$ ,  $F_a$  y  $E_{m/p}$  y por la combinación  $F_a - E_{m/p}$  mientras que  $h$  fue afectado significativamente por  $T_e$  y  $F_a$  y por las combinaciones  $T_e - F_a$  y  $T_e - E_{m/p}$ . En  $C^*$  los efectos principales  $F_a$  y  $E_{m/p}$  y la combinación  $T_e - F_a$  mostraron efectos significativos ( $\alpha=0.05$ ) (Tablas G.15 a G.17).

En polvos OA,  $L^*$  y  $h$  fueron afectados significativamente ( $\alpha=0.05$ ) por  $T_e$  y  $F_a$  y por la combinación de ambos para el caso de  $L^*$  y por las combinaciones  $T_e - E_{m/p}$  y  $F_a - E_{m/p}$  en el caso de  $h$ . En  $C^*$  los efectos principales  $T_e$ ,  $F_a$  y  $E_{m/p}$  y la combinación  $T_e - E_{m/p}$  mostraron efectos significativos ( $\alpha=0.05$ ) (Tablas G.18 a G.20).

Tabla 8. Valores de color de polvos PG.

Tratamiento	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$h$ ( $^\circ$ )	$C^*$
P1	39.52 $\pm$ 0.19	44.19 $\pm$ 0.34	11.31 $\pm$ 0.13	14.36 $\pm$ 0.06	45.61 $\pm$ 0.36
P2	42.35 $\pm$ 0.85	41.70 $\pm$ 1.27	20.61 $\pm$ 2.85	26.29 $\pm$ 3.84	46.60 $\pm$ 0.13
P3	39.24 $\pm$ 0.70	44.56 $\pm$ 0.17	10.24 $\pm$ 0.38	12.94 $\pm$ 0.48	45.73 $\pm$ 0.17
P4	40.79 $\pm$ 0.36	43.50 $\pm$ 0.17	15.24 $\pm$ 0.60	19.31 $\pm$ 0.77	46.10 $\pm$ 0.06
P5	41.05 $\pm$ 1.64	42.68 $\pm$ 0.49	11.49 $\pm$ 0.12	15.07 $\pm$ 0.32	44.20 $\pm$ 0.44
P6	41.35 $\pm$ 0.46	42.17 $\pm$ 0.61	14.94 $\pm$ 0.39	19.50 $\pm$ 0.21	44.74 $\pm$ 0.71
P7	39.38 $\pm$ 0.36	43.26 $\pm$ 0.19	11.28 $\pm$ 0.09	14.61 $\pm$ 0.05	44.71 $\pm$ 0.20
P8	39.70 $\pm$ 1.38	43.05 $\pm$ 0.47	12.10 $\pm$ 0.78	15.70 $\pm$ 1.12	44.72 $\pm$ 0.26

Tabla 9. Valores de color de polvos OG.

Tratamiento	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$h$ ( $^\circ$ )	$C^*$
P1	35.39 $\pm$ 0.25	44.76 $\pm$ 1.13	17.22 $\pm$ 0.48	21.06 $\pm$ 1.02	47.97 $\pm$ 0.89
P2	34.50 $\pm$ 0.44	42.09 $\pm$ 0.23	19.88 $\pm$ 0.24	25.28 $\pm$ 0.33	46.55 $\pm$ 0.20
P3	35.08 $\pm$ 0.34	44.99 $\pm$ 0.27	16.21 $\pm$ 0.62	19.82 $\pm$ 0.78	47.83 $\pm$ 0.17
P4	34.61 $\pm$ 0.71	42.80 $\pm$ 0.57	18.26 $\pm$ 0.43	23.11 $\pm$ 0.75	46.54 $\pm$ 0.37
P5	35.80 $\pm$ 0.27	43.69 $\pm$ 0.36	17.71 $\pm$ 0.09	22.07 $\pm$ 0.14	47.14 $\pm$ 0.35
P6	37.95 $\pm$ 0.73	40.12 $\pm$ 0.78	23.53 $\pm$ 1.86	30.38 $\pm$ 2.43	46.55 $\pm$ 0.39
P7	35.75 $\pm$ 0.37	43.97 $\pm$ 0.22	17.64 $\pm$ 0.43	21.86 $\pm$ 0.51	47.37 $\pm$ 0.23
P8	36.70 $\pm$ 1.19	42.29 $\pm$ 1.27	19.36 $\pm$ 1.16	24.62 $\pm$ 1.94	46.54 $\pm$ 0.68

Tabla 10. Valores de color de polvos OR.

Tratamiento	L*	a*	b*	h (°)	C*
P1	40.21 ± 0.15	42.58 ± 0.26	21.98 ± 0.06	27.30 ± 0.11	47.91 ± 0.25
P2	42.02 ± 0.36	37.02 ± 1.83	32.21 ± 5.11	40.83 ± 5.89	49.29 ± 1.97
P3	39.14 ± 1.15	42.68 ± 0.53	22.42 ± 0.66	27.70 ± 0.41	48.21 ± 0.78
P4	39.86 ± 0.84	40.60 ± 0.13	23.22 ± 0.20	29.76 ± 0.14	46.77 ± 0.21
P5	41.37 ± 0.25	40.76 ± 0.41	23.05 ± 0.32	29.49 ± 0.10	46.83 ± 0.52
P6	42.32 ± 0.76	37.17 ± 0.09	28.13 ± 0.55	37.11 ± 0.51	46.61 ± 0.38
P7	41.29 ± 0.68	40.93 ± 0.17	22.88 ± 0.17	29.20 ± 0.27	46.89 ± 0.11
P8	41.91 ± 0.36	39.05 ± 0.48	23.83 ± 0.33	31.39 ± 0.62	45.75 ± 0.30

Tabla 11. Valores de color de polvos OA.

Tratamiento	L*	a*	b*	h (°)	C*
P1	64.28 ± 0.18	22.88 ± 0.15	62.44 ± 0.62	69.88 ± 0.09	66.50 ± 0.63
P2	61.16 ± 1.42	20.58 ± 0.64	62.11 ± 0.95	71.67 ± 0.27	65.43 ± 1.10
P3	63.68 ± 0.43	25.00 ± 0.53	63.00 ± 1.08	68.35 ± 0.73	67.78 ± 0.84
P4	63.09 ± 0.64	22.83 ± 0.46	62.70 ± 0.71	69.99 ± 0.56	66.72 ± 0.54
P5	63.46 ± 0.76	24.07 ± 0.73	62.11 ± 0.32	68.82 ± 0.60	66.61 ± 0.39
P6	61.05 ± 1.07	19.52 ± 1.24	59.67 ± 0.11	71.89 ± 1.07	62.79 ± 0.41
P7	63.29 ± 0.29	24.53 ± 0.47	62.68 ± 1.00	68.62 ± 0.08	67.31 ± 1.10
P8	63.51 ± 0.24	20.08 ± 0.87	60.23 ± 0.14	71.57 ± 0.72	63.49 ± 0.38

En polvos OG y OR un valor alto de L\* se observó a T<sub>e</sub> alta, F<sub>a</sub> baja y E<sub>m/p</sub> alto (Figuras 17 y 18). Al emplear una T<sub>e</sub> alta probablemente se provocó una pérdida de color por la degradación de las betalaínas (pigmentos presentes en los jugos de pitaya) dando como resultado polvos menos oscuros. Un comportamiento similar fue observado por Sousa et al. (2008) en polvos de tomate. Un E<sub>m/p</sub> alto aumentó L\*, esto se atribuye a un efecto de dilución causado por la adición de encapsulantes a los jugos de pitaya, resultando en una disminución del color (Ferrari et al., 2012). Este resultado también fue observado en polvos de puré de camote y jugo de Gac obtenidos mediante secado por aspersión (Grabowski et al., 2006; Ahmed et al., 2010; Kha et al., 2010). En polvos PG un valor mayor de L\* se obtuvo a T<sub>e</sub> alta, F<sub>a</sub> y E<sub>m/p</sub> bajos (Figura 19) y en polvos OA a T<sub>e</sub> y F<sub>a</sub> bajas (Figura 20).

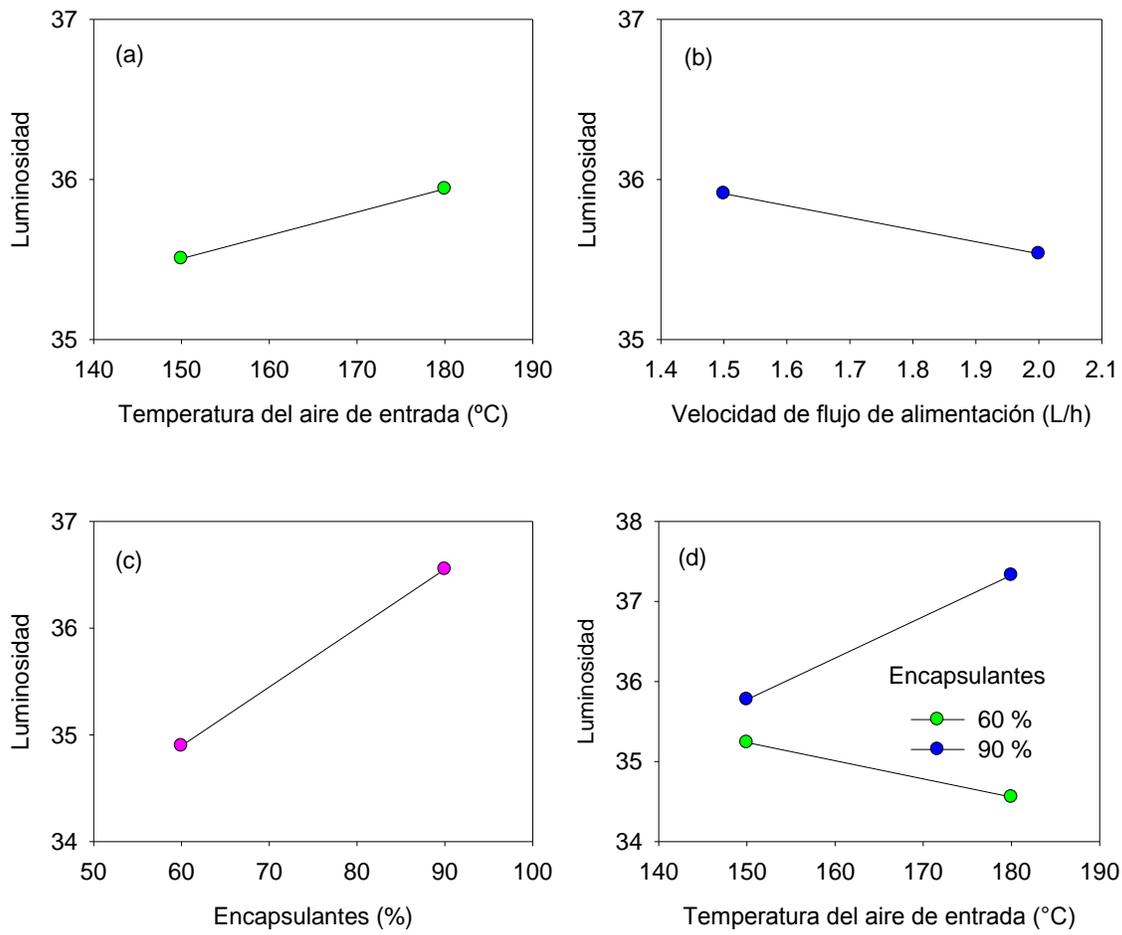


Figura 17. Efecto de las condiciones de secado sobre  $L^*$  de polvos OG, (a) Efecto de  $T_e$ , (b) Efecto de  $F_a$ , c) Efecto de  $E_{m/p}$  y d) Efecto de  $T_e - E_{m/p}$ .

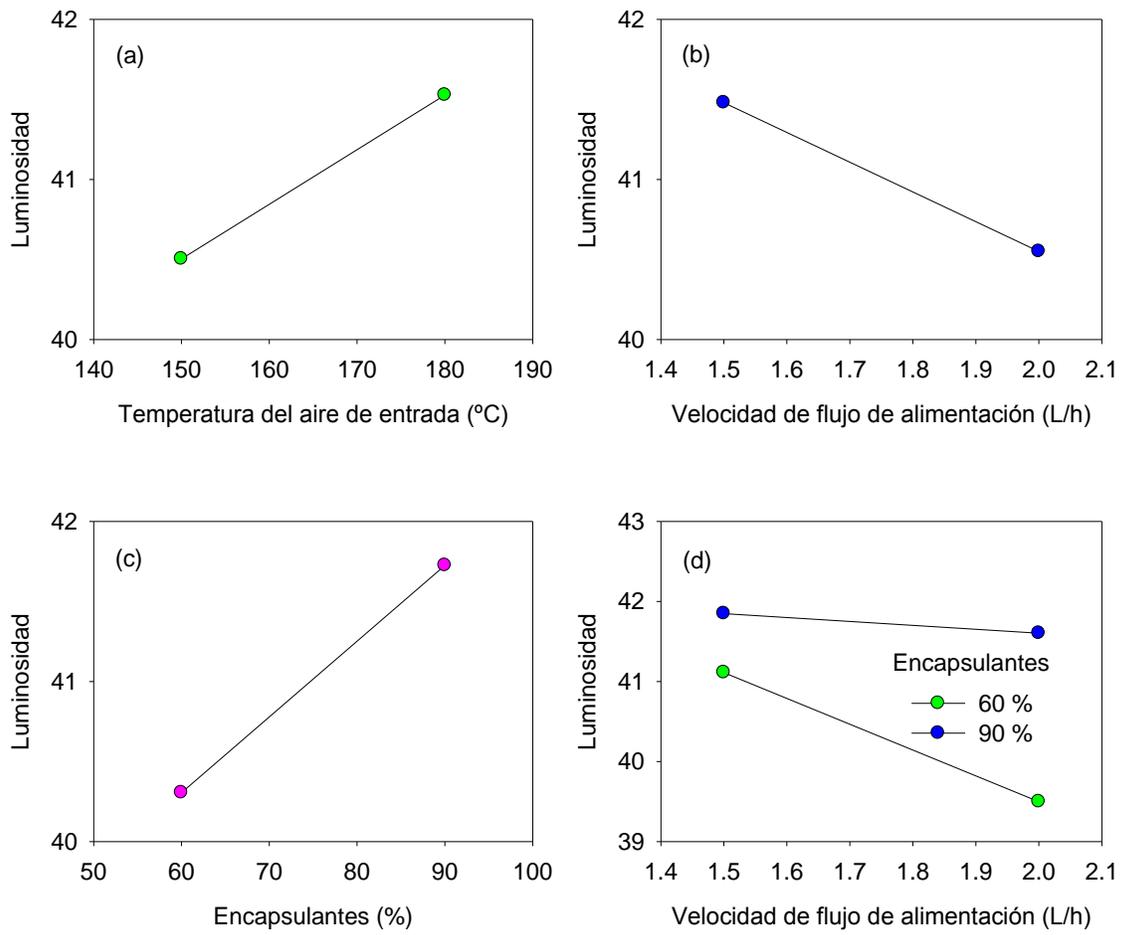


Figura 18. Efecto de las condiciones de secado sobre  $L^*$  de polvos OR, (a) Efecto de  $T_e$ , (b) Efecto de  $F_a$ , c) Efecto de  $E_{m/p}$  y d) Efecto de  $F_a - E_{m/p}$ .

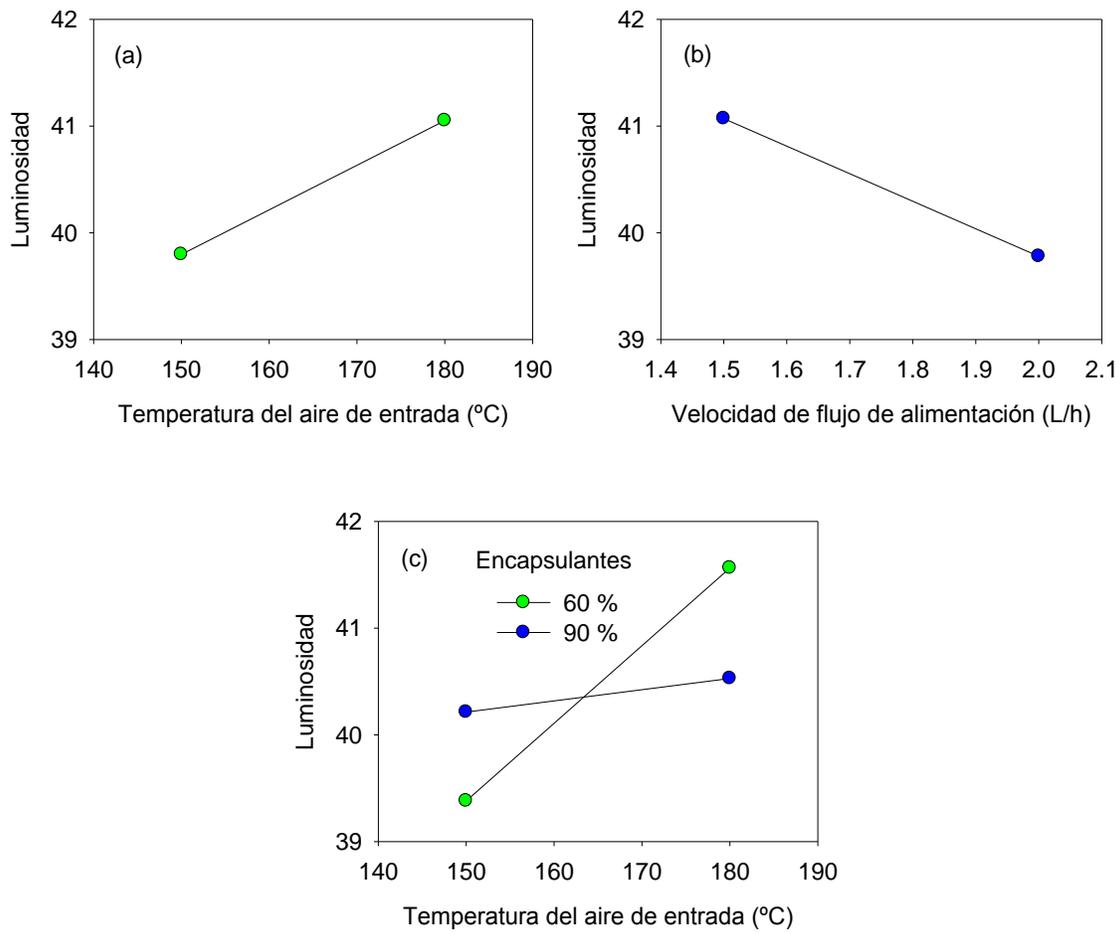


Figura 19. Efecto de las condiciones de secado sobre  $L^*$  de polvos PG, (a) Efecto de  $T_e$ , (b) Efecto de  $F_a$  y c) Efecto de  $T_e - E_{m/p}$ .

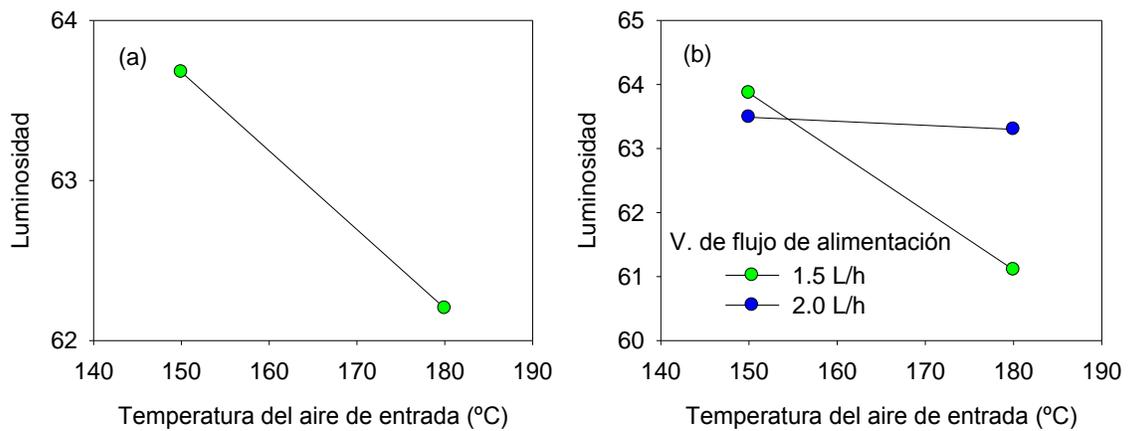


Figura 20. Efecto de las condiciones de secado sobre  $L^*$  de polvos OA, (a) Efecto de  $T_e$  y (b) Efecto de  $T_e - F_a$ .

Alto valor de  $h$  en polvos PG, OR y OA fue obtenido a  $T_e$  alta,  $F_a$  y  $E_{m/p}$  bajos (Figuras 21 a 23), resultando en una pérdida del color rojo-guinda. Esto probablemente se deba a que a estas condiciones de secado existió una mayor transferencia de calor y una menor protección de los encapsulantes al material, provocando reacciones de degradación en la betalaínas, para confirmar la degradación es necesario realizar otros estudios de confirmación. Kha et al. (2010) reportaron que al incrementar  $T_e$  de 120 a 200 °C resultó en un aumento en  $h$  en polvos de Gac, indicando una pérdida del color rojo debido a la degradación de los carotenoides. En polvos OG (Figura 24) un valor alto de  $h$  se observó a  $T_e$  y  $E_{m/p}$  altos y  $F_a$  baja. Como se mencionó anteriormente un  $E_{m/p}$  alto causa una reducción del color original de los jugos debido a las características de color de los encapsulantes. Grabowski et al. (2006) encontraron en polvos de camote que al incrementar la concentración de maltodextrina el valor de  $h$  aumenta, indicando una pérdida del color rojo. Comparando el color de los polvos PG y OG, valores de  $h$  más altos se obtuvieron en los polvos PG, indicando que son menos rojos, esto puede deberse a una diferencia en la composición química de las dos especies de pitayas. Estableciendo como criterio el valor de  $h$  (color rojo), en polvos PG, OG y OA el tratamiento P3 (150 °C, 2 L/h y 60 % de encapsulantes) presentó las mejores características de color y en el polvo OR fue el tratamiento P1 (150 °C, 1.5 L/h y 60 % de encapsulantes).

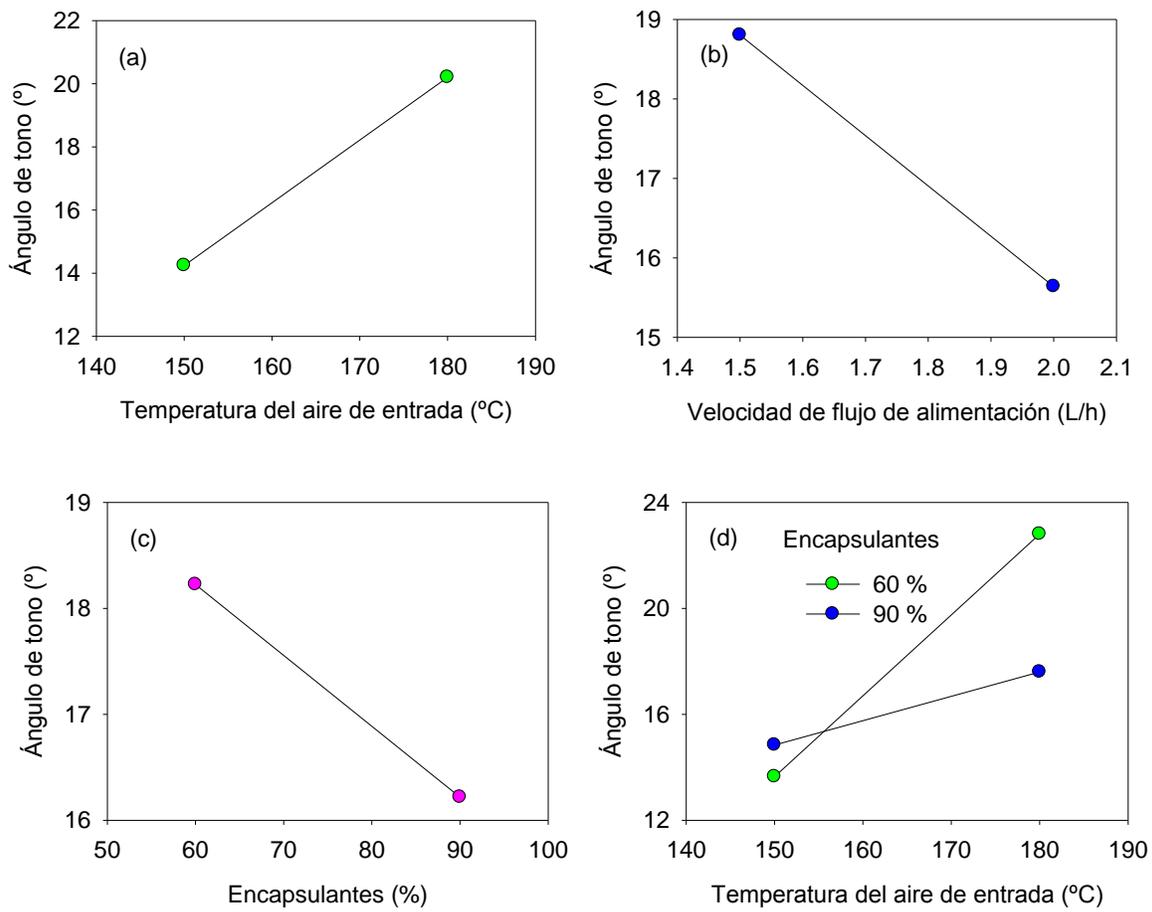


Figura 21. Efecto de las condiciones de secado sobre h de polvos PG, (a) Efecto de  $T_e$ , (b) Efecto de  $F_a$ , (c) Efecto de  $E_{m/p}$  y (d) Efecto de  $T_e - E_{m/p}$ .

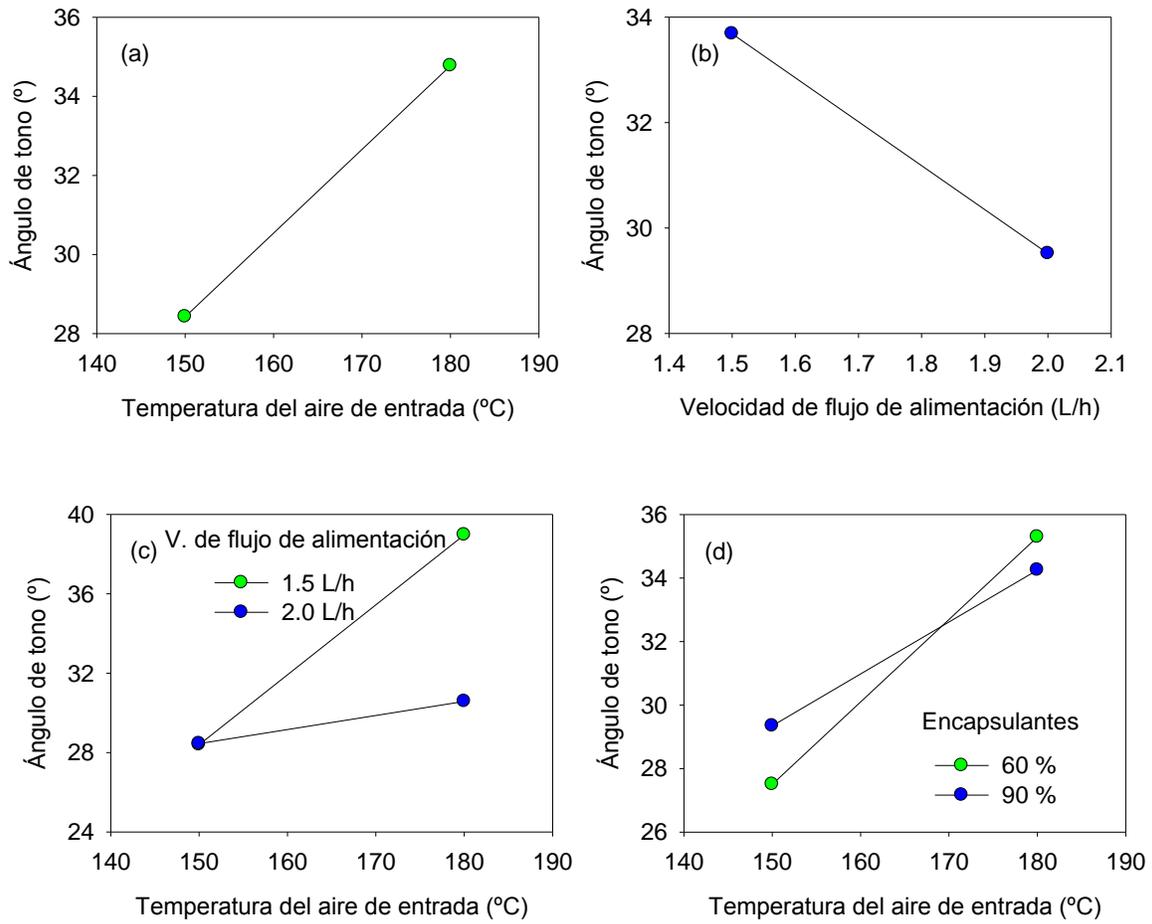


Figura 22. Efecto de las condiciones de secado sobre  $h$  de polvos OR, (a) Efecto de  $T_e$ , (b) Efecto de  $F_a$ , (c) Efecto de  $T_e - F_a$  y (d) Efecto de  $T_e - E_{m/p}$ .

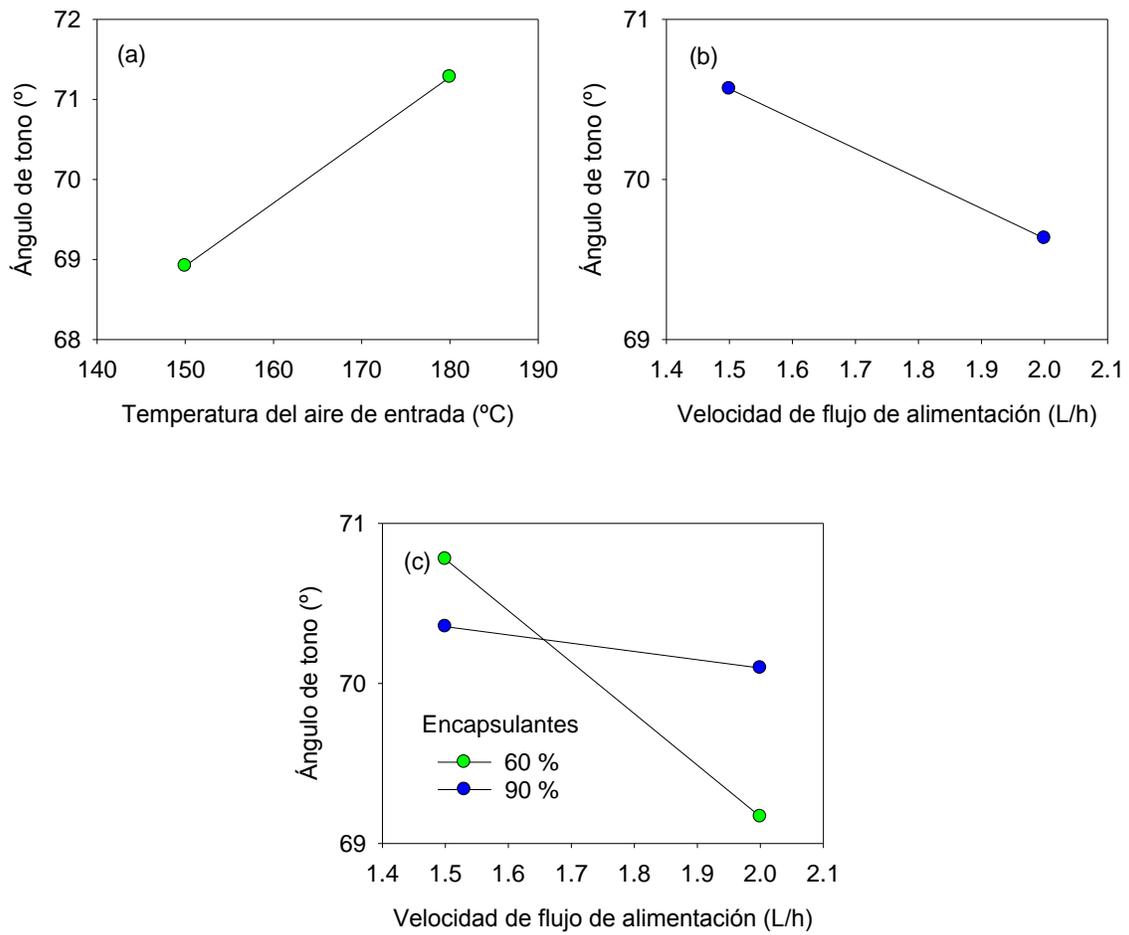


Figura 23. Efecto de las condiciones de secado sobre  $h$  de polvos OA, (a) Efecto de  $T_e$ , (b) Efecto de  $F_a$  y (c) Efecto de  $F_a - E_{m/p}$ .

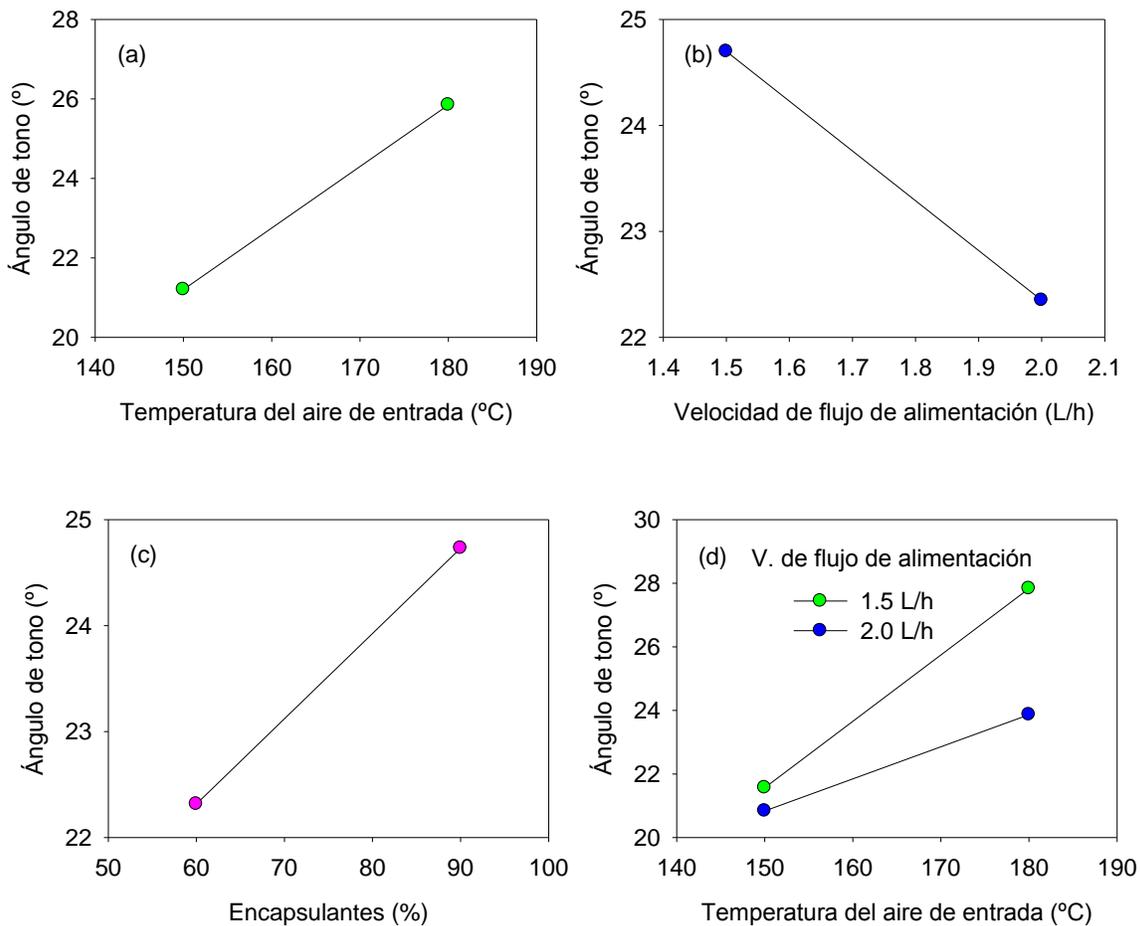


Figura 24. Efecto de las condiciones de secado sobre  $h$  de polvos OG, (a) Efecto de  $T_e$ , (b) Efecto de  $F_a$ , (c) Efecto de  $E_{m/p}$  y (d) Efecto de  $T_e - F_a$ .

En los polvos PG y OR (Figuras 25 y 26) cuando  $T_e$  es alta y  $F_a$  y  $E_{m/p}$  son bajos la saturación del tono, expresado por el croma, mostró mayor viveza. Observaciones similares fueron encontradas en otros estudios (Quek et al., 2007; Kha et al., 2010). En polvos OA (Figura 27) un valor alto de  $C^*$  se encontró cuando  $T_e$  y  $E_{m/p}$  son bajos y  $F_a$  es alta y en polvos OG (Figura 28) cuando  $T_e$  y  $E_{m/p}$  son bajos.

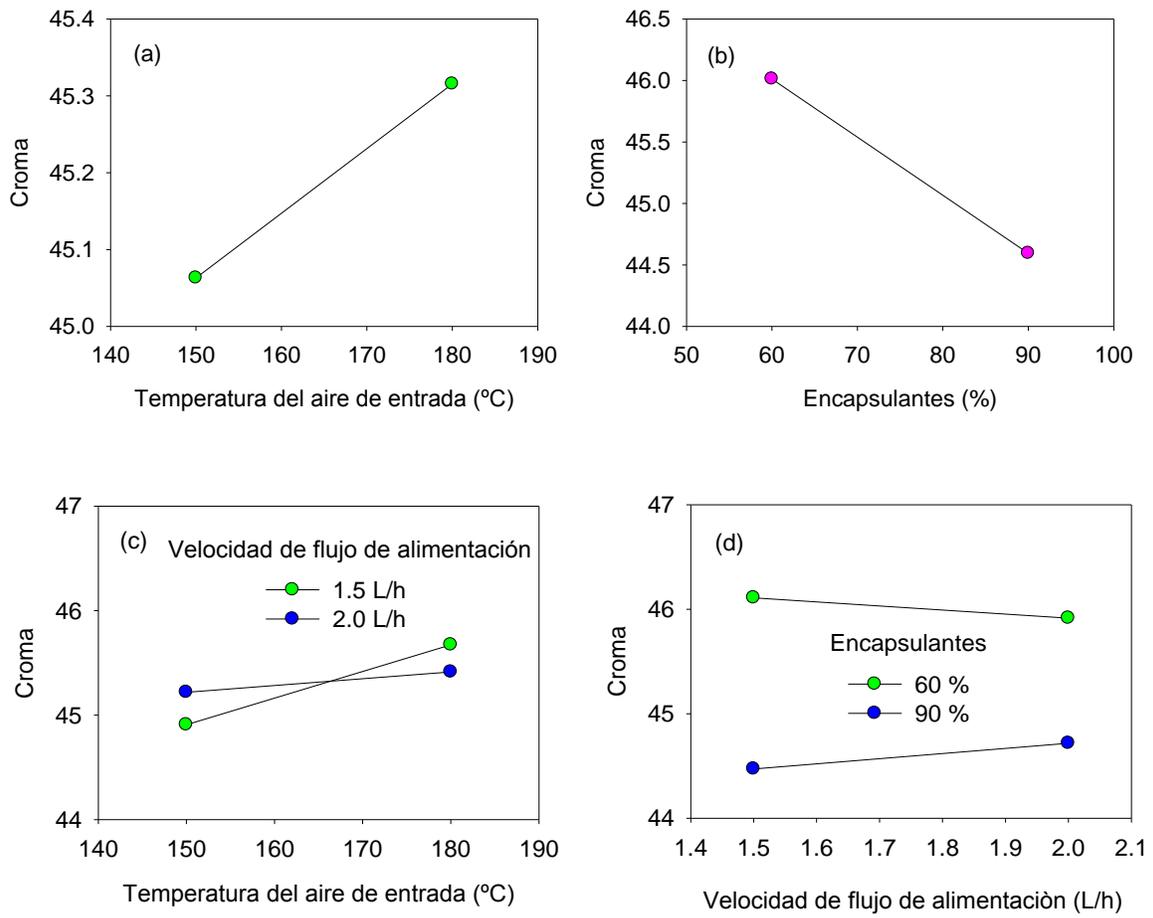


Figura 25. Efecto de las condiciones de secado sobre  $C^*$  de polvos PG, (a) Efecto de  $T_e$ , (b) Efecto de  $E_{m/p}$ , (c) Efecto de  $T_e - F_a$  y (d) Efecto de  $F_a - E_{m/p}$ .

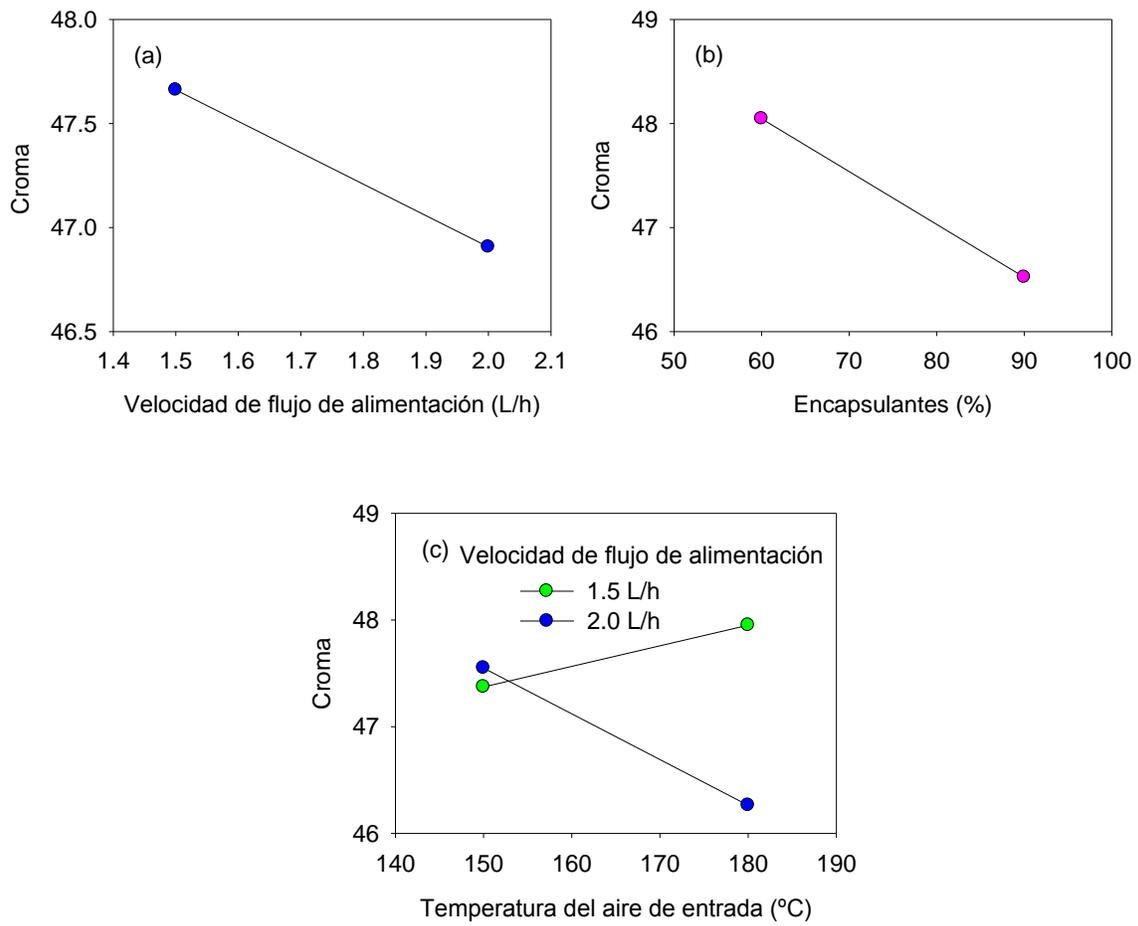


Figura 26. Efecto de las condiciones de secado sobre  $C^*$  de polvos OR, (a) Efecto de  $F_a$ , (b) Efecto de  $E_{m/p}$  y (c) Efecto de  $T_e - F_a$ .

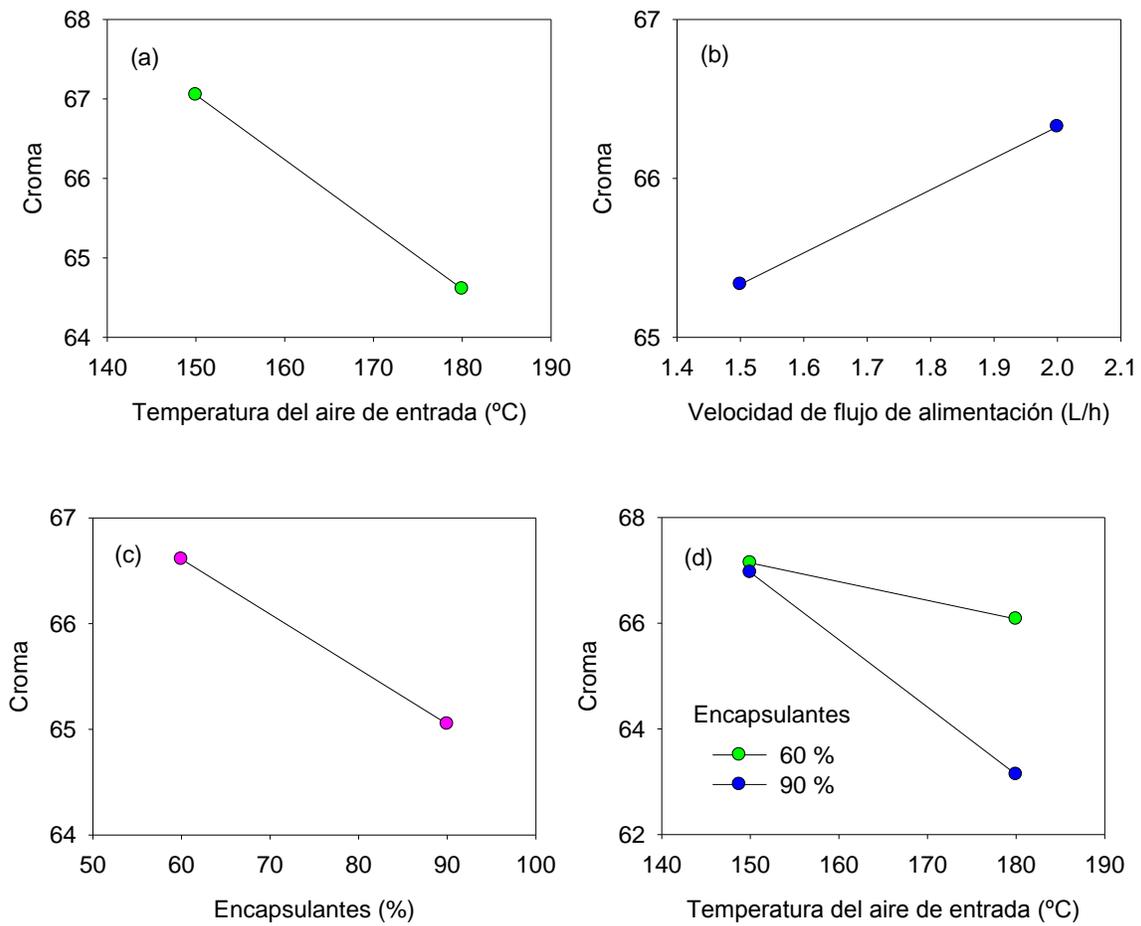


Figura 27. Efecto de las condiciones de secado sobre  $C^*$  de polvos OA, (a) Efecto de  $T_e$ , (b) Efecto de  $F_a$ , (c) Efecto de  $E_{m/p}$  y (d) Efecto de  $T_e - E_{m/p}$ .

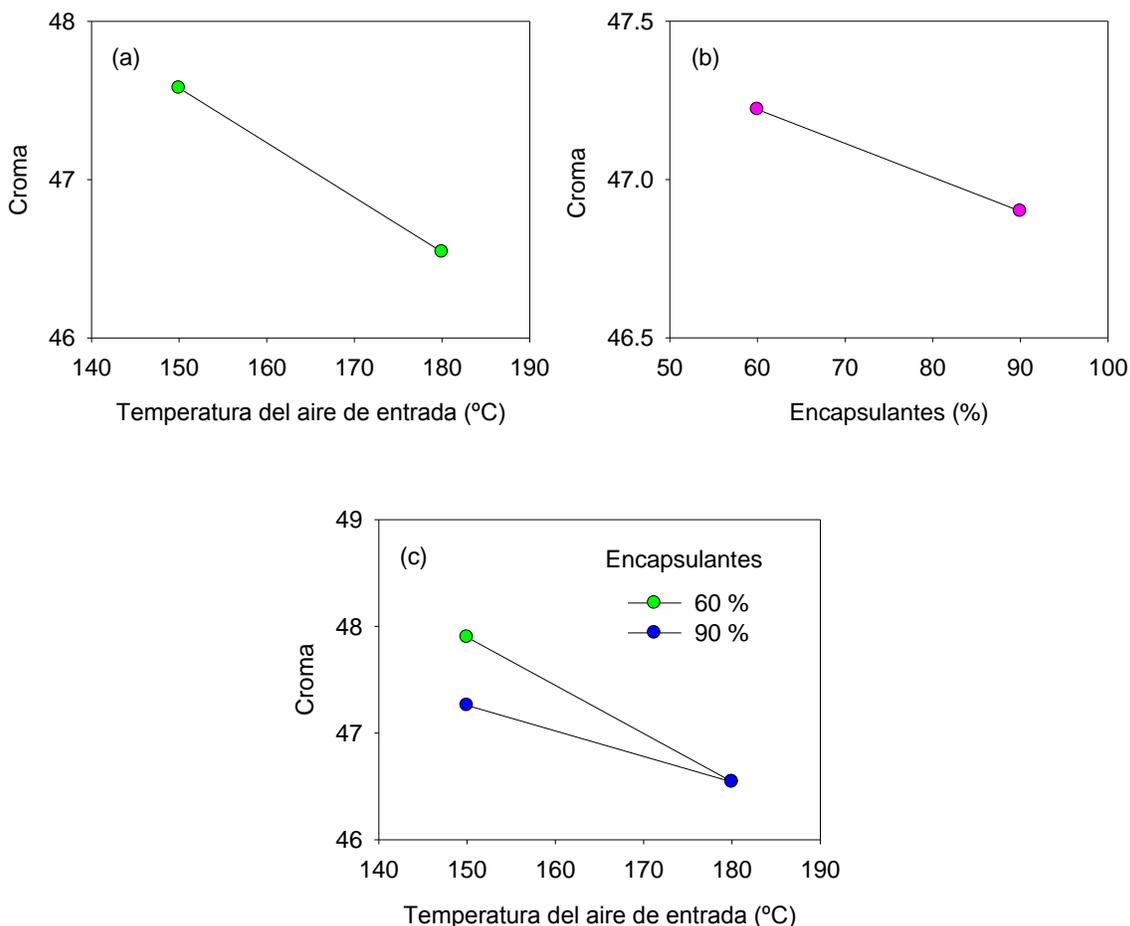


Figura 28. Efecto de las condiciones de secado sobre  $C^*$  de polvos OG, (a) Efecto de  $T_e$ , (b) Efecto de  $E_{m/p}$  y (c) Efecto de  $T_e - E_{m/p}$ .

### 4.3. Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción de polvos PG, OG y OA se muestran en las Figuras 29 a 31, respectivamente. En general, se observa que todas las isotermas presentan un comportamiento tipo III. Este tipo de curva también fue observado en polvos de piña, kiwi, acai y mucilago de nopal (Gabas et al., 2007; Wang et al., 2008; Tonon et al., 2009; León-Martínez et al., 2010). Analizando las Figuras 29 a 31 se observa que los polvos producidos con un 90 % de encapsulantes (P5-P8) tuvieron un  $X_{eq}$  menor que los producidos con un 60 % (P1-P4). Un incremento del % de encapsulantes resultó en una menor cantidad de agua absorbida, esto

probablemente se deba a que se modifica el equilibrio de sitios activos hidrofílicos/hidrofóbicos (Gabas et al., 2007).

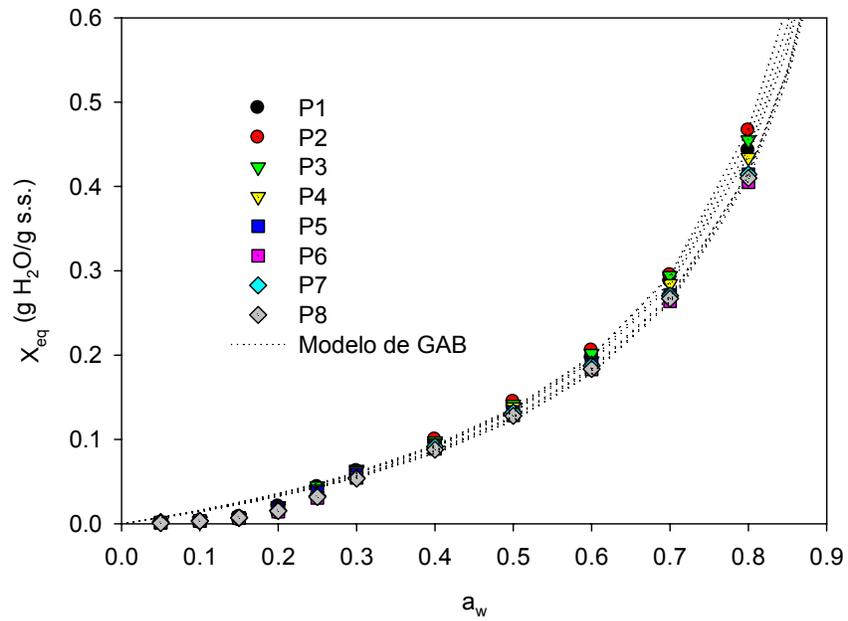


Figura 29. Isotermas de adsorción de agua de polvos PG.

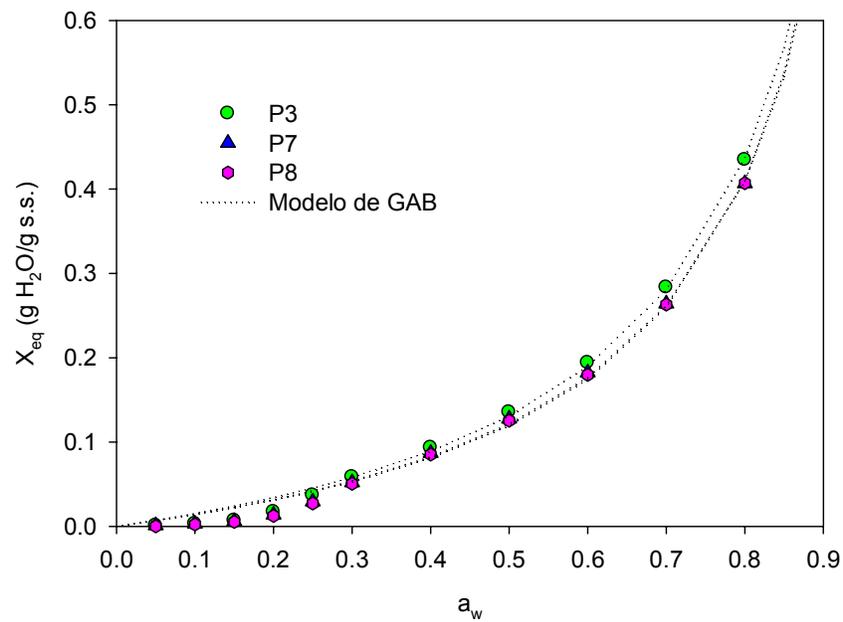


Figura 30. Isotermas de adsorción de agua de polvos OG.

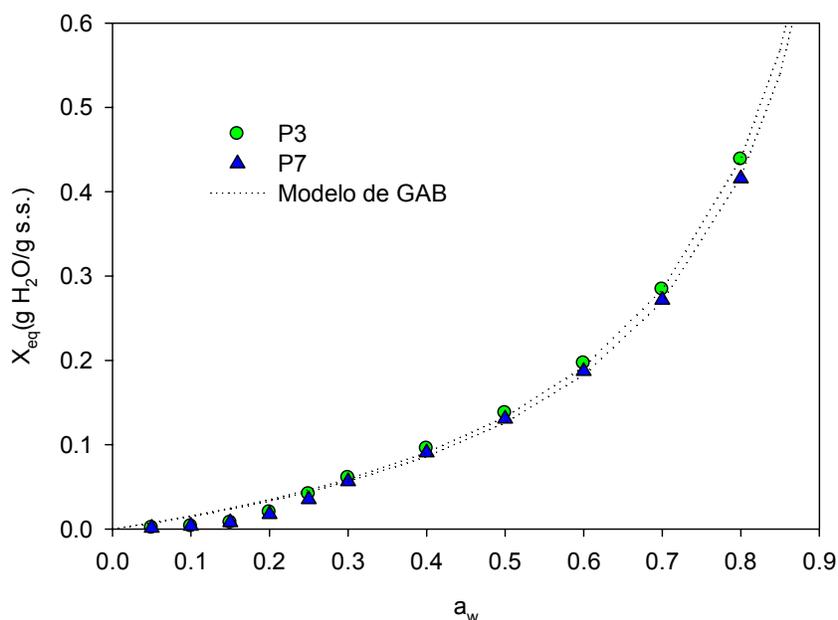


Figura 31. Isotermas de adsorción de agua de polvos OA.

Los datos experimentales de isotermas de adsorción de los polvos analizados fueron ajustados a los modelos de GAB y BET. Los parámetros obtenidos para cada modelo se muestran en las Tablas 12 y 13. El modelo de GAB presentó mejor ajuste ( $R^2 > 0.99$ ) a los datos experimentales. El valor del contenido de humedad de la monocapa ( $X_m$ ) nos indica la cantidad de agua que está fuertemente adsorbida a sitios específicos en la superficie del polvo y puede estar relacionado con la estabilidad del alimento (Gabas et al., 2007). Menor valor de  $X_m$  se observó en muestras producidas con un % de encapsulantes mayor, indicando una menor disponibilidad de los sitios activos para la absorción de agua. Los valores de  $C$  ( $=1$ ) y  $K$  ( $>0.9$ ) obtenidos pueden significar que las moléculas de agua de la monocapa y multicapa no tiene gran diferencia y que las propiedades de las moléculas de agua de la multicapa son similares a las del agua líquida (Quirijns et al., 2005b). Los valores de área de superficie (Tabla 12) resultaron mayores a los obtenidos comúnmente por productos alimenticios ( $100-250 \text{ m}^2/\text{g}$  de sólido) (Cassini et al., 2006); por lo tanto, existe un área mayor disponible para uniones hidrofílicas.

Tabla 12. Parámetros del modelo de GAB para polvos.

Muestra	Tratamiento	Parámetros						
		$X_m$ (g H <sub>2</sub> O/g s.s.)	C	K	$S_A$ (m <sup>2</sup> /g)	R <sup>2</sup>	RSS	SE
PG	P1	0.1558	1.0000	0.9253	550.57	0.9975	0.0008	0.0099
	P2	0.1514	1.0000	0.9447	534.78	0.9953	0.0017	0.0145
	P3	0.1583	1.0000	0.9280	559.25	0.9974	0.0008	0.0102
	P4	0.1548	1.0000	0.9225	546.95	0.9969	0.0009	0.0107
	P5	0.1497	1.0000	0.9193	528.94	0.9969	0.0009	0.0104
	P6	0.1416	1.0000	0.9274	500.38	0.9964	0.0010	0.0111
	P7	0.1459	1.0000	0.9257	515.59	0.9967	0.0010	0.0109
	P8	0.1406	1.0000	0.9321	496.93	0.9969	0.0009	0.0107
OG	P3	0.1502	1.0000	0.9304	530.58	0.9971	0.0009	0.0109
	P7	0.1386	1.0000	0.9337	489.78	0.9964	0.0010	0.0114
	P8	0.1339	1.0000	0.9422	473.12	0.9962	0.0011	0.0118
OA	P3	0.1542	1.0000	0.9255	544.79	0.9974	0.0008	0.0101
	P7	0.1464	1.0000	0.9256	517.33	0.9973	0.0008	0.0100

Tabla 13. Parámetros del modelo de BET para polvos.

Muestra	Tratamiento	Parámetros					
		$X_m$ (g H <sub>2</sub> O/g s.s.)	C	$S_A$ (m <sup>2</sup> /g)	R <sup>2</sup>	RSS	SE
PG	P1	0.1312	1.0100	463.70	0.9106	0.0007	0.0114
	P2	0.1238	1.0100	437.41	0.8916	0.0013	0.0161
	P3	0.1344	1.0100	474.91	0.8794	0.0007	0.0119
	P4	0.1293	1.0100	456.81	0.8882	0.0008	0.0123
	P5	0.1293	1.0100	456.81	0.9057	0.0007	0.0120
	P6	0.1147	1.0100	405.41	0.9350	0.0007	0.0122
	P7	0.1182	1.0100	417.76	0.9071	0.0007	0.0119
	P8	0.1142	1.0100	403.41	0.9556	0.0007	0.0116
OG	P3	0.1236	1.0100	436.55	0.9142	0.0007	0.0121
	P7	0.1113	1.0100	393.34	0.9315	0.0007	0.0122
	P8	0.1076	1.0100	380.06	0.9520	0.0008	0.0127
OA	P3	0.1290	1.0100	455.96	0.8942	0.0007	0.0115
	P7	0.1202	1.0100	424.92	0.9390	0.0006	0.0111

#### 4.4. Temperatura de transición vítrea

En la Figura 32 se presentan los termogramas obtenidos del análisis DSC en el polvo PG tratamiento 3 equilibrado a diferentes  $a_w$ , se observa un cambio en el flujo de calor relacionado con un cambio en la capacidad calorífica a la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ). Curvas similares fueron obtenidas para todos los polvos acondicionados a diferentes  $a_w$ .

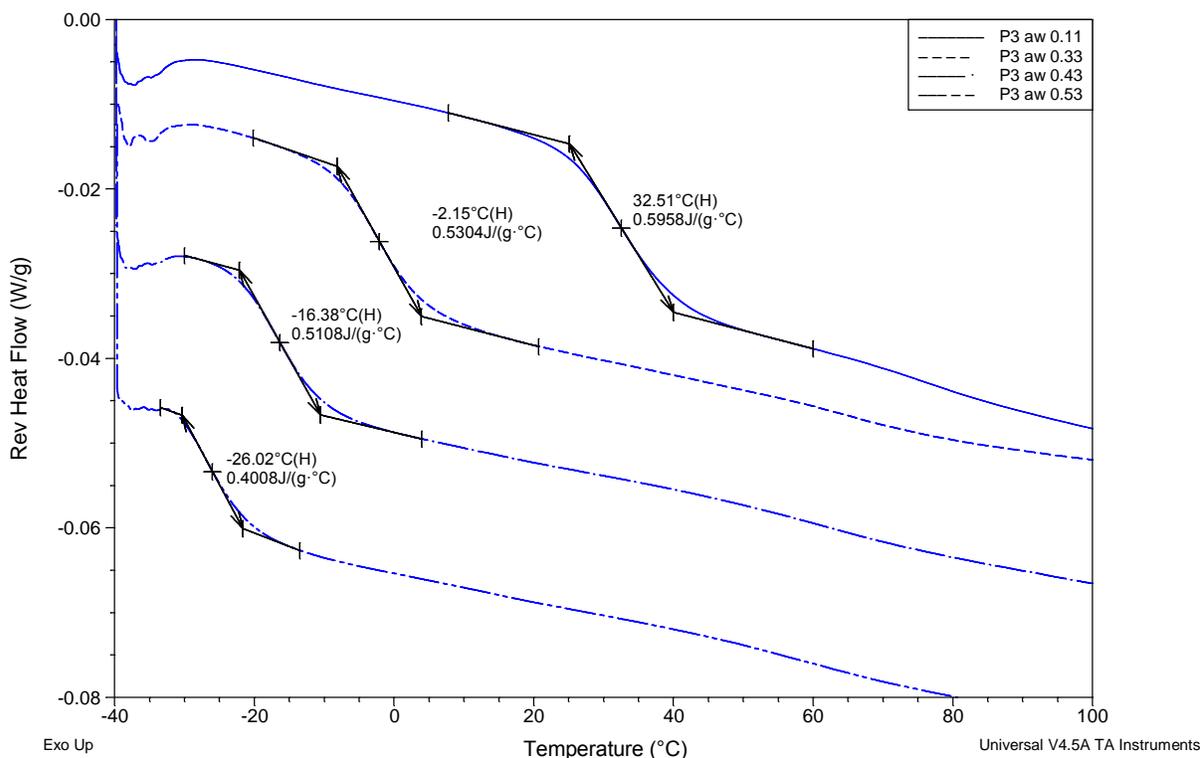


Figura 32. Termogramas obtenidos del análisis DSC en polvo PG tratamiento P3 a diferentes  $a_w$ .

En la Tabla 14 se muestran las temperaturas de transición vítrea ( $T_g$ ) de polvos (PG, OG y OA) acondicionadas a diferentes  $a_w$ , se observa que la  $T_g$  disminuye conforme aumenta la  $a_w$  esto se debe al efecto plastificante del agua. Este mismo comportamiento también fue observado en polvos de jugo de tomate, jugo de naranja y borjón (Goula et al., 2008; Goula & Adamopoulos, 2010; Mosquera et al., 2011). Por otro lado, también se observa a una  $a_w$  de 0.11 que los polvos producidos con un 90 % de encapsulantes presentaron un valor de  $T_g$

mayor que los producidos con un 60 %, esto se debe a que la adición de una mayor cantidad de sustancias con alto peso molecular incrementa la  $T_g$  del producto final. Comportamientos idénticos fueron observados por Kurozawa et al. (2009). Roos & Karel (1991) reportaron que los valores de  $T_g$  de un sistema binario (maltodextrina/sucrosa) aumentan con un incremento en la concentración de maltodextrina, sin embargo, el incremento no es lineal y depende ampliamente de la concentración de cada componente.

En general, la  $T_g$  de los polvos de jugos de pitaya es baja en comparación a la obtenida por Lee et al. (2013) y Tze et al. (2012) en polvos de jugo de pitahaya roja, esto se debe probablemente a una diferencia en la composición de los jugos y al % de encapsulantes utilizados.

Tabla 14. Temperatura de transición vítrea de polvos acondicionados a diferentes  $a_w$ .

Muestra	Tratamiento	$T_g$ (°C)			
		$a_w$ 0.11	$a_w$ 0.33	$a_w$ 0.43	$a_w$ 0.53
PG	P1	32.24 ± 0.05	3.19 ± 0.33	-13.60 ± 0.45	-20.80 ± 1.01
	P2	29.22 ± 0.24	4.14 ± 1.07	-11.28 ± 0.71	-19.24 ± 0.55
	P3	31.53 ± 1.32	-2.39 ± 0.39	-16.33 ± 0.28	-26.22 ± 0.54
	P4	32.68 ± 0.03	3.93 ± 1.17	-12.45 ± 0.78	-25.59 ± 0.28
	P5	38.26 ± 0.36	1.85 ± 0.96	- 8.92 ± 0.71	-19.67 ± 1.50
	P6	41.23 ± 1.04	1.03 ± 0.67	- 6.87 ± 1.22	-15.37 ± 0.17
	P7	*N/D	2.62 ± 0.67	-13.54 ± 0.72	-25.28 ± 0.76
	P8	42.22 ± 0.52	3.57 ± 1.27	- 9.79 ± 1.15	-21.80 ± 1.17
OG	P3	37.30	-2.63	-10.87	-20.13
	P7	45.13	1.75	-7.62	-18.20
	P8	46.14	2.13	-4.77	-24.69
OA	P3	37.15	-3.96	-14.67	-25.02
	P7	46.32	1.74	-7.60	-13.56

\*Dato no disponible

Los datos experimentales de  $T_g$  y contenido de humedad (g H<sub>2</sub>O/g s.h.) se ajustaron satisfactoriamente ( $R^2 > 0.95$ ) al modelo de Gordon-Taylor. Los parámetros estimados se muestran en la Tabla 15 y las curvas ajustadas se

presentan en las Figuras 33 a 35. Los valores de  $T_{gs}$  variaron de 30 °C a 47 °C. Con respecto al parámetro  $k$ , los valores obtenidos se encontraron entre 2.73 y 4.61. Valores similares fueron reportados en polvos de jugo de acai, jugo de pomelo y borjón (Tonon et al., 2009; Telis et al., 2010; Mosquera et al., 2011). Este parámetro controla el grado de curvatura de  $T_g$  dependiente del contenido de agua (en un sistema binario) y puede estar relacionado con la fuerza de la interacción entre los componentes del sistema (Gordon & Taylor, 1952). En las Figuras 33 a 35 se observa que conforme aumenta el contenido de humedad la  $T_g$  decrece, debido a un incremento del volumen libre entre las moléculas de la estructura del polímero, favoreciendo la movilidad de las mismas, provocando que el material cambie de un estado amorfo a gomoso, es decir, las moléculas de agua penetran entre los espacios intermoleculares de las cadenas poliméricas del material, aumentando la distancia promedio entre estas cadenas y dando como resultado mayor movilidad molecular.

Tabla 15. Parámetros estimados para el modelo de Gordon-Taylor para polvos.

Muestra	Tratamiento	Parámetros		
		$T_{gs}$ (°C)	$k$	$R^2$
PG	P1	34.33	3.28	0.989
	P2	29.89	2.73	0.994
	P3	33.59	3.62	0.997
	P4	35.74	3.53	0.994
	P5	39.57	3.66	0.992
	P6	41.28	3.69	0.964
	P7	37.01	3.90	0.995
	P8	44.18	4.26	0.995
OG	P3	37.52	3.65	0.974
	P7	45.44	4.20	0.974
	P8	47.25	4.61	0.982
OA	P3	38.57	4.05	0.988
	P7	46.53	3.94	0.953

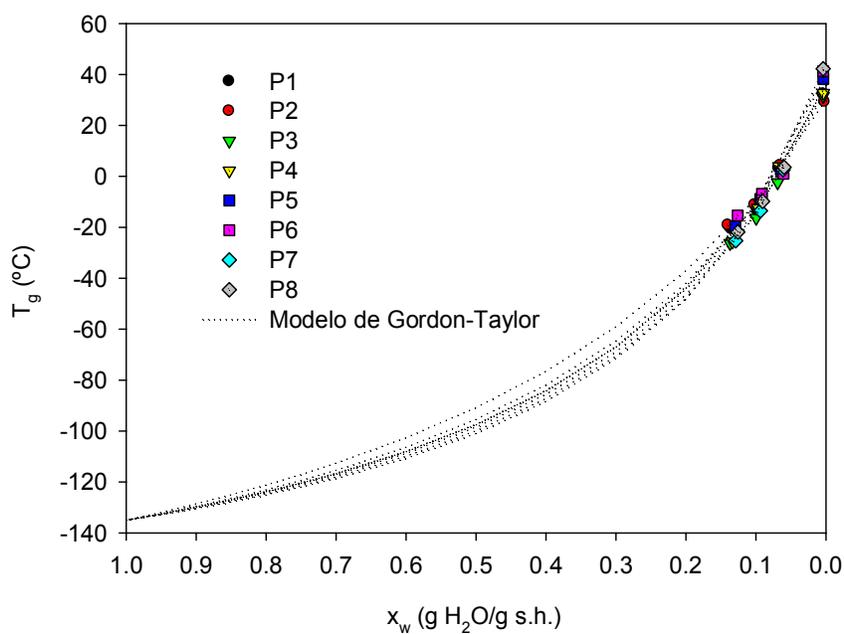


Figura 33. Temperatura de transición vítrea en función del contenido de humedad de polvos PG.

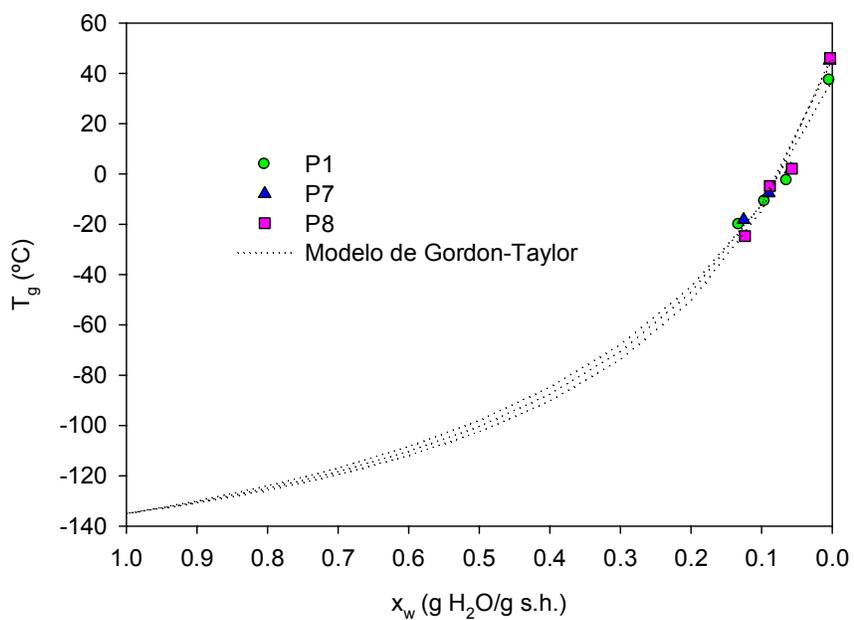


Figura 34. Temperatura de transición vítrea en función del contenido de humedad de polvos OG.

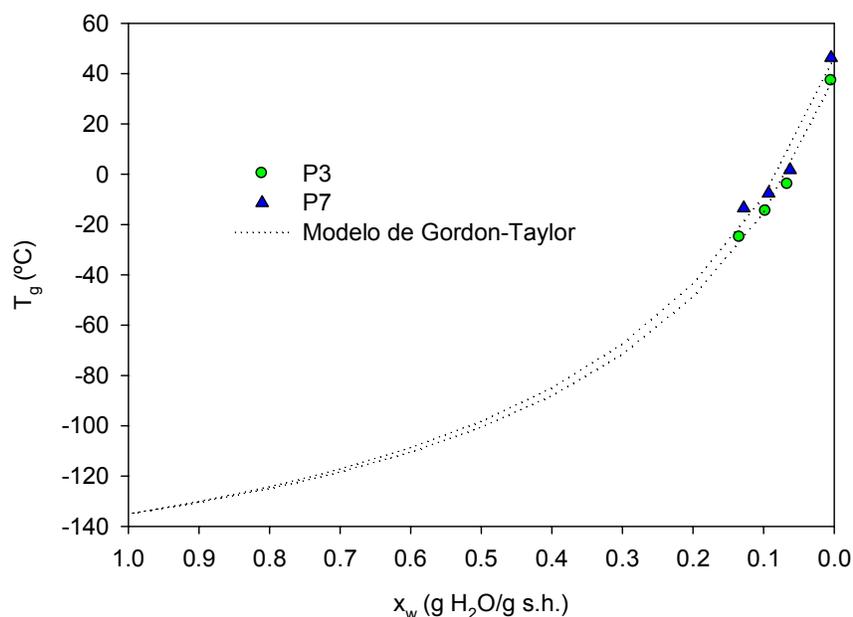


Figura 35. Temperatura de transición vítrea en función del contenido de humedad de polvos OA.

#### 4.5. Estabilidad del producto bajo condiciones críticas

En los últimos años varios autores han relacionado los datos de isothermas de adsorción y los de temperatura de transición vítrea para obtener las condiciones críticas a las cuales los alimentos pueden ser almacenados (Moraga et al., 2006; Kurozawa et al., 2009; Tonon et al., 2009). La relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad críticos es el valor en el cual la temperatura de transición vítrea del producto es igual a la temperatura ambiente (25 °C) (Kurozawa et al., 2009). Para obtener los valores de actividad de agua crítica ( $a_{wc}$ ) y contenido de humedad crítico ( $X_c$ ) para los polvos PG, OG y OA se graficaron los ajustes de los modelos de GAB y Gordon-Taylor en función de  $a_w$  (Anexo J), como ejemplo se muestra el tratamiento P7 del polvo PG (Figura 36). La  $a_{wc}$  y  $X_c$  para los polvos PG, OG y OA para una temperatura de almacenamiento de 25 °C se muestran en la Tabla 16. Por arriba de estas condiciones los polvos son susceptibles al deterioro y pueden sufrir cambios en su estructura como colapso, pegajosidad y apelmazamiento (Kurozawa et al., 2009).

Tabla 16. Valores de actividad de agua crítica ( $a_{wc}$ ) y contenido humedad crítico ( $X_c$ ) de polvos.

Muestra	Tratamiento	$a_{wc}$	$X_c$ (g H <sub>2</sub> O/g s.s.)
PG	P1	0.189	0.033
	P2	0.192	0.034
	P3	0.178	0.031
	P4	0.201	0.035
	P5	0.220	0.038
	P6	0.241	0.041
	P7	0.211	0.036
	P8	0.240	0.041
OG	P3	0.211	0.037
	P7	0.252	0.043
	P8	0.257	0.043
OA	P3	0.203	0.036
	P7	0.247	0.043

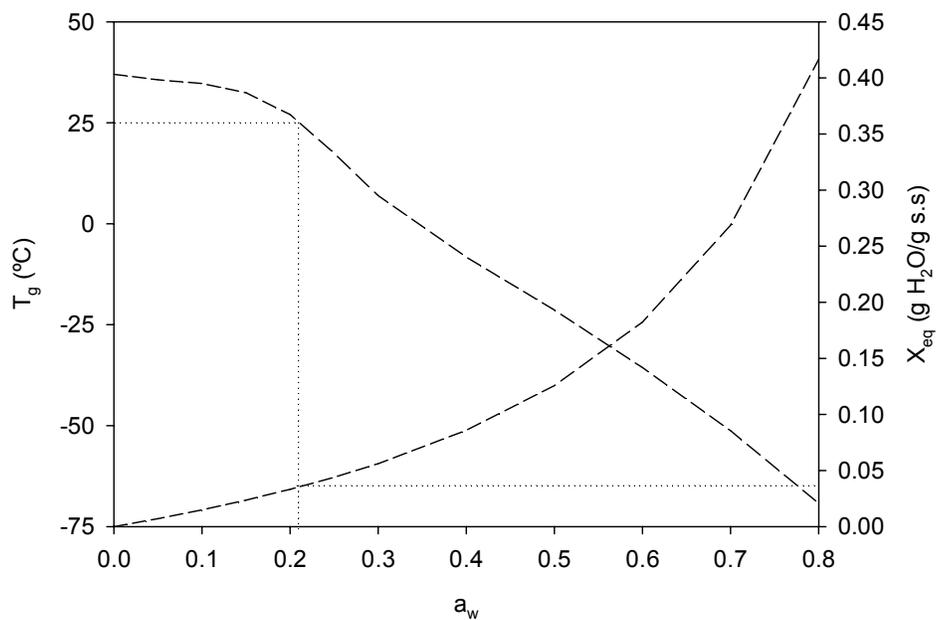


Figura 36. Relación entre la temperatura de transición vítrea-actividad de agua y contenido de humedad al equilibrio-actividad de agua del polvo PG tratamiento P7.

#### 4.6. Morfología de las partículas

En las Figuras 37 a 39 se muestra la morfología de polvos PG, OG, OR y OA. En general, las partículas presentan forma esférica, superficie lisa, aglomeración y varios tamaños. También se observa la formación de partículas huecas con pared gruesa. Tonon et al. (2008) y Ferrari et al. (2012) reportaron la formación de partículas con superficie lisa a altas temperaturas y lo relacionan con la velocidad de secado, a una alta temperatura existe una mayor velocidad de secado y por lo tanto una rápida evaporación del agua que conduce a la formación de una costra lisa y dura. Nijdam & Langrish (2006) observaron partículas huecas con superficie lisa usando temperaturas altas de secado, este comportamiento lo atribuyen a que se forma una vacuola (burbuja de vapor) dentro de la partícula, enseguida una piel se desarrolla en la superficie que se hincha en el momento en el que la temperatura de la partícula es superior al punto de ebullición y la presión de vapor dentro de la vacuola se eleva por encima de la presión atmosférica. Cuando la temperatura de secado es suficientemente alta, la humedad se evapora rápidamente y la piel se vuelve seca y dura, de modo que la partícula hueca no puede desinflarse cuando el vapor se condensa dentro de la vacuola mientras la partícula se mueve en las regiones frías del secador. Por otra parte, la aglomeración o unión de partículas individuales probablemente se debe a efectos electrostáticos y fuerzas de Van der Waals (Walton & Mumford, 1999). Comparando las Figuras 37 y 38, se observa que las partículas producidas con menor % de encapsulantes se encuentran más aglomeradas que las producidas con un % de encapsulantes mayor. Ferrari et al. (2012) observaron que a una baja concentración de encapsulante existe una fuerte adhesión de las partículas más pequeñas a la superficie de las más grandes formando aglomerados y resultando en un incremento en el tamaño de partícula.

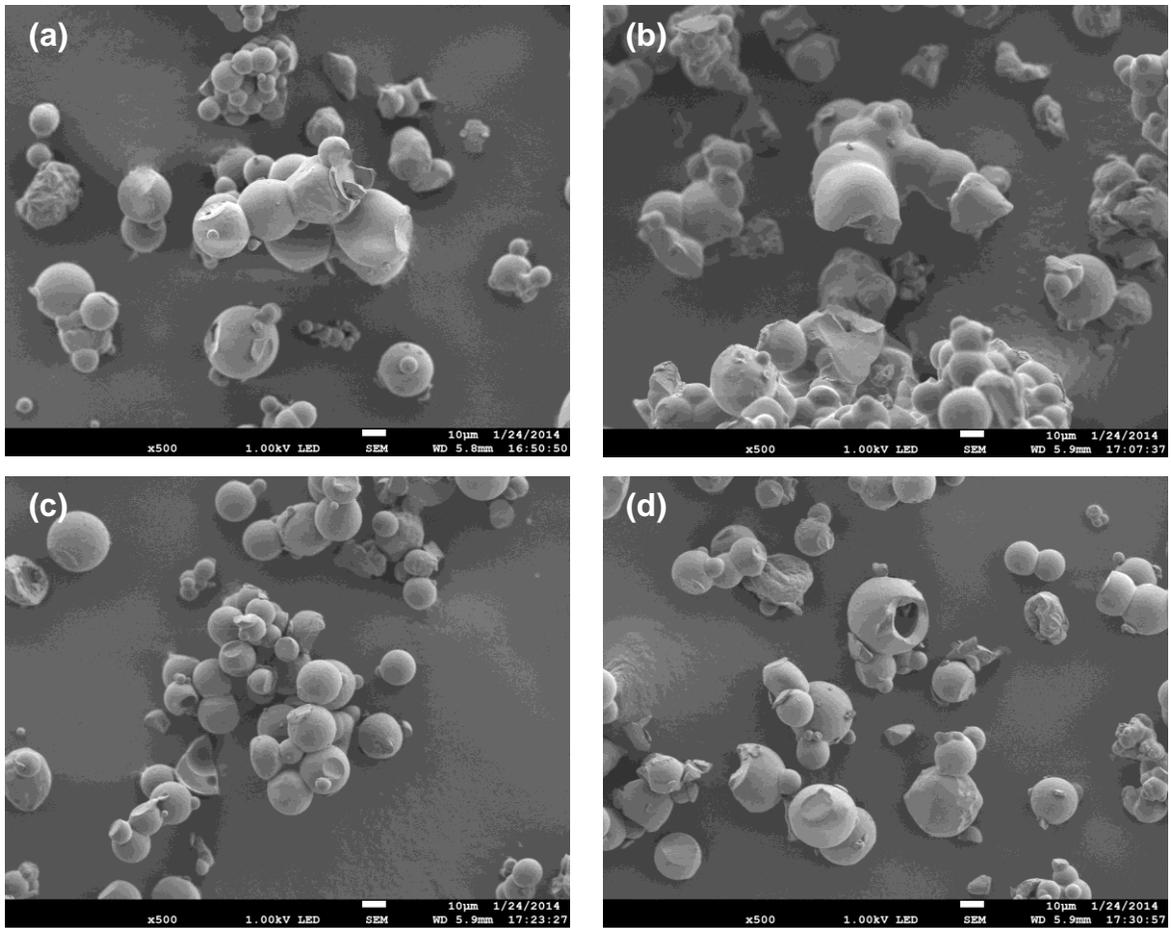


Figura 37. Micrografías de partículas de polvo OG diferentes tratamientos, (a) P1, (b) P2, (c) P3 y (d) P4.

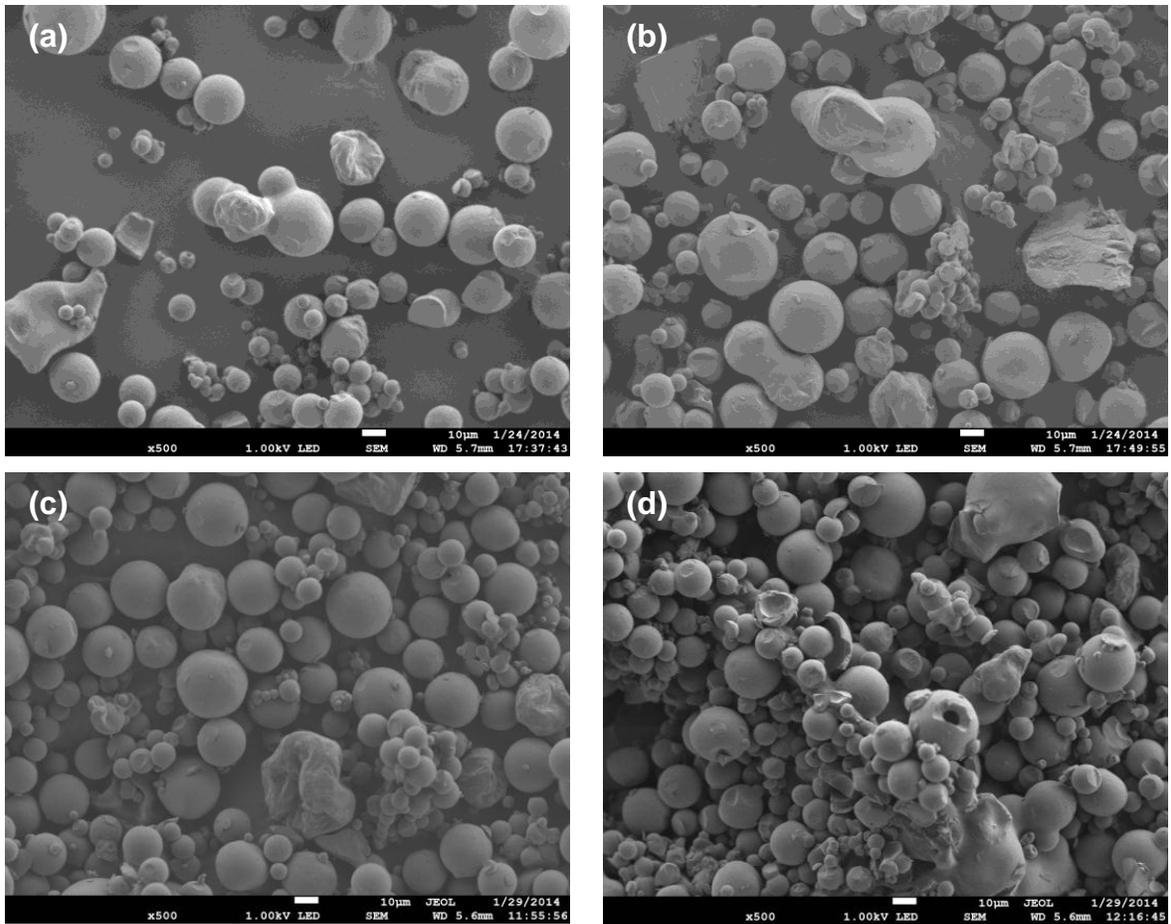


Figura 38. Micrografías de partículas de polvo OG diferentes tratamientos, (a) P5, (b) P6, (c) P7 y (d) P8.

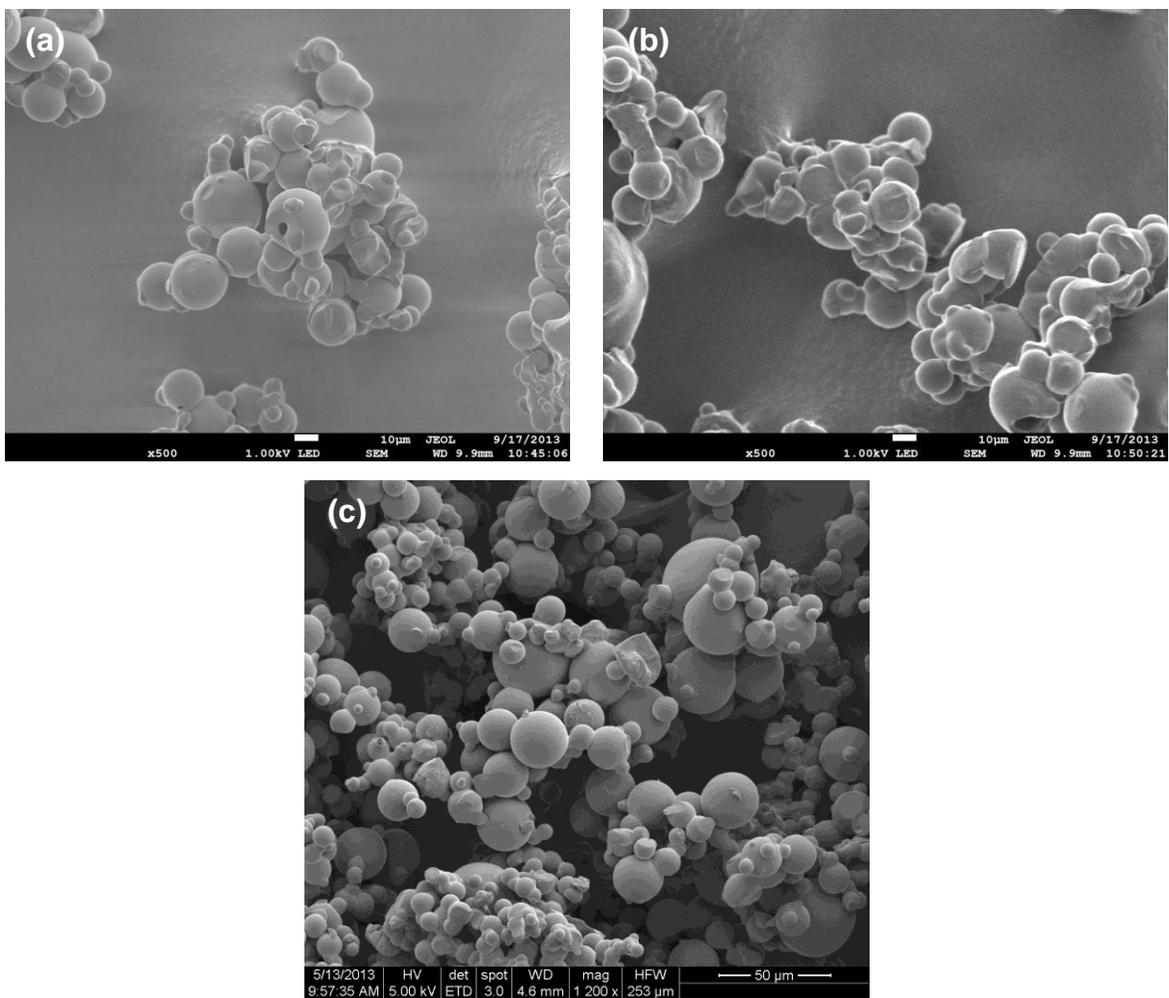


Figura 39. Micrografías de partículas de diferentes polvos con el tratamiento P3, (a) OA, (b) OR y (c) PG.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

En la caracterización de jugos de pitaya de las dos especies y tres variedades no se encontraron diferencias importantes en las propiedades que pudieran influir en el comportamiento del proceso de secado. El rendimiento de polvos fue significativamente afectado por el % de encapsulantes. Al utilizar un 90 % de encapsulantes se encontró un mayor rendimiento. Por otra parte,  $F_a$  tuvo un efecto significativo solamente en polvos PG; por lo tanto, no se puede afirmar que este parámetro tiene un efecto en el rendimiento. Las condiciones de secado (temperatura del aire de entrada, velocidad de flujo de alimentación y % de encapsulantes) tuvieron un efecto significativo sobre el contenido de humedad y color de polvos. Incrementando la temperatura del aire de entrada y el % de encapsulantes y disminuyendo la velocidad de flujo de alimentación se redujo el contenido de humedad. El modelo de GAB ( $R^2 > 0.99$ ) presentó mejor ajuste a los datos experimentales de isotermas de adsorción que el modelo de BET. Una menor adsorción de agua y área superficial se observó cuando el % de encapsulantes fue alto. Los datos de  $T_g$  presentaron buen ajuste ( $R^2 > 0.95$ ) al modelo de Gordon-Taylor. Para calcular las condiciones críticas (actividad de agua y contenido de humedad críticos) de almacenamiento a 25 °C para los polvos se emplearon los ajustes de los modelos de GAB y Gordon-Taylor. Con respecto a la morfología de polvos se obtuvieron partículas con excelentes características, es decir, esféricas, bien conformadas y con superficie lisa. El tratamiento P7 (150 °C, 2 L/h y 90 % de encapsulantes) mostró las mejores características físicas, seguido del tratamiento P5 (150 °C, 1.5 L/h y 90 % de encapsulantes). La actividad de agua crítica y contenido de humedad crítico para una temperatura de almacenamiento de 25 °C para polvos PG, OG y OA (tratamiento P7) fueron: 0.210 y 0.036 g H<sub>2</sub>O/g s.s., 0.252 y 0.043 g H<sub>2</sub>O/g s.s. y 0.247 y 0.043 g H<sub>2</sub>O/g s.s., respectivamente.

## 5.2. Recomendaciones

- Optimizar el proceso de secado tomando en cuenta la cantidad de betalaínas encapsuladas.
- Emplear otras mezclas de encapsulantes de alto peso molecular para incrementar la  $T_g$  y estabilidad del producto deshidratado.
- Determinar otras propiedades físicas para aplicaciones particulares en la industria farmacéutica y de alimentos.

## REFERENCIAS

- Abadio, F. D. B., Domingues, A. M., Borges, S. V., & Oliveira, V. M. (2004). Physical properties of powdered pineapple (*Ananas comosus*) juice—effect of malt dextrin concentration and atomization speed. *Journal of Food Engineering*, 64(3), 285-287.
- Abiad, M. G., Carvajal, M. T., & Campanella, O. H. (2009). A review on methods and theories to describe the glass transition phenomenon: applications in food and pharmaceutical products. *Food Engineering Reviews*, 1(2), 105-132.
- Ahmed, M., Akter, M. S., Lee, J. C., & Eun, J. B. (2010). Encapsulation by spray drying of bioactive components, physicochemical and morphological properties from purple sweet potato. *LWT - Food Science and Technology*, 43(9), 1307-1312.
- Arreola-Nava, H. J. (1999). Taxonomía del pitayo (*Stenocereus* (Berger) Ricc.). En: Pimienta-Barrios, E. (Ed.), *El pitayo en Jalisco y especies afines en México*. Universidad de Guadalajara, Fundación Produce Jalisco, Guadalajara, México, 25-35.
- Attenburrow, G., & Davies, A. P. (1993). The mechanical properties of cereal based foods in and around the glassy state. In: Blanshard, J. M. V., & Lillford, P. J. (Eds.), *The glassy state in foods*. Nottingham University Press, Leicestershire, 317–331.
- Ayala, K., & Beltran, M. C. (2007). Caracterización de frutos de pitaya *Stenocereus griseus* H. En: IX Congreso de Ciencia de los Alimentos y V Foro de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Guanajuato, México, 244-251.

- Azeredo, H. M. C. (2009). Betalains: properties, sources, applications, and stability—a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 44(12), 2365-2376.
- Badui, D. S. (2006). Química de los alimentos. Cuarta edición. Pearson Educación, México.
- Barbosa-Cánovas, G. V., & Vega-Mercado, H. (1996). Dehydration of foods. Chapman & Hall, New York.
- Barthlott, W., & Hunt, D. R. (1993). Cactaceae. In: Kubitzki, K., Rohwer, J. G., & Bittrich, B. (Eds.), *The families and genera of vascular plants, II, Dicotyledons*. Springer-Verlag, Berlín, 161-197.
- Basu, S., Shivhare, U. S., & Mujumdar, A. S. (2006). Models for sorption isotherms for foods: a review. *Drying Technology*, 24(8), 917-930.
- Basu, S., Shivhare, U. S., & Muley, S. (2013). Moisture adsorption isotherms and glass transition temperature of pectin. *Journal of Food Science and Technology*, 50(3), 585-589.
- Bemiller, J. N., & Whistler, R. L. (1996). Carbohydrates. In: Fennema, O. R. (Ed.), *Food Chemistry*, 3rd ed. Marcel Dekker, New York, 157-224.
- Bhandari, B. R., Datta, N., Crooks, R., Howes, T., & Rigby, S. (1997a). A semi-empirical approach to optimise the quantity of drying aids required to spray dry sugar-rich foods. *Drying Technology*, 15(10), 2509-2525.
- Bhandari, B. R., Datta, N., & Howes, T. (1997b). Problems associated with spray drying of sugar-rich foods. *Drying Technology*, 15(2), 671-684.

- Bhandari, B. R., & Howes, T. (1999). Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 40(1), 71-79.
- Bhandari, B. R., Senoussi, A., Dumoulin, E. D., & Lebert, A. (1993). Spray drying of concentrated fruit juices. *Drying Technology*, 11(5), 1081-1092.
- Boo, H. O., Hwang, S. J., Bae, C. S., Park, S. H., Heo, B. G., & Gorinstein, S. (2012). Extraction and characterization of some natural plant pigments. *Industrial Crops and Products*, 40, 129-135.
- Bravo-Hollis, H. (1978). Las cactáceas de México, Vol. I. *Universidad Nacional Autónoma de México*, México.
- Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., & Teller, E. (1940). On a theory of the Van der Waals adsorption of gases. *Journal of the American Chemical Society*, 62(7), 1723-1732.
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309-319.
- Cadden, A. M. (1988). Moisture sorption characteristics of several food fibers. *Journal of Food Science*, 53(4), 1150-1155.
- Cano-Chauca, M., Stringheta, P. C., Ramos, A. M., & Cal-Vidal, J. (2005). Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 6(4), 420-428.
- Carneiro, H. C., Tonon, R. V., Grosso, C. R. F., & Hubinger, M. D. (2013). Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil

- microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials. *Journal of Food Engineering*, 115(4), 443-451.
- Cassini, A. S., Marczak, L. D. F., & Noreña, C. P. Z. (2006). Water adsorption isotherms of texturized soy protein. *Journal of Food Engineering*, 77(1), 194-199.
- Chegini, G. R., & Ghobadian, B. (2007). Spray dryer parameters for fruit juice drying. *World Journal of Agricultural Sciences*, 3(2), 230-236.
- Colina, I. M. L. (2010). *Deshidratación de alimentos*. Trillas, México.
- CONABIO. (2000). *Estrategia nacional sobre biodiversidad de México*. SEMARNAP-CONABIO. México.
- Desai, K. G. H., & Park, H. J. (2005). Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Drying Technology*, 23(7), 1361-1394.
- Fazaeli, M., Emam-Djomeh, Z., Ashtari, A. K., & Omid, M. (2012). Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. *Food and Bioproducts Processing*, 90(4), 667-675.
- Ferrari, C. C., Germer, S. P. M., & de Aguirre, J. M. (2012). Effects of spray-drying conditions on the physicochemical properties of blackberry powder. *Drying Technology*, 30(2), 154-163.
- Figura, L. O., & Teixeira, A. A. (2007). *Food Physics: Physical Properties – Measurement and Applications*. Springer Press, Heidelberg, Germany.

- Filková, I., Huang, L. X. & Mujumdar, A. S. (2006). Industrial Spray Drying Systems. In: Mujumdar, A. S. (Ed.), *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, 215-255.
- Gabas, A. L., Telis, V. R. N., Sobral, P. J. A., & Telis-Romero, J. (2007). Effect of maltodextrin and arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder. *Journal of Food Engineering*, 82(2), 246-252.
- García-Cruz, E. E., Rodríguez-Ramírez, J., Méndez-Lagunas, L. L., & Medina-Torres, L. (2013). Rheological and physical properties of spray-dried mucilage obtained from *Hylocereus undatus* cladodes. *Carbohydrate Polymers*, 91(1), 394-402.
- García-Cruz, L., Salinas-Moreno, Y., & Valle-Guadarrama, S. (2012). Betalaínas, compuestos fenólicos y actividad antioxidante en pitaya de mayo (*Stenocereus griseus* H.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(SPE5), 01-05.
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., & Joaquín-Cruz, E. (2013). Physical, chemical, and antioxidant activity characterization of pitaya (*Stenocereus pruinosus*) fruits. *Plant Foods for Human Nutrition*, 68(4), 403-410.
- Genin, N., & René, F. (1995). Analyse du rôle de la transition vitreuse dans les procédés de conservation agro-alimentaires. *Journal of Food Engineering*, 26(4), 391-408.
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9), 1107-1121.

- Gill, P. S., Sauerbrunn, S. R., & Reading, M. (1993). Modulated differential scanning calorimetry. *Journal of Thermal Analysis*, 40(3), 931-939.
- Gordon, M., & Taylor, J. S. (1952). Ideal copolymers and the second-order transitions of synthetic rubbers. I. Non-crystalline copolymers. *Journal of Applied Chemistry*, 2(9), 493–500.
- Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. (2005a). Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: I. The effect on product recovery. *Journal of Food Engineering*, 66(1), 25-34.
- Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. (2005b). Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties. *Journal of Food Engineering*, 66(1), 35-42.
- Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. (2010). A new technique for spray drying orange juice concentrate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(2), 342-351.
- Goula, A. M., Karapantsios, T. D., Achilias, D. S., & Adamopoulos, K. G. (2008). Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. *Journal of Food Engineering*, 85(1), 73-83.
- Grabowski, J. A., Truong, V. D., & Daubert, C. R. (2006). Spray-drying of amylase hydrolyzed sweetpotato puree and physicochemical properties of powder. *Journal of Food Science*, 71(5), E209-E217.
- Herbach, K. M., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2004). Impact of thermal treatment on color and pigment pattern of red beet (*Beta vulgaris* L.) preparations. *Journal of Food Science*, 69(6), C491-C498.

- Herbach, K. M., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2006). Betalain stability and degradation—structural and chromatic aspects. *Journal of Food Science*, 71(4), R41-R50.
- Johari, G. P., Hallbrucker, A., & Mayer, E. (1987). The glass–liquid transition of hyperquenched water. *Nature*, 330(10), 552-553.
- Kenyon, M. M. (1995). Modified starch, maltodextrin, and corn syrup solids as wall materials for food encapsulation. In: Risch, S. J., & Reineccius, G. A. (Eds.), *Encapsulation and controlled release of food ingredients*. ACS Symposium Series, American Chemical Society, Washington, D.C., 590, 42–50.
- Kha, T. C., Nguyen, M. H., & Roach, P. D. (2010). Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder. *Journal of Food Engineering*, 98(3), 385-392.
- Konica minolta. (2014). Comunicación precisa de los colores. Espacio de color CIELAB. Recuperado de <http://www2.konicaminolta.eu/eu/Measuring/pcc/es/>
- Kurozawa, L. E., Park, K. J., & Hubinger, M. D. (2009). Effect of maltodextrin and gum arabic on water sorption and glass transition temperature of spray dried chicken meat hydrolysate protein. *Journal of Food Engineering*, 91(2), 287-296.
- Kuts, P. S., & Samsonyuk, V. K. (1989). Enhancement of spray drying of thermosensitive materials. *Drying Technology*, 7(1), 35-45.
- Labuza, T. P. (1975). Sorption phenomena in foods: Theoretical and practical aspects. In: Rha, C. (Ed.), *Theory, Determination and Control of Physical*

*Properties of food Materials*. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht-Holland/Boston-USA, 197-219.

Lee, K. H., Wu, T. Y., & Siow, L. F. (2013). Spray drying of red (*Hylocereus polyrhizus*) and white (*Hylocereus undatus*) dragon fruit juices: physicochemical and antioxidant properties of the powder. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(11), 2391-2399.

León-Martínez, F. M., Méndez-Lagunas, L. L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2010). Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 81(4), 864–870.

Liu, Y., Bhandari, B., & Zhou, W. (2006). Glass transition and enthalpy relaxation of amorphous food saccharides: a review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(16), 5701-5717.

Luna-Morales, C., Aguirre, R., & Peña, C. (2001). Cultivares tradicionales mixtecos de *Stenocereus pruinosus* y *S. stellatus* (Cactaceae). *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica*, 72, 131-155.

Ma, C. Y., Harwalkar, V. R., & Maurice, T. J. (1990). Instrumentation and techniques of thermal analysis in food research. In: Harwalkar, V. R., & Ma, C. Y. (Eds.), *Thermal analysis of food*. Elsevier, London, 1-15.

Marmion, D. (2012). Colorants for foods, drugs, and cosmetics. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 1–46.

Martínez, G. J. C., & Bonilla, B. J. J. (2005). Situación de la pitaya de mayo *Stenocereus pruinosus* (Otto) Buxbaum en tres localidades de la Mixteca Baja. *Revista de Geología Agrícola*, (34), 75-90.

- Martínez, N. N., Andrés, G. A. M., Chiralt, B. A., & Fito, M. P. (1998). Termodinámica y cinética de sistemas: alimento entorno. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Masters, K. (1991). Spray Drying Handbook. 5th ed. Longman Scientific & Technical, New York.
- Mercado, B. A., & Granados, S. D. (1999). La pitaya (*Tribu pachycereae*): Biología, ecología, fisiología sistemática, etnobotánica. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Moraga, G., Martínez-Navarrete, N., & Chiralt, A. (2006). Water sorption isotherms and phase transitions in kiwifruit. *Journal of Food Engineering*, 72(2), 147-156.
- Mosquera, L. H., Moraga, G., De Córdoba, P. F., & Martínez-Navarrete, N. (2011). Water content–water activity–glass transition temperature relationships of spray-dried borojó as related to changes in color and mechanical properties. *Food Biophysics*, 6(3), 397-406.
- Nijdam, J. J., & Langrish, T. A. G. (2006). The effect of surface composition on the functional properties of milk powders. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 919-925.
- Obón, J. M., Castellar, M. R., Alacid, M., & Fernández-López, J. A. (2009). Production of a red–purple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems. *Journal of Food Engineering*, 90(4), 471-479.
- Papadakis, S. E., Gardeli, C., & Tzia, C. (2006). Spray drying of raisin juice concentrate. *Drying Technology*, 24(2), 173-180.

- Phisut, N. (2012). Spray drying technique of fruit juice powder: some factors influencing the properties of product. *International Food Research Journal*, 19(4), 1297-1306.
- Quek, S. Y., Chok, N. K., & Swedlund, P. (2007). The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(5), 386-392.
- Quirijns, E. J., Van Boxtel, A. J. B., Van Loon, W. K. P., & Van Straten, G. (2005a). An improved experimental and regression methodology for sorption isotherms. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(2), 175-185.
- Quirijns, E. J., Van Boxtel, A. J. B., Van Loon, W. K. P., & Van Straten, G. (2005b). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(11), 1805-1814.
- Rahman, M. S. (1999). Glass transition and other structural changes in foods. In: Rahman, M. S. (Ed.), *Handbook of Food Preservation*. Marcel Dekker, New York, 75-93.
- Rizvi, S. S. H. (1986). Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: Rao, M. A., & Rizvi, S. S. H. (Eds.), *Engineering Properties of Foods*. Marcel Dekker, New York, 133-214.
- Roos, Y., & Karel, M. (1991). Phase transitions of mixtures of amorphous polysaccharides and sugars. *Biotechnology Progress*, 7(1), 49-53.
- Saéñz, C., Tapia, S., Chávez, J., & Robert, P. (2009). Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry*, 114(2), 616-622.

- Sant'Anna, V., Gurak, P. D., Marczak, L. D. F., & Tessaro, I. C. (2013). Tracking bioactive compounds with colour changes in foods – a review. *Dyes and Pigments*, *98*(3), 601-608.
- Shrestha, A. K., Ua-arak, T., Adhikari, B. P., Howes, T., & Bhandari, B. R. (2007). Glass transition behavior of spray dried orange juice powder measured by differential scanning calorimetry (DSC) and thermal mechanical compression test (TMCT). *International Journal of Food Properties*, *10*(3), 661-673.
- Shiga, H., Yoshii, H., Nishiyama, T., Furuta, T., Forssele, P., Poutanen, K., & Linko, P. (2001). Flavor encapsulation and release characteristics of spray-dried powder by the blended encapsulant of cyclodextrin and gum arabic. *Drying Technology*, *19*(7), 1385-1395.
- Sousa, A. S. D., Borges, S. V., Magalhães, N. F., Ricardo, H. V., & Azevedo, A. D. (2008). Spray-dried tomato powder: reconstitution properties and colour. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, *51*(4), 607-614.
- Stintzing, F. C., & Carle, R. (2007). Betalains—emerging prospects for food scientists. *Trends in Food Science & Technology*, *18*(10), 514-525.
- Şahin-Nadeem, H., Torun, M., & Özdemir, F. (2011). Spray drying of the mountain tea (*Sideritis stricta*) water extract by using different hydrocolloid carriers. *LWT - Food Science and Technology*, *44*(7), 1626-1635.
- Telis, V. R. N., & Martínez-Navarrete, N. (2010). Application of compression test in analysis of mechanical and color changes in grapefruit juice powder as related to glass transition and water activity. *LWT - Food Science and Technology*, *43*(5), 744-751.

- Tonon, R. V., Baroni, A. F., Brabet, C., Gilbert, O., Pallet, D., Hubinger, M. D. (2009). Water sorption and glass transition temperature of spray dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice. *Journal of Food Engineering*, 94(3), 215-221.
- Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2008). Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. *Journal of Food Engineering*, 88(3), 411-418.
- Tonon, R. V., Freitas, S. S., & Hubinger, M. D. (2011). Spray drying of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) juice: Effect of inlet air temperature and type of carrier agent. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(5), 691-700.
- Treybal, R. E. (1996). Operaciones de Transferencia de Masa. McGraw-Hill, México.
- Tze, N. L., Han, C. P., Yusof, Y. A., Ling, C. N., Talib, R. A., Taip, F. S., & Aziz, M. G. (2012). Physicochemical and nutritional properties of spray-dried pitaya fruit powder as natural colorant. *Food Science and Biotechnology*, 21(3), 675-682.
- Van den Berg, C. (1984). Desorption of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption. In: McKenna, B. M. (Ed.), *Engineering and Foods*. Elsevier Applied Science, New York, 311–321.
- Van den Berg, C., & Bruin, S. (1981). Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In: Rockland, L. B., & Stewart, G. T. (Eds.), *Water Activity: Influences on Food Quality*. Academic Press, New York, 147–177.
- Van der Plaats, G. (1984). A theoretical evaluation of a heat-flow differential scanning calorimeter. *Thermochimica Acta*, 72(1), 77-82.

- Walton, D. E., & Mumford, C. J. (1999). Spray dried products — characterization of particle morphology. *Chemical Engineering Research and Design*, 77(1), 21-38.
- Wandrey, C., Bartkowiak, A., & Harding, S. E. (2009). Materials for encapsulation. In: Zuidam, N. J., & Nedovic, V. A. (Eds.), *Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing*. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 31-100.
- Wang, H., Zhang, S., & Chen, G. (2008). Glass transition and state diagram for fresh and freeze-dried Chinese gooseberry. *Journal of Food Engineering*, 84(2), 307-312.
- Yunus, M. A. C., Lee, C. Y., & Idham, Z. (2011). Effects of variables on the production of red-fleshed pitaya powder using response surface methodology. *Jurnal Teknologi*, 56(1), 15-29.

## ANEXOS

### Anexo A. Ejemplo para calcular la cantidad de encapsulantes adicionados al jugo.

1 L de jugo de pitaya guinda de *S. griseus* tiene 87.55 g de sólidos totales, si se le adiciona un 60 % de encapsulantes (40/20 %, maltodextrina/pectina) en base a los sólidos, se le estarían agregando 35.02 g de maltodextrina y 17.51 g de pectina, en total serían 52.53 g de encapsulantes y si se le adiciona un 90 % (60/30 %, maltodextrina/pectina) de encapsulantes se le estarían agregando 52.53 g de maltodextrina y 26.27 g de pectina, en total serían 78.80 g de encapsulantes.

### Anexo B. Especificaciones del secador por aspersion Niro-atomizer

Tabla B.1. Especificaciones del secador por aspersion.

Tipo de secador	Mobile Minor, modelo básico
Cámara	Diámetro: 800 x 620 mm/ cono 60°, cámara interna de lámina de AISI 316, revestimiento de acero dulce pintado
Sistema de escape	Dia. Ciclón 140 CHE. Opción: filtro de cartucho
Calentamiento	Calentador eléctrico, 7.5 kW Temperatura máxima de entrada de 350 °C
Equipo de atomización	Atomizador rotatorio, con impulso neumático
Colector de polvos	Único punto en el marco del ciclón
Bomba	Bomba peristáltica, de control infinitamente variable, local. Consumo de potencia: 0.1 kW
Ventilador	Ventilador de escape Motor de ventilador: 0.25 kW / 2900 rpm
Velocidad de secado con temperatura de aire a la entrada de 200 °C	80 kg/h
Temperaturas máximas de operación	Aire a la entrada 350 °C (662 °F) Aire de salida 120 °C (248 °F)
Capacidad de Secado	Entre 1-7 kg de agua evaporada/h dependiendo de los parámetros escogidos
Requerimientos de secado	1800 x 925 x 2200 mm
Peso	280 kg

## Anexo C. Temperaturas del aire de salida del secador

Tabla C.1. Temperaturas del aire de salida ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Tratamiento	$T_s$ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	PG	OG	OR	OA
P1	$77.0 \pm 1.41$	$76.5 \pm 2.12$	$74.0 \pm 2.83$	$76.5 \pm 3.54$
P2	$92.0 \pm 2.83$	$90.5 \pm 3.54$	$93.5 \pm 3.54$	$90.5 \pm 4.95$
P3	$69.5 \pm 2.12$	$70.0 \pm 1.41$	$69.5 \pm 0.71$	$69.5 \pm 0.71$
P4	$89.5 \pm 0.71$	$83.0 \pm 4.24$	$85.0 \pm 1.41$	$81.5 \pm 0.71$
P5	$71.0 \pm 1.41$	$71.0 \pm 1.41$	$74.0 \pm 1.41$	$73.0 \pm 2.83$
P6	$92.0 \pm 1.41$	$93.5 \pm 0.71$	$90.0 \pm 2.83$	$88.0 \pm 2.83$
P7	$71.0 \pm 1.41$	$70.5 \pm 0.71$	$70.5 \pm 3.54$	$76.0 \pm 1.41$
P8	$84.0 \pm 2.83$	$84.0 \pm 4.24$	$83.0 \pm 1.41$	$81.0 \pm 1.41$

## Anexo D. Polvos de jugos de pitaya



Figura D.1. Recolección de polvo de las paredes del secador.

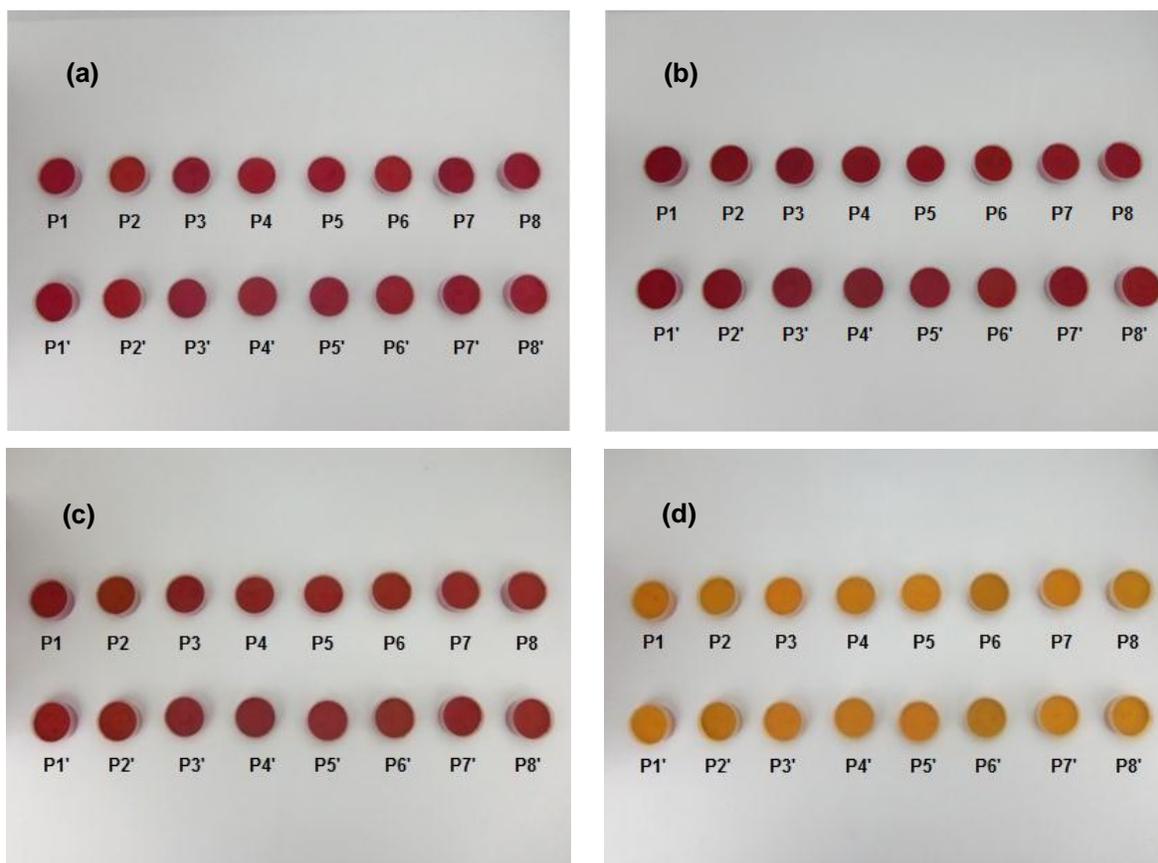


Figura D.2. Polvos de jugos de pitaya (a) PG, (b) OG, (c) OR y (d) OA.

## Anexo E. Contenido de humedad de polvos

Tabla E.1. Contenido de humedad de polvos PG y OG.

Tratamiento	PG		OG	
	$X_{bs}$	$X_{bh}$	$X_{bs}$	$X_{bh}$
P1	$0.0360 \pm 0.0009$	$0.0348 \pm 0.0008$	$0.0333 \pm 0.0008$	$0.0322 \pm 0.0008$
P1'	$0.0334 \pm 0.0011$	$0.0323 \pm 0.0010$	$0.0315 \pm 0.0014$	$0.0305 \pm 0.0013$
P2	$0.0290 \pm 0.0049$	$0.0282 \pm 0.0046$	$0.0234 \pm 0.0001$	$0.0229 \pm 0.0001$
P2'	$0.0306 \pm 0.0025$	$0.0297 \pm 0.0024$	$0.0292 \pm 0.0004$	$0.0284 \pm 0.0003$
P3	$0.0419 \pm 0.0018$	$0.0402 \pm 0.0017$	$0.0343 \pm 0.0009$	$0.0331 \pm 0.0008$
P3'	$0.0377 \pm 0.0030$	$0.0363 \pm 0.0028$	$0.0344 \pm 0.0064$	$0.0332 \pm 0.0060$
P4	$0.0359 \pm 0.0018$	$0.0347 \pm 0.0016$	$0.0248 \pm 0.0001$	$0.0242 \pm 0.0001$
P4'	$0.0329 \pm 0.0012$	$0.0319 \pm 0.0012$	$0.0314 \pm 0.0006$	$0.0305 \pm 0.0006$
P5	$0.0310 \pm 0.0047$	$0.0301 \pm 0.0045$	$0.0305 \pm 0.0046$	$0.0296 \pm 0.0043$
P5'	$0.0356 \pm 0.0018$	$0.0344 \pm 0.0017$	$0.0264 \pm 0.0009$	$0.0257 \pm 0.0009$
P6	$0.0287 \pm 0.0002$	$0.0279 \pm 0.0002$	$0.0201 \pm 0.0016$	$0.0197 \pm 0.0015$
P6'	$0.0261 \pm 0.0009$	$0.0254 \pm 0.0008$	$0.0209 \pm 0.0038$	$0.0204 \pm 0.0036$
P7	$0.0326 \pm 0.0025$	$0.0316 \pm 0.0023$	$0.0312 \pm 0.0014$	$0.0303 \pm 0.0013$
P7'	$0.0357 \pm 0.0035$	$0.0345 \pm 0.0033$	$0.0370 \pm 0.0002$	$0.0357 \pm 0.0002$
P8	$0.0323 \pm 0.0019$	$0.0313 \pm 0.0018$	$0.0265 \pm 0.0000$	$0.0259 \pm 0.0000$
P8'	$0.0267 \pm 0.0026$	$0.0260 \pm 0.0025$	$0.0292 \pm 0.0010$	$0.0284 \pm 0.0010$

Tabla E.2. Contenido de humedad de polvos OR y OA.

Tratamiento	OR		OA	
	$X_{bs}$	$X_{bh}$	$X_{bs}$	$X_{bh}$
P1	0.0359 ± 0.0027	0.0347 ± 0.0025	0.0375 ± 0.0015	0.0361 ± 0.0014
P1'	0.0414 ± 0.0037	0.0398 ± 0.0034	0.0349 ± 0.0045	0.0337 ± 0.0042
P2	0.0253 ± 0.0012	0.0247 ± 0.0012	0.0350 ± 0.0000	0.0338 ± 0.0000
P2'	0.0313 ± 0.0018	0.0303 ± 0.0017	0.0337 ± 0.0023	0.0326 ± 0.0021
P3	0.0500 ± 0.0060	0.0476 ± 0.0054	0.0416 ± 0.0012	0.0399 ± 0.0011
P3'	0.0476 ± 0.0002	0.0454 ± 0.0001	0.0432 ± 0.0005	0.0414 ± 0.0005
P4	0.0395 ± 0.0023	0.0380 ± 0.0021	0.0348 ± 0.0024	0.0337 ± 0.0022
P4'	0.0320 ± 0.0029	0.0310 ± 0.0027	0.0366 ± 0.0014	0.0353 ± 0.0013
P5	0.0367 ± 0.0032	0.0354 ± 0.0030	0.0342 ± 0.0009	0.0331 ± 0.0009
P5'	0.0364 ± 0.0029	0.0351 ± 0.0027	0.0339 ± 0.0022	0.0328 ± 0.0021
P6	0.0260 ± 0.0005	0.0253 ± 0.0005	0.0265 ± 0.0008	0.0258 ± 0.0007
P6'	0.0244 ± 0.0012	0.0238 ± 0.0012	0.0302 ± 0.0027	0.0293 ± 0.0025
P7	0.0379 ± 0.0008	0.0365 ± 0.0007	0.0339 ± 0.0029	0.0328 ± 0.0027
P7'	0.0367 ± 0.0015	0.0354 ± 0.0014	0.0350 ± 0.0046	0.0338 ± 0.0043
P8	0.0328 ± 0.0048	0.0318 ± 0.0045	0.0279 ± 0.0032	0.0271 ± 0.0031
P8'	0.0299 ± 0.0008	0.0291 ± 0.0007	0.0297 ± 0.0020	0.0288 ± 0.0019

## Anexo F. Rendimiento de polvos

Tabla F.1. Datos de rendimiento de polvos PG, OG, OR y OA.

Tratamiento	PG			OG			OR			OA		
	P <sub>p</sub> (g)	V <sub>M</sub> (L)	y (%)	P <sub>p</sub> (g)	V <sub>M</sub> (L)	y (%)	P <sub>p</sub> (g)	V <sub>M</sub> (L)	y (%)	P <sub>p</sub> (g)	V <sub>M</sub> (L)	y (%)
P1	131.88	1.550	60.10	32.36	0.310	65.97	48.22	0.515	67.44	63.12	0.620	61.76
P1'	128.53	1.550	58.72	34.52	0.310	70.49	26.48	0.310	61.20	34.43	0.319	67.54
P2	135.76	1.550	62.29	29.51	0.310	60.30	43.00	0.515	60.76	43.32	0.413	63.78
P2'	136.57	1.550	62.56	30.14	0.310	61.68	26.09	0.310	60.89	30.48	0.310	59.86
P3	127.90	1.550	57.96	38.83	0.413	59.36	44.25	0.515	61.06	63.52	0.620	61.90
P3'	136.10	1.550	61.92	30.52	0.310	62.15	25.63	0.310	58.89	32.77	0.310	63.77
P4	135.25	1.550	61.64	30.54	0.310	62.77	44.23	0.515	61.65	62.22	0.620	61.03
P4'	136.33	1.550	62.31	28.97	0.310	59.16	28.29	0.310	65.98	32.42	0.310	63.49
P5	61.32	0.515	68.99	32.28	0.260	67.98	50.84	0.413	74.57	85.97	0.620	72.90
P5'	58.62	0.515	65.66	34.01	0.260	71.91	23.17	0.206	68.16	42.83	0.310	72.66
P6	57.14	0.515	64.43	30.95	0.260	65.85	41.68	0.361	70.68	83.82	0.620	71.61
P6'	56.31	0.515	63.66	31.70	0.260	67.39	22.80	0.206	67.85	25.96	0.206	66.51
P7	56.51	0.515	63.48	32.24	0.260	67.85	51.07	0.413	74.82	87.15	0.620	73.92
P7'	57.99	0.515	64.94	31.01	0.260	64.90	24.17	0.206	71.08	42.77	0.310	72.48
P8	51.70	0.515	58.09	32.49	0.260	68.69	45.15	0.413	66.47	76.69	0.620	65.43
P8'	53.00	0.515	59.88	33.81	0.260	71.29	25.66	0.206	75.95	42.53	0.310	72.45

## Anexo G. Análisis de varianza de propiedades físicas de polvos

Tabla G.1. Análisis de varianza de datos de rendimiento de polvos PG.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	2.984256	2.984256	1.36	0.277228	0.177656
B: F <sub>a</sub>	1	16.38226	16.38226	7.46	0.025777*	0.668687
AB	1	2.138906	2.138906	0.97	0.352520	0.140804
C: E <sub>m/p</sub>	1	29.24106	29.24106	13.32	0.006498*	0.890206
AC	1	45.93451	45.93451	20.92	0.001816*	0.978220
BC	1	17.03626	17.03626	7.76	0.023714*	0.685461
ABC	1	0.2328063	0.2328063	0.11	0.753046	0.059592
S	8	17.56265	2.195331			
Total (Ajustado)	15	131.5127				
Total	16					

Tabla G.2. Análisis de varianza de datos de rendimiento de polvos OG.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	11.3569	11.3569	2.38	0.161668	0.274782
B: F <sub>a</sub>	1	14.8225	14.8225	3.10	0.116177	0.341998
AB	1	51.76802	51.76802	10.84	0.010989*	0.821239
C: E <sub>m/p</sub>	1	120.89	120.89	25.31	0.001013*	0.991942
AC	1	13.3956	13.3956	2.80	0.132546	0.314620
BC	1	13.3225	13.3225	2.79	0.133465	0.313205
ABC	1	0.065025	0.065025	0.01	0.909995	0.051226
S	8	38.215	4.776875			
Total (Ajustado)	15	263.8356				
Total	16					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

Tabla G.3. Análisis de varianza de datos de rendimiento de polvos OR.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	3.053756	3.053756	0.23	0.646592	0.070631
B: F <sub>a</sub>	1	1.182656	1.182656	0.09	0.774463	0.057941
AB	1	14.80326	14.80326	1.10	0.324965	0.152786
C: E <sub>m/p</sub>	1	321.3953	321.3953	23.88	0.001214*	0.988809
AC	1	4.378556	4.378556	0.33	0.584104	0.079702
BC	1	5.965806	5.965806	0.44	0.524304	0.090652
ABC	1	12.16266	12.16266	0.90	0.369652	0.134067
S	8	107.6836	13.46046			
Total (Ajustado)	15	470.6256				
Total	16					

Tabla G.4. Análisis de varianza de datos de rendimiento de polvos OA.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	32.40456	32.40456	3.82	0.086410	0.405564
B: F <sub>a</sub>	1	0.2889062	0.2889062	0.03	0.858187	0.053070
AB	1	0.7353063	0.7353063	0.09	0.775949	0.057832
C: E <sub>m/p</sub>	1	262.683	262.683	30.96	0.000532*	0.997870
AC	1	5.232656	5.232656	0.62	0.454880	0.106911
BC	1	0.7014062	0.7014062	0.08	0.781014	0.057470
ABC	1	1.953006	1.953006	0.23	0.644220	0.070937
S	8	67.87245	8.484056			
Total (Ajustado)	15	371.8713				
Total	16					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

Tabla G.5. Análisis de varianza de datos de contenido de humedad de polvos PG.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	2.174447	2.174447	24.88	0.000043*	0.997601
B: F <sub>a</sub>	1	0.8022011	0.8022011	9.18	0.005782*	0.828080
AB	1	3.370205E-03	3.370205E-03	0.04	0.845968	0.054087
C: E <sub>m/p</sub>	1	1.031766	1.031766	11.81	0.002158*	0.909165
AC	1	6.142512E-04	6.142512E-04	0.01	0.933881	0.050743
BC	1	0.2251876	0.2251876	2.58	0.121524	0.337908
ABC	1	1.653471E-02	1.653471E-02	0.19	0.667469	0.070229
S	24	2.097412	8.739217E-02			
Total (Ajustado)	31	6.351533				
Total	32					

Tabla G.6. Análisis de varianza de datos de contenido de humedad de polvos OG.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	3.503768	3.503768	37.19	0.000003*	0.999948
B: F <sub>a</sub>	1	1.405368	1.405368	14.92	0.000745*	0.959405
AB	1	1.232058E-02	1.232058E-02	0.13	0.720778	0.063937
C: E <sub>m/p</sub>	1	0.5185947	0.5185947	5.51	0.027551*	0.614793
AC	1	1.973588E-02	1.973588E-02	0.21	0.651270	0.072425
BC	1	0.443423	0.443423	4.71	0.040162*	0.548741
ABC	1	1.856183E-02	1.856183E-02	0.20	0.661093	0.071077
S	24	2.260818	9.420074E-02			
Total (Ajustado)	31	8.18259				
Total	32					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

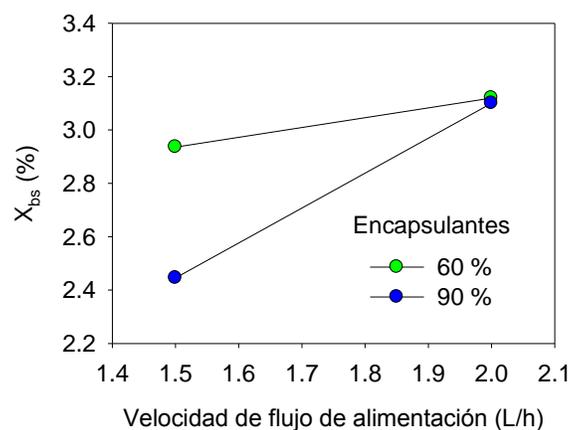


Figura G.1. Efecto de  $F_a - E_{m/p}$  sobre  $X_{bs}$  (%) de polvos OG.

Tabla G.7. Análisis de varianza de datos de contenido de humedad de polvos OR.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: $T_e$	1	8.257439	8.257439	75.71	0.000000*	1.000000
B: $F_a$	1	3.007256	3.007256	27.57	0.000022*	0.998936
AB	1	4.122756E-02	4.122756E-02	0.38	0.544447	0.090817
C: $E_{m/p}$	1	2.223413	2.223413	20.39	0.000142*	0.991062
AC	1	0.1850449	0.1850449	1.70	0.205078	0.239770
BC	1	0.5670593	0.5670593	5.20	0.031768*	0.590376
ABC	1	0.3277666	0.3277666	3.01	0.095819	0.383886
S	24	2.617434	0.1090597			
Total (Ajustado)	31	17.22664				
Total	32					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

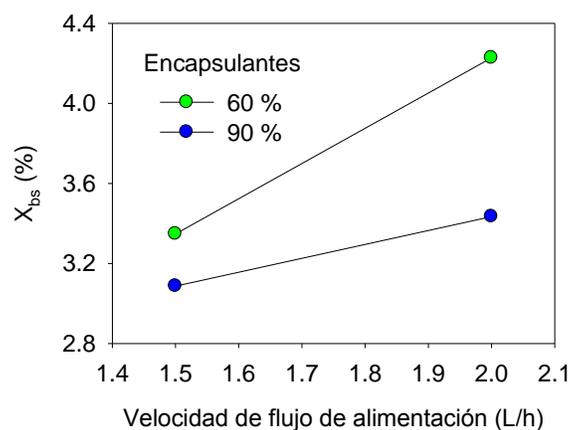


Figura G.2. Efecto de  $F_a - E_{m/p}$  sobre  $X_{bs}$  (%) de polvos OR.

Tabla G.8. Análisis de varianza de datos de contenido de humedad de polvos OA.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: $T_e$	1	1.973985	1.973985	37.32	0.000003*	0.999950
B: $F_a$	1	0.3535564	0.3535564	6.68	0.016229*	0.698809
AB	1	0.1166928	0.1166928	2.21	0.150470	0.297089
C: $E_{m/p}$	1	2.671401	2.671401	50.51	0.000000*	0.999999
AC	1	4.011528E-02	4.011528E-02	0.76	0.392445	0.133189
BC	1	0.2270032	0.2270032	4.29	0.049209*	0.511416
ABC	1	0.1187794	0.1187794	2.25	0.147025	0.301476
S	24	1.269405	5.289187E-02			
Total (Ajustado)	31	6.770938				
Total	32					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

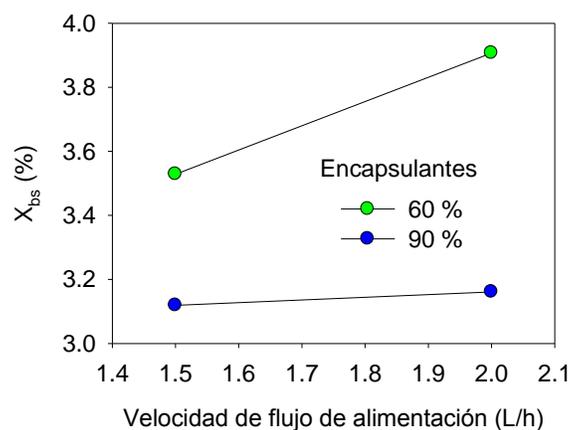


Figura G.3. Efecto de  $F_a - E_{m/p}$  sobre  $X_{bs}$  (%) de polvos OA.

Tabla G.9. Análisis de varianza de datos de luminosidad de polvos PG.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: $T_e$	1	18.86267	18.86267	23.91	0.000017*	0.997522
B: $F_a$	1	19.9821	19.9821	25.33	0.000011*	0.998407
AB	1	1.187552	1.187552	1.51	0.226987	0.223741
C: $E_{m/p}$	1	0.1354688	0.1354688	0.17	0.680777	0.068952
AC	1	10.57502	10.57502	13.41	0.000726*	0.946558
BC	1	1.668802	1.668802	2.12	0.153597	0.294873
ABC	1	1.290352	1.290352	1.64	0.208257	0.239045
S	40	31.55058	0.7887646			
Total (Ajustado)	47	85.25255				
Total	48					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

Tabla G.10. Análisis de varianza de datos de ángulo de tono de polvos PG.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	425.8421	425.8421	200.66	0.000000*	1.000000
B: F <sub>a</sub>	1	120.1118	120.1118	56.60	0.000000*	1.000000
AB	1	59.6525	59.6525	28.11	0.000005*	0.999338
C: E <sub>m/p</sub>	1	48.30047	48.30047	22.76	0.000025*	0.996464
AC	1	122.6561	122.6561	57.80	0.000000*	1.000000
BC	1	12.9065	12.9065	6.08	0.018043*	0.672422
ABC	1	3.712969	3.712969	1.75	0.193442	0.252355
S	40	84.88799	2.1222			
Total (Ajustado)	47	878.0704				
Total	48					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

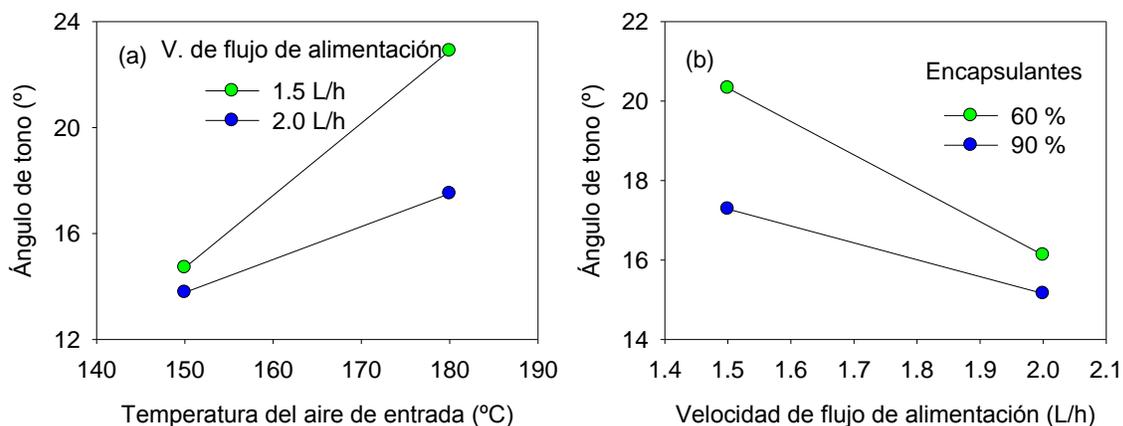


Figura G.4. Efecto de las condiciones de secado sobre h de polvos PG, (a) Efecto de T<sub>e</sub> - F<sub>a</sub> y (b) Efecto de F<sub>a</sub> - E<sub>m/p</sub>.

Tabla G.11. Análisis de varianza de datos de cromas de polvos PG.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	2.755208	2.755208	22.37	0.000028*	0.996014
B: F <sub>a</sub>	1	8.008333E-03	8.008333E-03	0.07	0.800045	0.057128
AB	1	0.9747	0.9747	7.91	0.007572*	0.783756
C: E <sub>m/p</sub>	1	24.11168	24.11168	195.75	0.000000*	1.000000
AC	1	0.4880333	0.4880333	3.96	0.053400	0.493125
BC	1	0.5808	0.5808	4.72	0.035886*	0.563257
ABC	1	7.008333E-03	7.008333E-03	0.06	0.812688	0.056234
S	40	4.927067	0.1231767			
Total (Ajustado)	47	33.8525				
Total	48					

Tabla G.12. Análisis de varianza de datos de luminosidad de polvos OG.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	2.279408	2.279408	5.98	0.019005*	0.664797
B: F <sub>a</sub>	1	1.695008	1.695008	4.44	0.041343*	0.538784
AB	1	0.4641333	0.4641333	1.22	0.276582	0.189751
C: E <sub>m/p</sub>	1	32.83521	32.83521	86.08	0.000000*	1.000000
AC	1	15.00803	15.00803	39.35	0.000000*	0.999984
BC	1	0.8965333	0.8965333	2.35	0.133123	0.321738
ABC	1	1.976408	1.976408	5.18	0.028256*	0.603138
S	40	15.25753	0.3814383			
Total (Ajustado)	47	70.41227				
Total	48					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

Tabla G.13. Análisis de varianza de datos de ángulo de tono de polvos OG.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: $T_e$	1	259.0052	259.0052	168.43	0.000000*	1.000000
B: $F_a$	1	66.17603	66.17603	43.04	0.000000*	0.999995
AB	1	31.59007	31.59007	20.54	0.000052*	0.993078
C: $E_{m/p}$	1	69.9867	69.9867	45.51	0.000000*	0.999998
AC	1	9.558675	9.558675	6.22	0.016896*	0.681915
BC	1	4.889633	4.889633	3.18	0.082143	0.413204
ABC	1	16.07767	16.07767	10.46	0.002453*	0.883955
S	40	61.50867	1.537717			
Total (Ajustado)	47	518.7927				
Total	48					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

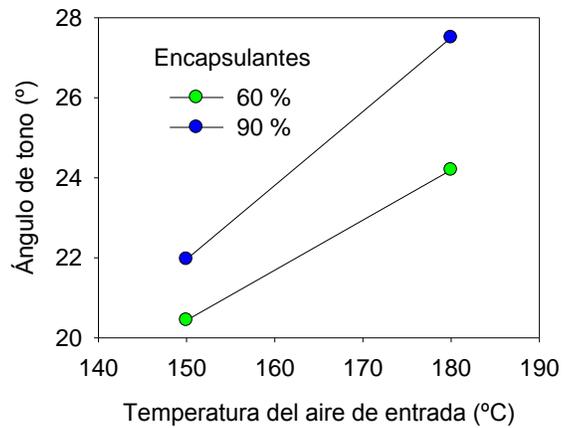


Figura G.5. Efecto de  $T_e - E_{m/p}$  sobre h de polvos OG.

Tabla G.14. Análisis de varianza de datos de cromas de polvos OG.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	12.87541	12.87541	57.75	0.000000*	1.000000
B: F <sub>a</sub>	1	3.008333E-03	3.008333E-03	0.01	0.908104	0.051474
AB	1	0.009075	0.009075	0.04	0.841129	0.054456
C: E <sub>m/p</sub>	1	1.235208	1.235208	5.54	0.023581*	0.631985
AC	1	1.222408	1.222408	5.48	0.024268*	0.627481
BC	1	9.900834E-02	9.900834E-02	0.44	0.508974	0.099715
ABC	1	0.102675	0.102675	0.46	0.501275	0.101596
S	40	8.9176	0.22294			
Total (Ajustado)	47	24.46439				
Total	48					

Tabla G.15. Análisis de varianza de datos de luminosidad de polvos OR.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	12.57677	12.57677	29.52	0.000003*	0.999579
B: F <sub>a</sub>	1	10.35092	10.35092	24.29	0.000015*	0.997796
AB	1	1.537252	1.537252	3.61	0.064741	0.457770
C: E <sub>m/p</sub>	1	24.211	24.211	56.82	0.000000*	1.000000
AC	1	0.6840187	0.6840187	1.61	0.212483	0.235452
BC	1	5.610169	5.610169	13.17	0.000799*	0.942963
ABC	1	0.4389187	0.4389187	1.03	0.316241	0.167791
S	40	17.04415	0.4261037			
Total (Ajustado)	47	72.4532				
Total	48					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

Tabla G.16. Análisis de varianza de datos de ángulo de tono de polvos OR.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	483.5526	483.5526	108.68	0.000000*	1.000000
B: F <sub>a</sub>	1	208.2917	208.2917	46.82	0.000000*	0.999999
AB	1	214.1653	214.1653	48.14	0.000000*	0.999999
C: E <sub>m/p</sub>	1	1.940052	1.940052	0.44	0.512819	0.098795
AC	1	24.9841	24.9841	5.62	0.022715*	0.637804
BC	1	16.32167	16.32167	3.67	0.062618	0.463941
ABC	1	27.28575	27.28575	6.13	0.017597*	0.676060
S	40	177.9649	4.449122			
Total (Ajustado)	47	1154.506				
Total	48					

Tabla G.17. Análisis de varianza de datos de cromas de polvos OR

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	1.505208	1.505208	2.36	0.132006	0.323328
B: F <sub>a</sub>	1	6.8403	6.8403	10.74	0.002168*	0.892198
AB	1	10.41603	10.41603	16.36	0.000232*	0.976488
C: E <sub>m/p</sub>	1	27.84653	27.84653	43.74	0.000000*	0.999996
AC	1	1.2675	1.2675	1.99	0.165968	0.280462
BC	1	1.519408	1.519408	2.39	0.130248	0.325860
ABC	1	2.679075	2.679075	4.21	0.046815*	0.516820
S	40	25.46467	0.6366166			
Total (Ajustado)	47	77.53873				
Total	48					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

Tabla G.18. Análisis de varianza de datos de luminosidad de polvos OA.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	26.13701	26.13701	46.57	0.000000*	0.999999
B: F <sub>a</sub>	1	9.882675	9.882675	17.61	0.000147*	0.983559
AB	1	19.8147	19.8147	35.30	0.000001*	0.999937
C: E <sub>m/p</sub>	1	0.5985333	0.5985333	1.07	0.307962	0.172059
AC	1	1.755675	1.755675	3.13	0.084580	0.407686
BC	1	0.6960083	0.6960083	1.24	0.272103	0.192492
ABC	1	0.0075	0.0075	0.01	0.908550	0.051460
S	40	22.45047	0.5612617			
Total (Ajustado)	47	81.34257				
Total	48					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

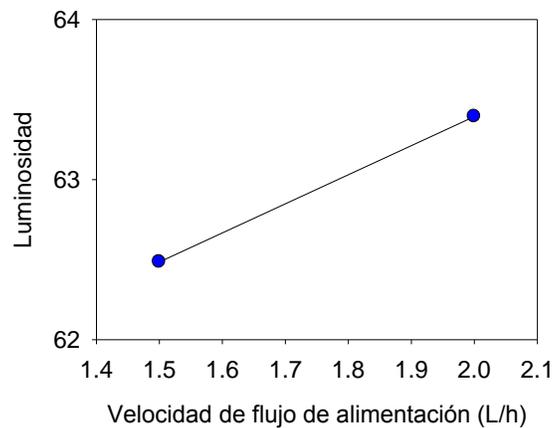


Figura G.6. Efecto de F<sub>a</sub> sobre L\* de polvos OA.

Tabla G.19. Análisis de varianza de datos de ángulo de tono de polvos OA.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	66.92963	66.92963	180.42	0.000000*	1.000000
B: F <sub>a</sub>	1	10.45333	10.45333	28.18	0.000004*	0.999353
AB	1	0.0588	0.0588	0.16	0.692653	0.067477
C: E <sub>m/p</sub>	1	0.7701333	0.7701333	2.08	0.157412	0.290296
AC	1	4.966533	4.966533	13.39	0.000731*	0.946283
BC	1	5.4675	5.4675	14.74	0.000430*	0.962903
ABC	1	5.333333E-04	5.333333E-04	0.00	0.969943	0.050157
S	40	14.8386	0.370965			
Total (Ajustado)	47	103.4851				
Total	48					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

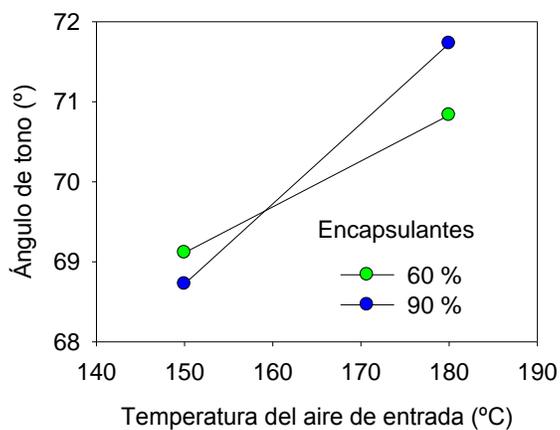


Figura G.7. Efecto de T<sub>e</sub> - E<sub>m/p</sub> sobre h de polvos OA.

Tabla G.20. Análisis de varianza de datos de cromas de polvos OA.

Fuente de variación	G.L.	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Nivel de probabilidad	Potencia ( $\alpha = 0.05$ )
A: T <sub>e</sub>	1	71.54083	71.54083	133.49	0.000000*	1.000000
B: F <sub>a</sub>	1	11.82067	11.82067	22.06	0.000031*	0.995617
AB	1	0.0003	0.0003	0.00	0.981242	0.050061
C: E <sub>m/p</sub>	1	29.2032	29.2032	54.49	0.000000*	1.000000
AC	1	22.88041	22.88041	42.69	0.000000*	0.999995
BC	1	1.020833	1.020833	1.90	0.175209	0.270454
ABC	1	8.333333E-06	8.333333E-06	0.00	0.996873	0.050002
S	40	21.43727	0.5359316			
Total (Ajustado)	47	157.9035				
Total	48					

\* Término significativo en  $\alpha = 0.05$

## Anexo H. Contenido de humedad al equilibrio de polvos

Tabla H.1. Contenido de humedad al equilibrio de polvos PG.

$a_w$	$X_{eq}$ (g H <sub>2</sub> O/g s.s)							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
0.05	0.00091382	0.00001987	0.00145962	0.00112099	0.00116212	0.00139640	0.00210887	0.00070112
0.10	0.00305496	0.00118105	0.00320875	0.00292917	0.00307908	0.00332728	0.00348563	0.00310985
0.15	0.00807976	0.00417889	0.00757170	0.00677339	0.00691326	0.00661042	0.00703926	0.00715983
0.20	0.02059987	0.01251642	0.02103880	0.01858113	0.01751096	0.01436523	0.01580804	0.01517564
0.25	0.04355646	0.03104827	0.04445472	0.04096234	0.03696318	0.03059069	0.03287235	0.03171159
0.30	0.06259324	0.05761301	0.06430390	0.06259693	0.05854815	0.05443615	0.05426397	0.05362902
0.40	0.09560637	0.09999927	0.09802461	0.09551613	0.09153650	0.08885998	0.09156676	0.08773394
0.50	0.13884920	0.14476797	0.14147307	0.13844166	0.13248983	0.12853772	0.13180496	0.12800547
0.60	0.19711575	0.20554934	0.20172570	0.19280055	0.18877991	0.18290096	0.18740847	0.18343698
0.70	0.28759273	0.29499941	0.29415118	0.28463185	0.27133181	0.26368135	0.27033561	0.26701928
0.80	0.44268389	0.46651237	0.45498252	0.43422782	0.41442172	0.40506873	0.41430291	0.40989065

Tabla H.2. Contenido de humedad al equilibrio de polvos OG y OA.

$a_w$	$X_{eq}$ (g H <sub>2</sub> O/g s.s.)				
	OG			OA	
	P3	P7	P8	P3	P7
0.05	0.00092236	0.00102248	0.00005697	0.00143978	0.00124312
0.10	0.00295999	0.00290975	0.00221909	0.00323997	0.00361250
0.15	0.00687135	0.00604797	0.00540312	0.00761903	0.00794030
0.20	0.01718417	0.01375913	0.01238524	0.01982293	0.01749256
0.25	0.03682079	0.02942975	0.02719798	0.04134003	0.03515087
0.30	0.05853284	0.05213968	0.05058051	0.06074497	0.05652303
0.40	0.09336709	0.08701620	0.08520151	0.09544131	0.09070675
0.50	0.13546956	0.12768322	0.12540969	0.13757316	0.13066462
0.60	0.19400479	0.18229127	0.17979698	0.19658203	0.18726714
0.70	0.28337631	0.26414665	0.26303373	0.28403049	0.27167191
0.80	0.43470417	0.40668879	0.40705872	0.43839667	0.41570016

## Anexo I. Fracción de masa de agua de polvos

Tabla I.1. Fracción de masa de agua de polvos PG.

$a_w$	$x_w$ (g H <sub>2</sub> O/g s.h.)							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
0.05	0.00091298	0.00001987	0.00145749	0.00111973	0.001160766	0.00139445	0.00210443	0.00070063
0.10	0.00304565	0.00117965	0.00319849	0.00292061	0.003069625	0.00331625	0.00347352	0.00310020
0.15	0.00801500	0.00416150	0.00751480	0.00672782	0.006865799	0.00656701	0.00699005	0.00710893
0.20	0.02018408	0.01236169	0.02060529	0.01824217	0.017209604	0.01416179	0.01556204	0.01494879
0.25	0.04173848	0.03011330	0.04256261	0.03935045	0.035645607	0.02968268	0.03182615	0.03073687
0.30	0.05890612	0.05447457	0.06041874	0.05890939	0.055309859	0.05162584	0.05147096	0.05089933
0.40	0.08726343	0.09090849	0.08927360	0.08718824	0.083860229	0.08160827	0.08388562	0.08065754
0.50	0.12192062	0.12646054	0.12393904	0.12160628	0.116989864	0.11389758	0.11645554	0.11347947
0.60	0.16465889	0.17050264	0.16786335	0.16163687	0.158801398	0.15462069	0.15782982	0.15500359
0.70	0.22335691	0.22779888	0.22729275	0.22156686	0.213423284	0.20866127	0.21280645	0.21074603
0.80	0.30684746	0.31811008	0.31270652	0.30276070	0.292997280	0.28829104	0.29293789	0.29072513

A partir de los datos de la Tabla I.1 se realizaron interpolaciones para obtener la fracción de masa de agua ( $x_w$ ) de polvos PG para diferentes  $a_w$  (0.11, 0.33, 0.43 y 0.53).

Tabla I.2. Fracción de masa de agua de polvos PG.

$a_w$	$x_w$ (g H <sub>2</sub> O/g s.h.)							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
0.11	0.00403952	0.00177602	0.00406175	0.00368205	0.00382886	0.00396640	0.00417683	0.00390195
0.33	0.06741331	0.06540474	0.06907520	0.06739304	0.06387497	0.06062057	0.06119536	0.05982680
0.43	0.09766059	0.10157410	0.09967323	0.09751366	0.09379912	0.09129506	0.09365660	0.09050412
0.53	0.13474210	0.13967317	0.13711633	0.13361546	0.12953332	0.12611452	0.12886783	0.12593671

Tabla I.3. Fracción de masa de agua de polvos OG y OA.

$a_w$	$x_w$ (g H <sub>2</sub> O/g s.h.)				
	OG			OA	
	P3	P7	P8	P3	P7
0.05	0.00092151	0.00102143	0.00005697	0.00143771	0.00124158
0.10	0.00295126	0.00290131	0.00221418	0.00322951	0.00359950
0.15	0.00682446	0.00601161	0.00537409	0.00756142	0.00787775
0.20	0.01689387	0.01357239	0.01223372	0.01943762	0.01719183
0.25	0.03551318	0.02858840	0.02647784	0.03969888	0.03395724
0.30	0.05529619	0.04955585	0.04814530	0.05726633	0.05349910
0.40	0.08539409	0.08005051	0.07851216	0.08712590	0.08316328
0.50	0.11930708	0.11322614	0.11143471	0.12093566	0.11556443
0.60	0.16248242	0.15418474	0.15239654	0.16428629	0.15772957
0.70	0.22080531	0.20895254	0.20825550	0.22120229	0.21363365
0.80	0.30299220	0.28911071	0.28929761	0.30478148	0.29363574

A partir de los datos de la Tabla I.3 se realizaron interpolaciones para obtener la fracción de masa de agua ( $x_w$ ) de polvos OG y OA para diferentes  $a_w$  (0.11, 0.33, 0.43 y 0.53).

Tabla I.4. Fracción de masa de agua de polvos OG y OA.

$a_w$	$x_w$ (g H <sub>2</sub> O/g s.h.)				
	OG			OA	
	P3	P7	P8	P3	P7
0.11	0.00372590	0.00352337	0.00284616	0.00409589	0.00445515
0.33	0.06432556	0.05870425	0.05725536	0.06622420	0.06239835
0.43	0.09556799	0.09000320	0.08838892	0.09726883	0.09288363
0.53	0.13225968	0.12551372	0.12372326	0.13394085	0.12821398

**ANEXO J. Relación temperatura de transición vítrea-actividad de agua y contenido de humedad al equilibrio-actividad de agua de polvos.**

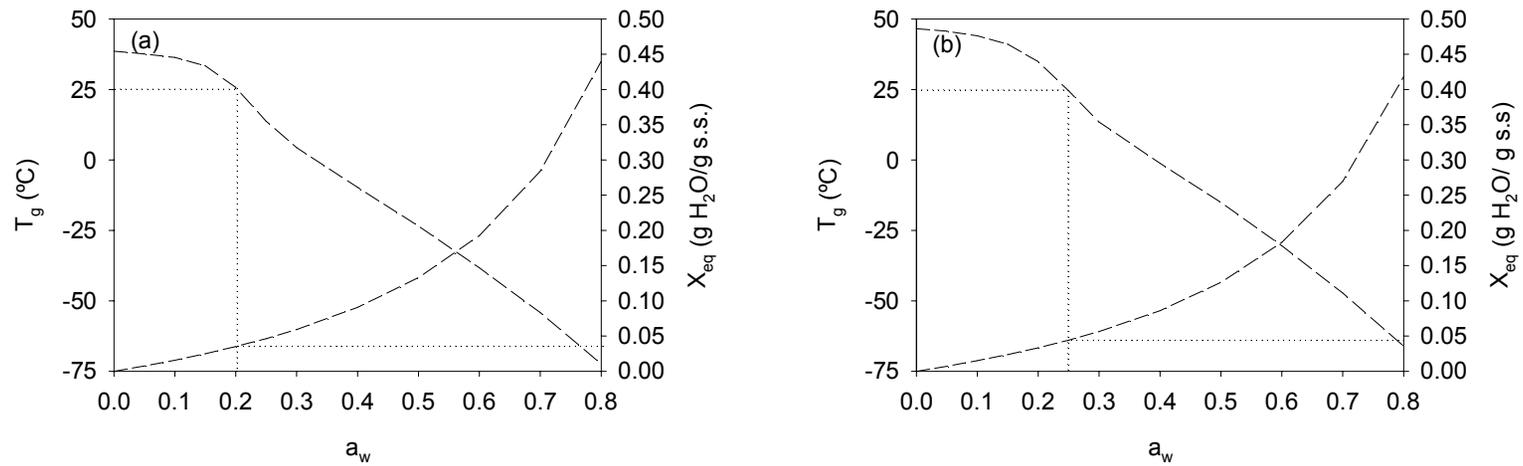


Figura J.1. Relación temperatura de transición vítrea-actividad de agua y contenido de humedad al equilibrio-actividad de agua de polvos OA, a) P3 y b) P7.

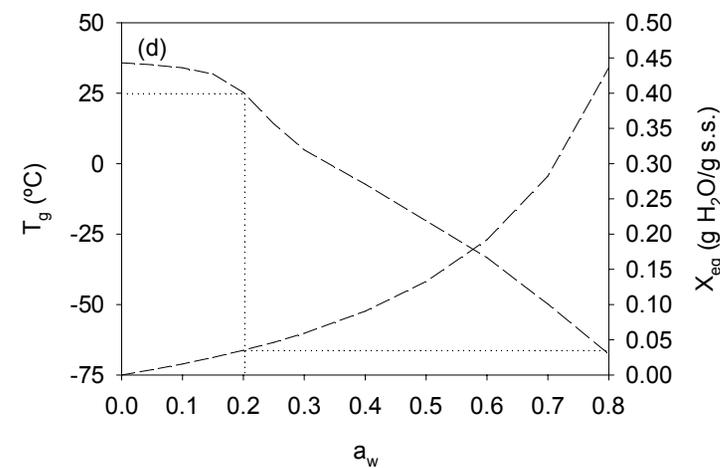
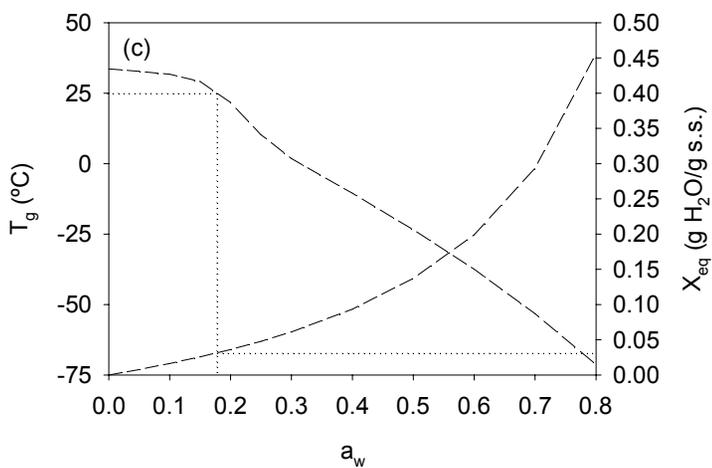
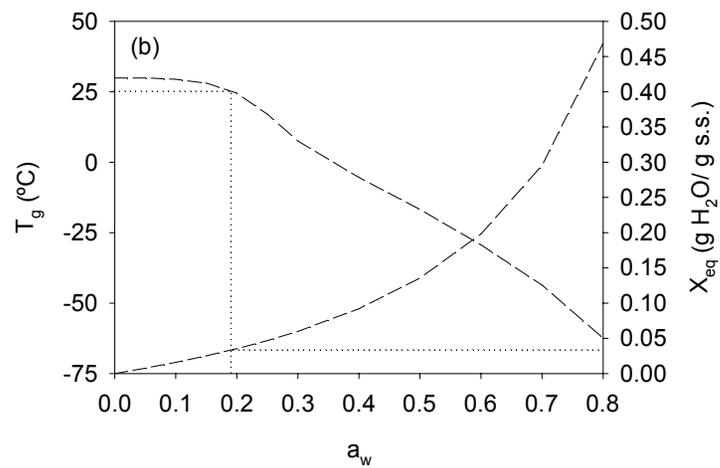
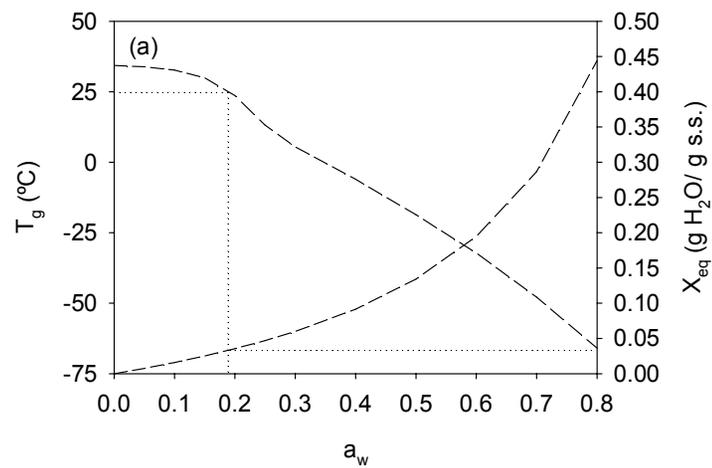


Figura J.2. Relación temperatura de transición vítrea-actividad de agua y contenido de humedad al equilibrio-actividad de agua de polvos PG, a) P1, b) P2, c) P3 y (d) P4.

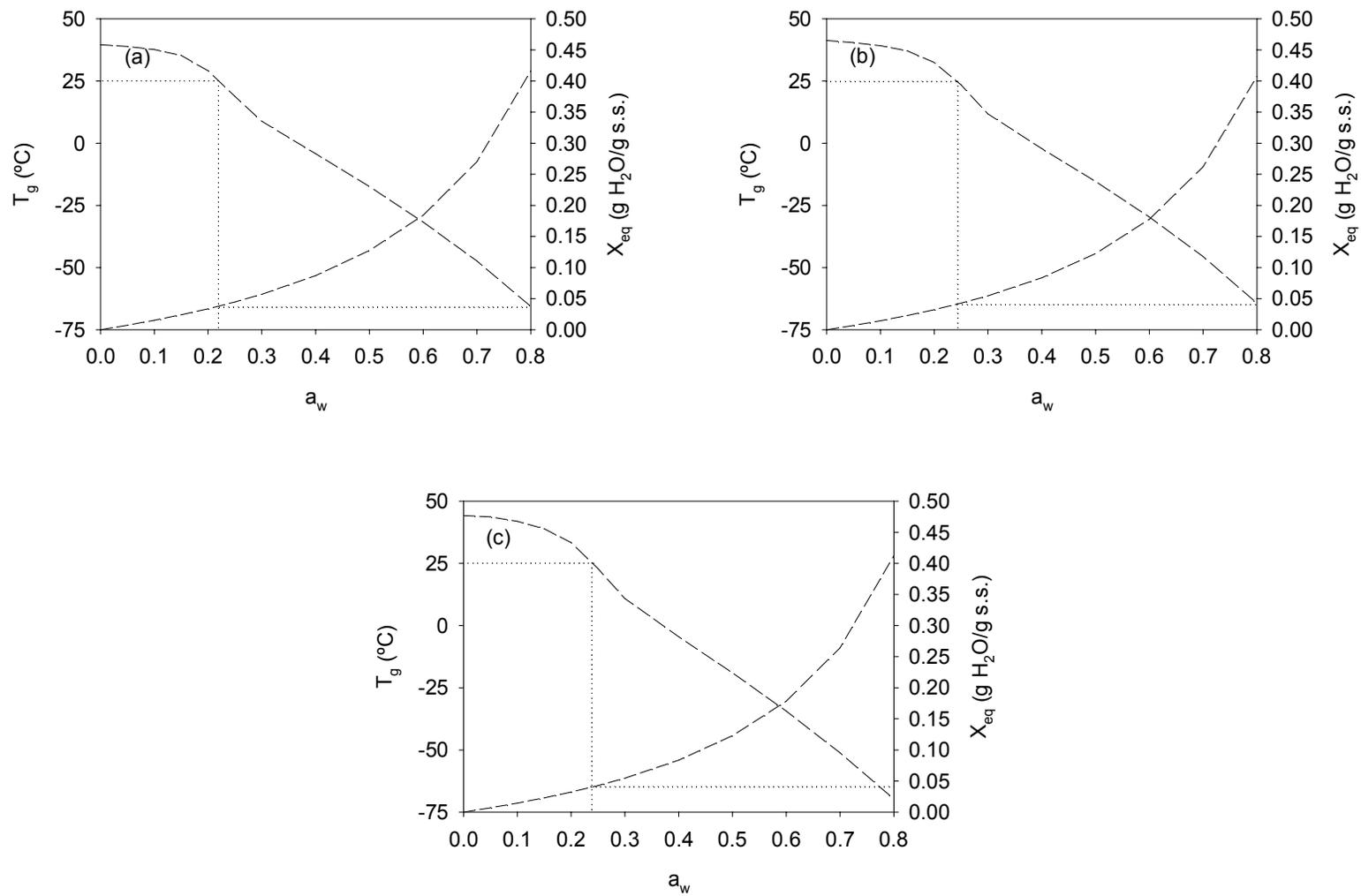


Figura J.3. Relación temperatura de transición vítrea-actividad de agua y contenido de humedad al equilibrio-actividad de agua de polvos PG, a) P5, b) P6 y (c) P8.

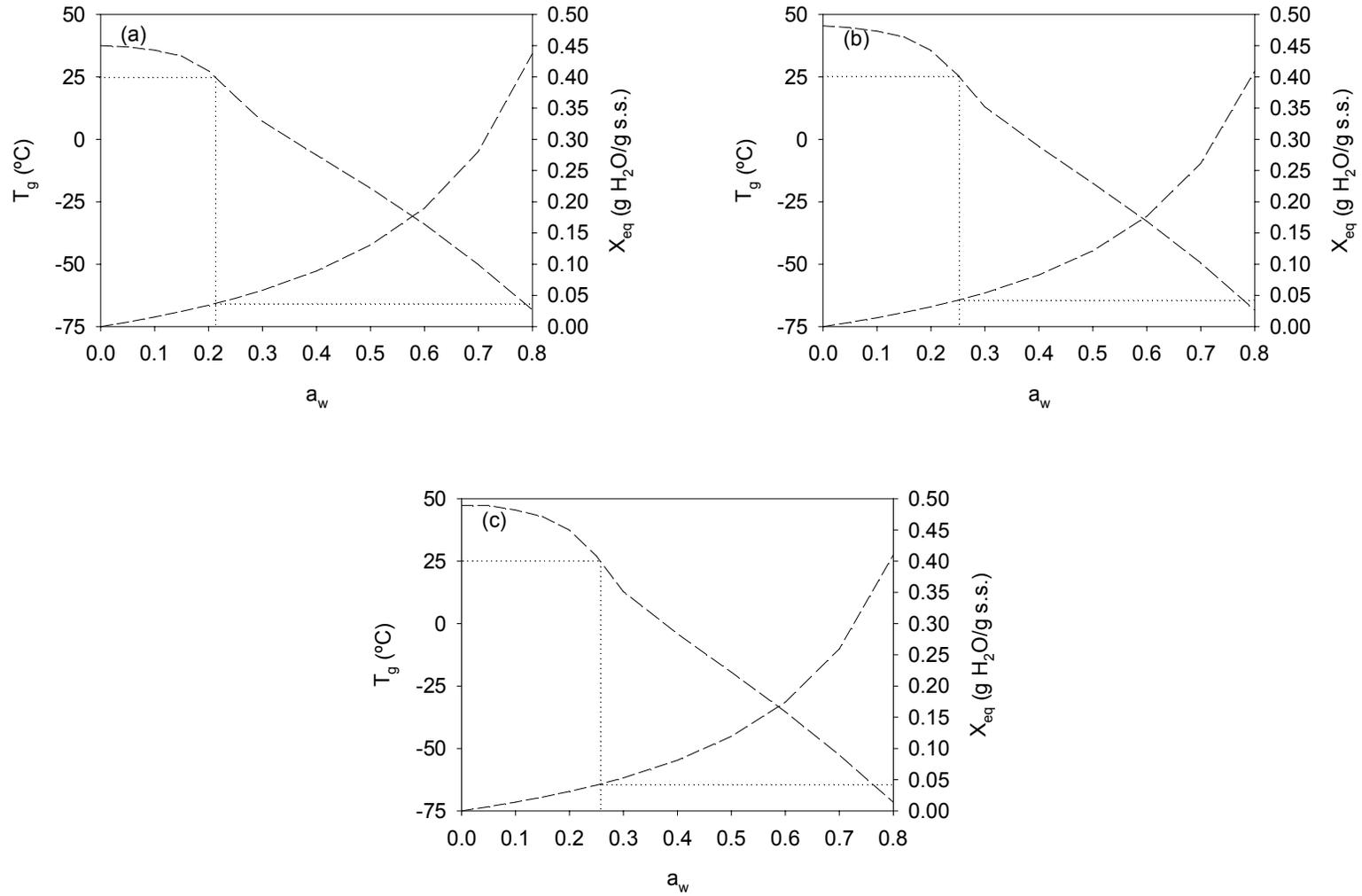


Figura J.4. Relación temperatura de transición vítrea-actividad de agua y contenido de humedad al equilibrio-actividad de agua de polvos OG, a) P3, b) P7 y (c) P8.