



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE  
ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO  
POLITÉCNICO NACIONAL**

**UNIDAD QUERÉTARO**

**Obtención y caracterización de productos directamente  
expandidos por extrusión y botanas de tercera generación  
conteniendo almidón resistente.**

Tesis que presenta

**I.Q. Amira Daniela Calvo López**

para obtener el Grado de

**Maestra en Ciencias**

en la Especialidad de

**Materiales**

Director de la Tesis:

**Dr. Fernando Martínez Bustos**

Santiago de Querétaro, Qro. Enero 2012



CO 00178  
CO-103-SS1  
24-08-2012  
Don - 2012

ID: 199434-2001



## DEDICATORIA

*A Dios por permitirme realizar este proyecto de vida acompañada de mi familia y amigos, por cuidarme en mi camino.*

*A mi esposo José de Jesús Lozano Villanueva por apoyarme y amarme en este ciclo de mi vida, por mostrarme que todos los sacrificios valen la pena para un porvenir mejor.  
Por estar siempre conmigo en los buenos y malos momentos.*

*A mis padres Leticia Gabriela López Cruz y Diego Calvo Méndez, por sus enseñanzas, amor y apoyo brindado durante toda mi vida, por ser mi mas grande ejemplo. Gracias por enseñarme a superar las pruebas más grandes que la vida me ha puesto en el camino.*

*A mis hermanos Álvaro Sebastián Calvo López y Diego Calvo López por ser mis amigos y cómplices en la vida por ser mi impulso a superarme, por darme su amor y apoyo.*

*A mis abuelas María Luisa Cruz Meza y Julia Méndez Roque, por preocuparse siempre de mi bienestar aunque estuviera lejos de casa.*

*A mis tíos Mariela, Margarita, Ana<sup>†</sup>, Silvia, Enrique y a sus familias por mostrarme la fortaleza que puede tener una familia unida. Por enseñarme que trabajando en equipo y con cariño, todas las dificultades se pueden vencer.*



## AGRADECIMIENTOS

- A CINVESTAV Querétaro y al Colegio de Profesores, por darme la aceptación al programa de Maestría y el apoyo para permanecer hasta el final.
- Al Dr. Fernando Martínez Bustos, por la oportunidad que me dio de realizar este proyecto a su cargo y por sus aportaciones a este trabajo.
- A cada miembro del Comité de Tesis, Dr. Juan de Dios Cárdenas Figueroa y Dra. Silvia Amaya Llano, por sus contribuciones para mejorar este trabajo.
- A todos los auxiliares de laboratorio: especialmente M.C. Marcela Gaytán, M.C. Juan Vélez y M.C. Edmundo Gutiérrez, por su oportuno apoyo en el laboratorio y en las técnicas de análisis de su especialidad, además de brindarme su amistad fuera de los laboratorios.
- A todos los compañeros que conocí en el laboratorio 7 y me brindaron su amistad: Paty, Fany, Nalle, Mara, Lili, Carol, Ivan, Richo, Tomás.
- A mis compañeros de generación y amigos: Rodrigo Fernández Loyola, Emilia Olivos Lagunes, Alfredo Beristain, Carlos García y Eleazar León por las experiencias compartidas durante nuestro paso por el posgrado.
- A una gran amiga que siempre me ayudó en los momentos difíciles, Ale.
- A Virginia Villanueva, Ricardo Lozano y María Lozano, por su apoyo.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado a través de la beca.
- Q. en A. Martín Adelaido Landaverde y al Ing. José Eleazar Urbina Álvarez del Laboratorio de Caracterización de Materiales (Rayos X y Microscopia) del CINVESTAV Unidad Qro., por su colaboración.



## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	xii
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	3
2. MARCO TEÓRICO .....	5
2.1 Botanas.....	5
2.1.1 Aspectos generales .....	5
2.1.2 Producción y consumo.....	6
2.1.3 Clasificación.....	7
2.1.4 Elaboración.....	8
2.1.4.1 Botanas elaboradas por el proceso de extrusión.....	9
2.2 Materias primas (Papa).....	16
2.2.1 Almidón.....	18
2.2.2 Almidones modificados .....	31
2.2.2.1 Modificaciones químicas del almidón.....	32
2.3 Proceso tecnológico utilizado.....	40
2.3.1 Extrusión.....	40
3. JUSTIFICACIÓN .....	46
4. OBJETIVOS.....	47
4.1 Objetivo general .....	47



4.2 Objetivos específicos .....	47
5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	48
5.1 Preparación de la materia prima .....	48
5.1.1 Botana control.....	48
5.1.2 Botanas con almidón resistente obtenido por fosfatación.....	48
5.1.3 Botanas con almidón resistente obtenido por succinatación .....	48
5.2 Elaboración de Botanas .....	49
5.2.1 Productos directamente expandidos (Botanas de 2ª generación) .....	49
5.2.2 Botanas de 3ª generación.....	49
5.4 Caracterización de propiedades fisicoquímicas y mecánicas .....	50
5.4.1 Índice de expansión ( <i>IE</i> ) .....	50
5.4.1.1 Productos directamente expandidos (Botanas de 2ª generación) ..	50
5.4.1.2 Botanas de 3ª generación .....	51
5.4.2 Densidad aparente ( <i>DA</i> ) .....	51
5.4.2.1 Productos directamente expandidos (Botanas de 2ª generación) ..	51
5.4.2.2 Botanas de 3ª generación .....	51
5.4.3 Luminosidad ( <i>L</i> ) .....	52
5.4.4 Índice de absorción de agua ( <i>IAA</i> ) e índice de solubilidad en agua ( <i>ISA</i> ).....	53
5.4.5 Fuerza de penetración ( <i>FP</i> ) .....	53
5.4.6 Determinación de almidón resistente ( <i>AR</i> ) .....	54
5.4.7 Determinación de grado de sustitución ( <i>GS</i> ) .....	54
5.4.7.1 Grado de sustitución de almidones fosfatados .....	54
5.4.7.2 Grado de sustitución de almidones succinatados.....	55
5.6 Caracterización de propiedades estructurales y térmicas.....	55



5.6.1	Calorimetría diferencial de barrido ( <i>DSC</i> ) .....	55
5.6.2	Difractometría de rayos <i>X</i> .....	56
5.6.3	Microscopía electrónica de barrido ( <i>SEM</i> ) .....	57
5.6.4	Perfiles de viscosidad ( <i>RVA</i> ) .....	57
5.7	Análisis estadístico.....	58
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
6.1	Productos directamente expandidos (Botanas de 2ª generación).....	59
6.1.1	Propiedades fisicoquímicas y de textura.....	60
6.1.1.1	Índice de expansión ( <i>IE</i> ).....	60
6.1.1.2	Densidad aparente ( <i>DA</i> ).....	68
6.1.1.3	Luminosidad ( <i>L</i> ).....	74
6.1.1.4	Índice de absorción de agua ( <i>IAA</i> ) e índice de solubilidad en agua ( <i>ISA</i> ) .....	80
6.1.1.5	Fuerza de penetración ( <i>FP</i> ).....	89
6.1.1.6	Selección de los mejores tratamientos .....	93
6.1.1.7	Grado de sustitución ( <i>GS</i> ) .....	93
6.1.1.8	Almidón resistente ( <i>AR</i> ).....	95
6.1.2	Propiedades estructurales y térmicas.....	96
6.1.2.1	Calorimetría diferencial de Barrido ( <i>DSC</i> ) .....	96
6.1.2.2	Difractometría de rayos <i>X</i> .....	98
6.1.2.3	Microscopía electrónica de barrido ( <i>SEM</i> ).....	100
6.1.2.4	Perfiles de viscosidad ( <i>RVA</i> ) .....	103
6.2	Botanas de 3ª generación.....	104
6.2.1	Propiedades fisicoquímicas y de textura.....	106
6.2.1.1	Índice de expansión ( <i>IE</i> ).....	106



6.2.1.2 Densidad aparente ( <i>DA</i> ).....	115
6.2.1.3 Luminosidad ( <i>L</i> ).....	121
6.2.1.4 Índice de absorción de agua ( <i>IAA</i> ) e índice de solubilidad en agua ( <i>ISA</i> ) .....	124
6.2.1.5 Fuerza de penetración ( <i>FP</i> ).....	131
6.2.1.6 Selección de los mejores tratamientos .....	136
6.2.1.7 Grado de sustitución ( <i>GS</i> ) .....	136
6.2.1.8 Almidón resistente ( <i>AR</i> ).....	138
6.2.2 Propiedades estructurales y térmicas.....	140
6.2.2.1 Calorimetría diferencial de Barrido ( <i>DSC</i> ) .....	140
6.2.2.2 Difractometría de rayos X.....	141
6.2.2.3 Microscopía electrónica de barrido ( <i>SEM</i> ).....	143
6.2.2.4 Perfiles de viscosidad ( <i>RVA</i> ) .....	146
7. PERSPECTIVAS.....	148
8. CONCLUSIONES .....	149
9. APÉNDICES .....	151
10. BIBLIOGRAFÍA .....	159



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Preferencias de alimentos tipo botana en México.....	7
Tabla 2. Valor nutricional por cada 100g de papa cruda con cáscara.....	18
Tabla 3. Propiedades generales de los almidones nativos. ....	24
Tabla 4. Tipos de almidón resistente. ....	26
Tabla 5. Efectos fisiológicos de almidón resistente.....	29
Tabla 6. Propiedades de los almidones modificados .....	32
Tabla 7. Análisis de varianza para el índice de expansión ( <i>IE</i> ), Densidad aparente ( <i>DA</i> ), Índice de absorción de agua ( <i>IAA</i> ), Índice de solubilidad en agua ( <i>ISA</i> ), Fuerza de penetración ( <i>FP</i> ) y Luminosidad ( <i>L</i> ) de productos directamente expandidos (botanas de segunda generación). ....	61
Tabla 8. Diseño experimental utilizado y variables de respuesta: índice de expansión ( <i>IE</i> ), densidad aparente ( <i>DA</i> ), índice de absorción de agua ( <i>IAA</i> ), índice de solubilidad en agua ( <i>ISA</i> ), fuerza de penetración ( <i>FP</i> ) y luminosidad ( <i>L</i> ) para botana control de productos directamente expandidos.....	62
Tabla 9. Coeficientes de regresión del modelo y nivel de significancia para las para las variables de respuesta: índice de expansión ( <i>IE</i> ), densidad aparente ( <i>DA</i> ), índice de absorción de agua ( <i>IAA</i> ), índice de solubilidad en agua ( <i>ISA</i> ), fuerza de penetración ( <i>FP</i> ) y luminosidad ( <i>L</i> ) de los productos directamente expandidos (botanas de segunda generación). ....	63
Tabla 10. Resultados correspondientes a los mejores tratamientos de las botanas directamente expandidas.....	93
Tabla 11. Grado de sustitución de almidones fosfatados de productos directamente expandidos. ....	94
Tabla 12. Grado de sustitución de almidones succinatados de productos directamente expandidos. ....	94
Tabla 13. Contenido de almidón resistente en productos directamente expandidos.....	95



Tabla 14. Análisis de varianza para el índice de expansión ( <i>IE</i> ), Densidad aparente ( <i>DA</i> ), Índice de absorción de agua ( <i>IAA</i> ), Índice de solubilidad en agua ( <i>ISA</i> ), Fuerza de penetración ( <i>FP</i> ) y Luminosidad ( <i>L</i> ) de botanas de tercera generación. ....	108
Tabla 15. Diseño experimental utilizado y variables de respuesta: índice de expansión ( <i>IE</i> ), densidad aparente ( <i>DA</i> ), índice de absorción de agua ( <i>IAA</i> ), índice de solubilidad en agua ( <i>ISA</i> ), fuerza de penetración ( <i>FP</i> ) y luminosidad ( <i>L</i> ) para botanas de 3ª generación. ....	109
Tabla 16. Coeficientes de regresión del modelo y nivel de significancia para las para las variables de respuesta: índice de expansión ( <i>IE</i> ), densidad aparente ( <i>DA</i> ), índice de absorción de agua ( <i>IAA</i> ), índice de solubilidad en agua ( <i>ISA</i> ), fuerza de penetración ( <i>FP</i> ) y luminosidad ( <i>L</i> ) de botanas de tercera generación. ....	110
Tabla 17. Resultados correspondientes a los mejores tratamientos de las botanas de tercera generación.....	136
Tabla 18. Grado de sustitución de almidones fosfatados de botanas de tercera generación. ....	136
Tabla 19. Grado de sustitución de almidones succinatados de botanas de tercera generación. ....	138
Tabla 20. Contenido de almidón resistente en botanas de tercera generación. ....	139



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Papa ( <i>Solanum tuberosum</i> ). .....	17
Figura 2. Ejemplos de alimentos que contienen almidón. ....	19
Figura 3. Estructura química de la amilosa .....	21
Figura 4. Estructura química de la amilopectina. ....	22
Figura 5. Modificaciones químicas del almidón. ....	33
Figura 6. Diseño genérico de un extrusor. ....	41
Figura 7. Fusión de materia prima. ....	42
Figura 8. Partes de un extrusor. ....	45
Figura 9. Esquema de elaboración de botanas de 2ª generación. ....	49
Figura 10. Esquema de elaboración de botanas de 3ª generación. ....	50
Figura 11. Área tomada para el cálculo del índice de expansión. ....	52
Figura 12. Apariencia de tratamientos 4 (procesado a 55Hz y 170°C) y 7 (procesado a 50Hz y 145.6°C) de los productos directamente expandidos (T=tratamiento, BC=botana control, FOS=botanas con almidón fosfatado, SUC=botanas con almidón succinatado, 2G=de segunda generación o productos directamente expandidos). ....	59
Figura 13. Microfotografías del tratamiento T4 de productos directamente expandidos a) botana control a 10x, a2) botana control 65x, b) botana con almidón fosfatado 10x, b2) botana con almidón fosfatado 65x, c) botana con almidón succinatado 10x, c2) botana con almidón succinatado 65x. ....	101
Figura 14. Microfotografías del tratamiento T7 de productos directamente expandidos a) botana control a 10x, a2) botana control 65x, b) botana con almidón fosfatado 10x, b2) botana con almidón fosfatado 65x, c) botana con almidón succinatado 10x c2) botana con almidón succinatado 65x. ....	102
Figura 15. Apariencia de tratamientos 4 y 7 de botanas de 3ª generación (T=tratamiento, BC=botana control, FOS=botanas con almidón fosfatado, SUC=botanas con almidón succinatado, 3G= tercera generación). ....	105



Figura 16. Microfotografías del tratamiento T4 de botanas de tercera generación  
a) botana control a 10x, a2) botana control 65x; b) botana con almidón fosfatado 10x, b2) botana con almidón fosfatado65x; c) botana con almidón succinatado 10x, c2) botana con almidón succinatado 65x. .... 144

Figura 17. Microfotografías del tratamiento T7 de botanas de tercera generación  
a) botana control a 10x, a2) botana control 65x, b) botana con almidón fosfatado 10x, b2) botana con almidón fosfatado65x, c) botana con almidón succinatado 10x, c2) botana con almidón succinatado 65x. .... 145



## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Valores comparativos de <i>IE</i> de productos directamente expandidos (botanas de 2ª generación).....	64
Gráfica 2. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre el índice de expansión ( <i>IE</i> ) de productos fosfatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.....	66
Gráfica 3. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre el índice de expansión ( <i>IE</i> ) de productos succinatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	67
Gráfica 4. Valores comparativos de <i>DA</i> de productos directamente expandidos (botanas de segunda generación).....	68
Gráfica 5. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la densidad aparente ( <i>DA</i> ) de botanas control directamente expandidas por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.....	71
Gráfica 6. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la densidad aparente ( <i>DA</i> ) de productos fosfatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	72
Gráfica 7. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la densidad aparente ( <i>DA</i> ) de productos succinatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	73
Gráfica 8. Valores comparativos de <i>L</i> de productos directamente expandidos.	75
Gráfica 9. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la luminosidad de botana control directamente expandida por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	77
Gráfica 10. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la luminosidad de productos fosfatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.....	78



Gráfica 11. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la luminosidad de productos succinatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.....	79
Gráfica 12. Valores comparativos de <i>IAA</i> de productos directamente expandidos.....	80
Gráfica 13. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre el índice de absorción de agua ( <i>IAA</i> ) de productos fosfatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	82
Gráfica 14. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre el índice de absorción de agua ( <i>IAA</i> ) de productos succinatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	83
Gráfica 15. Valores comparativos de <i>ISA</i> de productos directamente expandidos.....	84
Gráfica 16. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre el índice de solubilidad en agua ( <i>ISA</i> ) de productos fosfatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	87
Gráfica 17. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre el índice de solubilidad en agua ( <i>IAA</i> ) de productos succinatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	88
Gráfica 18. Valores comparativos de <i>FP</i> de productos directamente expandidos .....	89
Gráfica 19. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la fuerza de penetración ( <i>FP</i> ) de productos fosfatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	91
Gráfica 20. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la fuerza de penetración ( <i>FP</i> ) de productos succinatados directamente	



expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos. .....	92
Gráfica 21. Termogramas de tratamientos T <sub>4</sub> y T <sub>7</sub> de botanas control (BC), botanas con almidón fosfatado (FOS), botanas con almidón succinatado (SUC) y almidón nativo de productos directamente expandidos.....	97
Gráfica 22. Patrones de difracción de rayos X de productos directamente expandidos.....	99
Gráfica 23. Perfiles de viscosidad de los tratamientos T <sub>4</sub> y T <sub>7</sub> de botanas control (BC), botanas con almidón fosfatado (FOS) y botanas con almidón succinatado (SUC) a) con almidón nativo, b) sin almidón nativo de productos directamente expandidos.....	103
Gráfica 24. Valores comparativos de <i>IE</i> de botanas de tercera generación. ..	107
Gráfica 25. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre el índice de expansión de botana control de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.....	112
Gráfica 26. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre el índice de expansión de botana con almidón fosfatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.....	113
Gráfica 27. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre el índice de expansión de botana con almidón succinatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	114
Gráfica 28. Valores comparativos de <i>DA</i> de botanas de tercera generación..	115
Gráfica 29. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre la densidad aparente de botanas control de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.....	118
Gráfica 30. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre la densidad aparente de botanas con almidón fosfatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.....	119



Gráfica 31. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre la densidad aparente de botanas con almidón succinatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	120
Gráfica 32. Valores comparativos de <i>L</i> de botanas de tercera generación.....	121
Gráfica 33. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre <i>L</i> de botanas con almidón fosfatado de tercera generación. a), superficie de respuesta y b) contornos. ....	123
Gráfica 34. Valores comparativos de <i>IAA</i> de botanas de tercera generación.	124
Gráfica 35. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre <i>IAA</i> de botanas con almidón succinatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.....	126
Gráfica 36. Valores comparativos de <i>ISA</i> de botanas de tercera generación.	127
Gráfica 37. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre <i>ISA</i> de botanas control de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	129
Gráfica 38. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre <i>ISA</i> de botanas con almidón succinatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.....	130
Gráfica 39. Valores comparativos de <i>FP</i> de botanas de tercera generación. .	131
Gráfica 40. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre <i>FP</i> de botanas control de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	133
Gráfica 41. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre <i>FP</i> de botanas con almidón fosfatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	134
Gráfica 42. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre <i>FP</i> de botanas con almidón fosfatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos. ....	135
Gráfica 43. Termogramas de $T_4$ y $T_7$ de botanas control (BC), botanas con almidón fosfatado (FOS), botanas con almidón succinatado (SUC) y almidón nativo. ....	141



Gráfica 44. Patrones de difracción de rayos X de botanas de tercera generación .....	142
Gráfica 45. Perfiles de viscosidad de tratamientos T <sub>4</sub> y T <sub>7</sub> de botanas control (BC), botanas con almidón fosfatado (FOS) y botanas con almidón succinatado (SUC) a) con almidón nativo, b) sin almidón nativo de botanas de tercera generación.....	147



## RESUMEN

En muchos países de América latina y en todo el mundo se consume una gran cantidad de botanas saladas debido a esto es conveniente hacer nuevas formulaciones para el desarrollo de alimentos funcionales. El propósito de este trabajo fue desarrollar botanas de 2ª y 3ª generación a base de almidón de papa modificado por fosfatación y succinatación por el proceso de extrusión para la obtención de botanas funcionales, ya que al realizar estas modificaciones químicas se generan enlaces entrecruzados en el almidón formando almidón resistente (*AR*). Se evaluó el efecto de la temperatura de extrusión y la velocidad de tornillo en las botanas de segunda generación sobre el índice de expansión, densidad aparente, fuerza de penetración, índice en solubilidad en agua, índice de absorción de agua y luminosidad para seleccionar dos de los mejores tratamientos (*T4* y *T7*) y determinar el grado de sustitución y el %*AR*, sus propiedades térmicas y estructurales. Para las botanas de tercera generación se estudió el efecto de la temperatura de extrusión y el contenido de humedad además, se realizó una cinética de expansión para determinar el tiempo óptimo de expansión que fue de 30 segundos. Para su posterior caracterización, los tratamientos que fueron modificados por succinatación presentaron mejores características que los modificados por fosfatación presentando valores muy altos de *IE* (3.52-3.82), baja densidad aparente (99.85-134.51 Kg/m<sup>3</sup>) y un tamaño de celda pequeño que proporciona una buena textura y contenidos ≈70% de *AR* por lo cual se logró obtener una botana con buenas características. En el caso de las botanas de tercera generación, las botanas con almidón fosfatado presentaron mejores características al ser expandidas por microondas durante 30 segundos, mostrando valores de *IE* (1.70-3.52), baja densidad aparente (182.71-627.33 Kg/m<sup>3</sup>) y contenidos ≈80% de *AR*. Por lo cual se llegó a la conclusión de que es posible obtener botanas de 2ª y 3ª generación con características similares a las de un producto comercial con la ventaja de contener arriba de 70% de *AR*.

**Palabras clave:** Extrusión, botanas de 2ª generación, enlaces entrecruzados botanas de 3ª generación, almidón resistente.



## ABSTRACT

In many countries of Latin America and around the world will consume a lot of salty snacks because it is convenient to make new formulations for the development of functional foods. The purpose of this work was to develop snacks 2nd and 3rd generation based on potato starch modified by phosphorylation and succinylation by the extrusion process to obtain functional snacks, because when do these chemical modifications are generated cross-linked in starch forming resistant starch (*RS*). Was evaluated the effect of extrusion temperature and screw speed in the second generation snacks on the expansion rate, bulk density, penetration force, water solubility index, water absorption index and luminosity to select two of the best treatments (T4 and T7) to determine the degree of substitution and percentage of resistant starch (*RS*), and their thermal and structural properties. For third-generation snacks was studied the effect of extrusion temperature and feed moisture content also underwent expansion kinetics to determine the optimal time of expansion was 30 seconds. For further characterization, the treatments were modified by succinylation showed better characteristics as modified by phosphorylation presenting very high values of IE (3.52-3.82), low bulk density (kg/m<sup>3</sup> 99.85-134.51) and a small cell size provides a good texture and contained ≈ 70% of RA which is able to obtain a snack with good features. In the case of third-generation snacks, starchy snacks phosphate showed better characteristics to be expanded by microwave for 30 seconds, showing values of *EI* (1.70-3.52), low bulk density (kg/m<sup>3</sup> 182.71-627.33) and contents ≈ 80% of *RS*. Hence it is concluded that it is possible to get snacks for 2nd and 3rd generation with characteristics similar to those of a commercial product with the advantage of containing up to 70% of *RS*.

**Keywords:** Extrusion, 2nd generation snacks, cross-linked , 3rd generation snacks, resistant starch.



## 1. INTRODUCCIÓN

El 25 de enero del 2010 el presidente Calderón anunció que en ocho años se incrementó en más de 60% la atención de enfermedades relacionadas con el sobrepeso y la obesidad, y el gasto para atender esos males pasó de casi veintisiete mil millones de pesos a más de dos mil trescientos treinta mil millones de euros, el equivalente a lo invertido en el Seguro Popular durante 2009. También señaló que en la actualidad un 70% de los adultos en México sufren sobrepeso y a ellos se suman cuatro millones y medio de niños de entre cinco y 11 años. De esta manera se hizo oficial que México ocupa el primer lugar en obesidad infantil y segundo en obesidad adulta así como el primer lugar en diabetes. De ahí viene la importancia de esta investigación, dando una alternativa para sustituir alimentos de bajo valor nutricional (denominados comúnmente alimentos chatarra) por otros que tienen un aporte funcional y nutricional en la dieta diaria de las personas.

En México las botanas más consumidas están elaboradas de maíz, papa y cacahuete, sin embargo, se cuenta con una gran diversidad y disponibilidad de otros tubérculos y cereales de los que se pueden obtener botanas con igual sabor y textura aunque mejores características nutricionales, debido a que son bajas en grasa, están constituidas por almidón resistente (no digerible por el intestino delgado), no tienen aporte calórico y ejerce funciones como la fibra insoluble en el organismo (Cheftel y Pierre, 1989, Camire y col., 1990).

Las botanas son un tipo de alimento que en la cultura occidental no es considerado como uno de los alimentos principales de la dieta diaria (desayuno, almuerzo o cena). Generalmente se utiliza para satisfacer el hambre temporalmente, proporcionar una mínima cantidad de energía para el cuerpo, o simplemente por placer. Estos alimentos están elaborados para ser menos perecederos y más apetecibles que los alimentos naturales. Contienen a menudo cantidades importantes de edulcorantes, conservadores, saborizantes, sal, y otros ingredientes atractivos como el chocolate, cacahuates y sabores especialmente



diseñados (papas fritas condimentadas). Muchas veces son clasificados como "comida basura" al tener poco o ningún valor nutricional, exceso de aditivos, y no contribuir a la salud general.

Un tipo de botana que recientemente ha incrementado su preferencia tanto por los consumidores como por los productores, son las botanas de tercera generación, debido a que son relativamente baratas y fáciles de preparar en el hogar ya sea a través de un freído o calentamiento por microondas. Otros productos, son los expandidos directamente de un extrusor, la expansión ocurre cuando se evapora el agua de la pieza extrudida mientras que el producto es forzado a través del cañón de extrusor. La forma del producto es determinada por una combinación de la apertura, la expansión y el molde de corte frontal (dado) (Aguilar, 2004).

Las botanas de tercera generación y productos directamente expandidos pueden elaborarse por la tecnología de extrusión termoplástica cuyo principio fundamental es convertir el material sólido en un fluido mediante la aplicación de calor y trabajo mecánico, promoviendo así la termoplastificación del mismo (Olkku y Linko, 1977).

Durante la extrusión del almidón, la combinación de cizallamiento, temperatura y efecto de los plastificantes permiten producir un material termoplástico fundido por el desorden de la estructura granular cristalina nativa y plastificación. Este almidón plastificado podría ser conveniente para la elaboración de botanas de tercera generación o productos directamente expandidos a partir de materias primas renovables, disponibles y de bajo costo.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Botanas**

#### **2.1.1 Aspectos generales**

Las botanas en México al igual que en otros países del mundo son el producto que cubre las necesidades de los consumidores, con relación a: accesibilidad, precio, buen sabor y una amplia variedad de gustos y porciones, no es exclusivo de una clase social y está enfocada a todas las edades.

Existe una gran variedad de botanas, que tienen características de sabor diferentes, que nos sirven para acompañar y compartir todos aquellos momentos de distracción y diversión, tanto fuera como dentro de casa, como son: papas, tortilla chips, chicharrones de harina de trigo, chicharrón de cerdo, cacahuates (maní), habas, garbanzos, frutas y vegetales deshidratados y otras semillas.

En la actualidad no todo mundo sabe que algunas las botanas en esencia son un alimento natural, que están elaboradas con ingredientes que son fundamentales en la alimentación humana: papa, maíz, cacahuete, trigo, y derivados, etc. Además generalmente, se utilizan aceites vegetales que contribuyen a su sabor, y los condimentos que se utilizan son una mezcla de ingredientes derivados de leche, queso, chiles y especias. Sin embargo, generalmente se hacen a partir de almidones nativos, y se cocinan con mucha grasa por eso la tendencia mundial de productos bajos en grasa que han llegado a México pero no ha tenido gran impacto.

A lo largo del tiempo se ha visto que, aunque las personas estén conscientes del tipo de alimentos que consumen, los siguen ingiriendo, debido a esto es necesaria la elaboración de botanas funcionales, que no sean perjudiciales a la salud ni fomenten enfermedades como la obesidad y la diabetes.



Las botanas saladas han ido aumentando y pasado por innovadores cambios, desde la invención de las papas fritas en 1853 hasta llegar a ofrecer una amplia gama de productos naturales y de alta calidad nutricional. El desarrollo de botanas y golosinas representa hoy un desafío para la industria alimentaria, ya que obliga a pensar en salud y nutrición, conceptos que antiguamente no iban ligados a esta categoría de productos.

### **2.1.2 Producción y consumo**

Las botanas saladas constituyen una de las más innovadoras sub-categorías dentro de la industria batanera. Recientemente, se han registrado lanzamientos de productos inusuales, que dejan a un lado las variedades más tradicionales de papa, maíz, cereales y arroz. La soya, el chile y los sabores étnicos y mediterráneos son algunas de las novedades que crean un rango más amplio de texturas y sensaciones.

La demanda y producción de este tipo de productos refleja que lugar tan importante ocupan en la dieta diaria de las personas. Si bien, en 2006 y 2007 la producción de botanas registró una ligera contracción, en los primeros siete meses de 2008 repuntó 7.2%. De mantener esa tendencia se superaría el nivel récord de 2005 cuando se fabricaron a nivel industrial poco menos de 295 millones de toneladas de papas fritas, frituras de maíz y cacahuates. Con respecto a la alimentación el estudio realizado a partir de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares, en el año 2005 describe el incremento en el porcentaje de alimentos ricos en carbohidratos refinados como refrescos, mientras que disminuyó el consumo de frutas, vegetales, carnes y lácteos.

El mercado de botanas dulces y salados en México sigue mostrando su fortaleza, es así como las ventas totales de este sector en el 2002 llegaron a 1885.8 millones de dólares y al finalizar el 2007 este sector arrojó ventas totales de 2597.8 millones de dólares, lo que representa un aumento del 37.8%, y un



aumento de 6.6% entre el 2006 y 2007. Según Euromonitor, para el 2012 llegará a 3210.3 millones de dólares; esta cifra se ve sustentada en la clara preferencia del público mexicano por estos productos salados, más que evidente en los 416 pesos anuales "per cápita" gastados en el consumo de éstos (Benítez, 1998). De acuerdo con la industria Barcel, en México, entre las botanas más consumidas se encuentran las papas fritas con 35.5% y las frituras a base de tortilla con 21.3%, encontrándose los productos extrudidos (pellets) en tercer lugar con 15.4%, siguiéndole los extrudidos directamente expandidos con un 9.3% (Tabla 1).

**Tabla 1. Preferencias de alimentos tipo botana en México.**

<b>Botana</b>	<b>% de consumo</b>
<b>Papas fritas</b>	<b>35.5</b>
<b>Frituras a base de tortilla</b>	<b>21.3</b>
<b>Extrudidos</b>	<b>15.4</b>
<b>Extrudidos directamente expandidos</b>	<b>9.3</b>
<b>Chicharrón de harina</b>	<b>7.5</b>
<b>Semillas fritas</b>	<b>7</b>
<b>Palomitas</b>	<b>4</b>

Fuente: Benítez, 1998.

### **2.1.3 Clasificación**

La industria productora de botanas es cada día más grande e importante. En general, la manufactura de botanas se puede dividir en tres grandes categorías: a) productos enteros, b) productos nixtamalizados y c) productos extrudidos. Esta última se puede subdividir en productos expandidos directos, productos obtenidos a través de pellets y masas formadas en el extrusor para ser posteriormente freídas y terminadas con otro tipo de tratamiento térmico.

Las botanas también han sido clasificadas en tres generaciones de acuerdo con sus técnicas de elaboración. La primera generación considera los productos convencionales elaborados a partir del grano entero usando combinaciones de humedad y temperatura. Las botanas de segunda generación son productos, en los cuales la materia prima se ve involucrada en distintas etapas de preparación



para la obtención de una masa, la cual es sometida a un proceso de cocción para obtener el producto final. En el siguiente grupo se encuentran las denominadas botanas de tercera generación, estas también son conocidos como botanas semiterminadas (Semi-products) y productos intermediarios (half-products), los cuales son parecidos a los productos de segunda generación, aunque el producto obtenido no se encuentra listo para ser consumido. Su presentación final viene comúnmente después de un freído en aceite caliente o expansión con aire caliente (Harper, 1981). Debido a su alta estabilidad al almacenamiento y su alta densidad aparente, las botanas de tercera generación no expandidas presentan un interesante mercado potencial. Existen nuevas variantes de las botanas de tercera generación originales pudiéndose llevar a cabo la expansión a través de calentamiento por radiación infrarroja o por microondas (Huber y Rokey, 1990).

#### **2.1.4 Elaboración**

Las alternativas para elaborar productos enriquecidos con vitaminas, minerales y fibras, se tornarán muy importantes, especialmente en el mercado de confites y golosinas. Por otra parte, las soluciones que ayudan a resolver los desafíos en relación al tema de sal, optimizarán el rendimiento del sabor y minimizarán el impacto del costo. Actualmente la soya es muy popular como base para alimentos, debido a su alto contenido natural de proteína y a su bajo contenido de carbohidratos. También se le utiliza como una alternativa más saludable para los productos de papa. La soya contiene menos grasas, menos calorías y más fibras que las papas y puede ser empleada en una variedad de formas y con una amplia formación de sabores.

Algunos productos son vendidos como “fritos con aceite de oliva”, elemento tradicional de la cocina mediterránea, y usan ingredientes y sabores comunes de los países mediterráneos. Por ejemplo, el tomate y la albahaca es una mezcla tradicional de Italia. La pizza también puede ser observada como un sabor mediterráneo, debido a sus raíces italianas. Este sabor ha hecho su aparición con



fuerza en el mercado, especialmente para aquellos consumidores que gustan del sabor de las comidas populares.

Actualmente la tendencia es producir botanas de mejor calidad nutritiva debido a que su consumo, lejos de verse disminuido por no presentar una adecuada opción nutrimental, se ha visto aumentado en demasía. Este hábito de consumo puede ser aprovechado para convertirlo en un vehículo adecuado para suministrar nutrimentos de buena calidad a los consumidores, lo que es más fácil de lograr por el proceso de extrusión.

#### **2.1.4.1 Botanas elaboradas por el proceso de extrusión**

Aunque la extrusión se inició en la industria alimenticia en el año 1930, el mejoramiento sustancial y la amplia aplicación de esta tecnología fue principalmente lograda en las últimas décadas. Además de su capacidad de desarrollar dentro de una máquina compacta, funciones tales como mezclado, calentamiento, texturización y encapsulación de sabores; la tecnología del cocimiento por extrusión también puede producir productos terminales con algunos nuevos atributos de calidad que solo pueden ser logrados mediante la extrusión (Riaz, 2004). La extrusión se considera como un proceso multifuncional y un proceso térmico-mecánico, que ha permitido un número grande de aplicaciones en los alimentos. Dentro de los efectos benéficos se incluyen: destrucción de factores anti nutritivos, la gelatinización de los almidones, aumento en la fibra dietética soluble y reducción de oxidación del lípido presente (Fellows, 2007). Los productos expandidos como las botanas y cereales de desayuno son muy populares hoy en día debido a su textura crujiente impartida por el proceso de extrusión. La mayoría de las botanas extrudidas entran en la categoría de botanas expandidas directamente (de segunda generación). Estas botanas son elaboradas principalmente por harina de maíz la cual se somete a hidratación, calor y presión al ir pasando a través del extrusor hasta obtener el producto final expandido.



El cambio en las propiedades organolépticas del alimento viene dado por el tipo de extrusión que se lleva a cabo. Aplicando altas temperaturas el producto perderá más cantidad de agua, con lo que se obtendrán productos con menor humedad y, por tanto, con más vida útil. Por el contrario, trabajando en frío se obtendrán productos con más actividad de agua pero con una menor pérdida de cualidades.

Los compuestos aromáticos se pueden añadir al final o se pueden recuperar los del propio alimento mediante unas duchas especializadas. Existen aromas encapsulados que se pueden introducir desde el principio, pero tienen el inconveniente de que son bastante caros. En el producto final puede haber pérdida de color, que puede ser causa del calor, que durante el proceso afecta a algún pigmento termosensible, o simplemente por reacciones internas entre los componentes del alimento. No obstante, la pérdida es mínima y prácticamente inapreciable.

A pesar de su gran aceptación, en la literatura existen muy pocos trabajos publicados sobre los factores de procesamiento que afectan la elaboración de alimentos botana de segunda y tercera generación, así como de sus características fisicoquímicas y funcionales.

Singh y col., (2009) prepararon botanas extrudidas mezclando harina de papa seca a dos relaciones diferentes (25:75, 50:50), y sus características de calidad de estudio fueron evaluadas. Todas las harinas de papa, mostraron diferencias en el color, contenido de materia seca, contenido de almidón. Entre los productos extruidos elaborados con harina de papa 25%, se mostró un valor de  $L$  de 51,71, mientras que las botanas de harina pura de maíz tuvo el mayor valor de  $L$  de 61,22. La  $b$  en ambos niveles de harina de papa fueron los más bajos. Las características microestructurales de los productos extruidos tales como la estructura celular y el espesor de la pared celular cambiaron considerablemente.



Chakraborty y col., (2009) evaluaron extrudidos de mezclas de mijo y leguminosas (12, 16, 20, 24, 28%) a diferentes contenidos de humedad (12, 15, 18, 21, 24%, base húmeda [BM]) en un extrusor de tornillo simple. El extrusor se operó a diferentes temperaturas del dado (160-200°C), temperaturas de extrusión (100-140°C) y velocidades de tornillo (100-140rpm). Los parámetros de procesamiento se optimizaron con la ayuda de la metodología de superficie de respuesta para su obtención con mínima dureza y fuerza de corte. Las condiciones óptimas de procesamiento obtenidas fueron con contenido de humedad del 24%. Las propiedades correspondientes textura, la dureza y la fuerza de corte de los productos extrudidos fueron 50, 48.2 y 79.7N, respectivamente. Este proceso permite la preparación de botanas elaboradas de mijo y leguminosas. Estas botanas son ricas en fibras, en proteínas y otras vitaminas con un alto valor nutricional.

Meng y col., (2010) utilizaron la metodología de superficie de respuesta (RSM) para estudiar los efectos del contenido de humedad de alimentación (16-18%), velocidad del tornillo (250-320rpm) y la temperatura del barril (150 a 170 °C) en los parámetros del sistema de extrusión y las propiedades físicas (expansión, la densidad aparente dureza) de botanas a base de harina de garbanzo. Polinomios de segundo orden se utilizaron para modelar las respuestas de extrusión y las propiedades del producto en función de variables de proceso. La temperatura del producto y la presión de dado se vieron afectados por todo el proceso de tres variables. Se obtuvieron productos con baja humedad, alta velocidad de tornillo y temperatura de extrusión de media a alta que se caracterizaron por su alta relación de expansión, baja densidad y dureza, Se demostró que los garbanzos se pueden utilizar para producir botanas nutritivas expandidas y obtener propiedades deseables incluyendo la textura.

Upadhyay y col., (2010) usaron mezclas de arroz y harina de garbanzos con pulpa de zanahoria en polvo para la formación y estudio de extrudidos. Se utilizó la metodología de superficie de respuesta para analizar el efecto de la



temperatura de la matriz (65-125°C), velocidad de tornillo (2,5 a 8,5 g/s), humedad del alimento (10-30%) y pulpa de zanahoria en polvo (1.5 a 15.5%) sobre la humedad del material extruido, el índice de expansión, densidad aparente y características sensoriales de los productos extruidos. La temperatura final de extrusión resultó la variable de proceso más eficaz ( $P < 0.05$ ) al afectar a las respuestas seleccionadas, seguido por el contenido de humedad en el alimento y el pulpa de zanahoria en polvo. El nivel de incorporación óptimo de pulpa de zanahoria en polvo fue de 5%.

Pastor y col., (2011) evaluaron los efectos de la adición de leguminosas silvestres (*Lathyrus*) del Sur de España sobre las propiedades físicas y nutricionales de productos extruidos a base de maíz integral y arroz integral. Las muestras se procesaron en un extrusor monorosca. Los resultados mostraron que la expansión, la solubilidad y energía mecánica específica fueron mayores para las mezclas de arroz pararon relación a las mezclas de maíz, mientras que la densidad siguió una tendencia inversa. Además la adición de las leguminosas produce una disminución de la expansión y un aumento en la solubilidad tanto en las muestras que contienen arroz y muestras con maíz. El rendimiento de cada mezcla durante la extrusión y las propiedades físicas de los productos extruidos fueron considerados en el rango de los esperados para los productos de tipo botana.

Suksomboon y col., (2011) hicieron mezclas de harina de arroz y de soya, las procesaron por extrusión a 190°C y velocidad de tornillo de 350 rpm. La calidad de las botanas extruidas disminuyó inversamente con la harina de soya. Sin embargo, la calidad del producto se considera óptima cuando se añadió la harina de soya en un 5%. Fue estudiado el efecto del contenido de humedad, la temperatura del barril y la velocidad de tornillo (350, 400, 450 rpm) sobre las propiedades fisicoquímicas de los productos extruidos. Las propiedades fisicoquímicas del producto, incluyendo el radio de expansión, la densidad, el índice de absorción de agua (IAA), el índice de solubilidad en agua (ISA) y la



dureza fueron evaluadas. Todas las propiedades están relacionadas, en forma de ecuaciones lineales, en términos de contenido de humedad, la temperatura de barril, velocidad de tornillo con una correlación relativa ( $R^2$ ) que varió de 0.83 a 0.94. Las propiedades de la botana, junto con la aceptación del consumidor fueron mejores con un contenido de humedad de 15%, temperatura de barril de 170 °C y velocidad de tornillo de 450 rpm.

La cocción por extrusión ofrece varias ventajas en costo, calidad y versatilidad con respecto a otros procesos técnicos utilizados en la industria alimentaria. De acuerdo con Aguilar y col., (2010) las botanas de tercera generación se elaboran utilizando el proceso de extrusión con humedades de alimentación que varían de 16 a 30% para la obtención de pellets no expandidos. Los extruidos se deshidratan hasta 9.5-10.5% de humedad antes de la expansión por medio de calentamiento por microondas o freído. Las botanas de tercera generación (3G) procesados por extrusión también llamadas productos intermedios o pellets, muestran una gran estabilidad en el almacenamiento y alta densidad aparente, haciendo más fácil su manipulación (Sunderland, 1996). Al ser un material seco, los pellets son correctamente almacenados y conservan su calidad sin deterioro por lo menos un año después de la producción, además requieren menos espacio de almacenamiento debido a que su volumen es menor que su tamaño expandido (Arias y col., 2007).

Aguilar y col., (2006) estudiaron el efecto de la extrusión usando temperaturas de extrusión (75 a 140 °C) y contenidos de humedad (16-30%) sobre la producción de botanas de tercera generación expandidas por el calentamiento por microondas. Estos autores utilizaron una mezcla de almidón de papa (50%), maíz de calidad proteínica (QPM) (35%) y pasta de soya (SM) (15%) en la preparación de las botanas. En pellets expandidos el Índice de expansión aumentó y la densidad aparente disminuyó cuando la temperatura del barril se incrementó, y la humedad de alimentación no tuvo un efecto significativo. La viscosidad a 83°C aumentó cuando el contenido de humedad de la materia prima fue



aumentando. La extrusión modificó las estructuras cristalinas de los pellets y los datos de difracción de rayos-X indicaron la formación de nuevas estructuras, probablemente debido al desarrollo de complejos amilosa-lípidos. La expansión máxima de los pellets se encontró a temperaturas de extrusión de 123-140°C, y contenidos de humedad de 24,5 a 30%. Por lo que es posible obtener una botana funcional de tercera generación con expansión de buenas características usando un horno de microondas.

Limón y col., (2010) evaluaron los efectos de la adición de concentrado de proteína de la leche (*MPC*) (0-10%) y humedad (*FM*) (20-30%) en una mezcla de almidón de maíz extrudido (80% *CS*) y el maíz con calidad protéica (20% *QPM*), en las características físico-químicas diferentes de botanas de tercera generación (*3G*). La extrusión de las botanas se realizó con un extrusor de laboratorio con tornillo único (modelo GNF 1014 / 2, Brabender, Inc., Duisburg, Alemania) con 380 mm de largo, 19mm de diámetro en el barril de extrusión y una relación de compresión de 3:1. Se utilizó un dado rectangular con dimensiones interiores de 20mm x 1.0mm x 100mm de largo. Las características físico-químicas evaluadas fueron: índice de expansión (*IE*), densidad aparente (*DA*), textura (*Tx*) y los parámetros de color *L*, *a\**, *b\**. *IE* disminuyó con el aumento de la *MPC* y *FM*, mientras que el *DA* y los parámetros de color (*a\**, *b\**) se incrementaron; *Tx* presentó un punto mínimo (*MPC* = 5% y *FM* =% 25). Las botanas de tercera generación expandidas en un horno de microondas presentaron buenas características de expansión.

El estudio realizado por Arimi y col., (2011) tuvo como objetivo investigar los efectos de la proteína:almidón (*P:S*) en proporciones de 37:0, 24:13, 20:17 o 16:21 almacenadas en refrigeración (1-9 días) sobre las propiedades funcionales, movilidad del agua y la expansión en microondas de la botana. La dureza del queso disminuyó, mientras que la movilidad del agua aumentó con la disminución proporción *P:S* y el tiempo de almacenamiento prolongado. La expansión volumétrica incrementó linealmente con mayor tiempo de almacenamiento antes



de su expansión en microondas. Después de almacenar los quesos durante 9 días, un queso con *P:S* de 37:0 presentó la mayor expansión del 1050%, mientras que el queso con el *P:S* de 20:17 presentó la mayor expansión volumétrica de 900 % de los quesos que contienen almidón.

Eun y col., (2000) prepararon pellets extrudidos a partir de almidón de maíz utilizando un extrusor de doble tornillo (25:1 *L/D*, 31mm de diámetro del tornillo), y expandidos por calentamiento en un horno de microondas convencional por 70 segundos. La forma del expandido y la estructura de las células variaron de acuerdo con el grado de gelatinización de los pellets. Los valores máximos volumen de expansión se obtuvieron para contenidos de 11% de humedad y 52% de almidón gelatinizado. Para este nivel de gelatinización, el almidón se procesó con una temperatura de extrusión de 90°C. Además, el contenido de humedad de los pellets afectó de forma crítica el comportamiento de la expansión. El volumen de expansión máximo se obtuvo en un rango de humedad de 10 a 13%.

El objetivo de la investigación de Bastos y col., (2007) fue la preparación y caracterización pellets de papa extrudidos expandidos por calentamiento en microondas. Utilizaron un diseño experimental central compuesto rotatable la metodología de superficie de respuesta para el análisis de los datos. La temperatura de barril (*TB*, 93 a 127 °C), humedad del alimento (*FM*, 19-29%), y la concentración de almidón de maíz (*CS*, 3-37%) en las mezclas fueron evaluados. *CS* fue la variable más importante ya que afectó las propiedades funcionales de los pellets expandidos. Añadiendo a la mezcla *CS* aumentó el índice de expansión y mejoró de la viscosidad y la luminosidad, disminuyó de la densidad aparente y la fuerza de penetración de los productos. Bajas temperaturas de barril y, especialmente alto contenido de humedad aumentaron la luminosidad de los pellets expandidos. Al aumentar el contenido de *FM* aumentó de la viscosidad de los pellets expandidos. Las mejores características funcionales de los pellets expandidos se obtuvieron utilizando una mezcla de 63% de harina de papa y 37% *CS*, extruido a 110°C con el 24% de *FM*.



Debido a la optimización que ha sufrido la elaboración de botanas de segunda y tercera generación y a la gran aceptación de los alimentos tipo botana por personas de todas las edades y poder adquisitivo, estos pueden ser usados como vehículos para la introducción de nutrientes y de ingredientes con características nutraceuticas en la dieta de los consumidores (Aguilar, 2004).

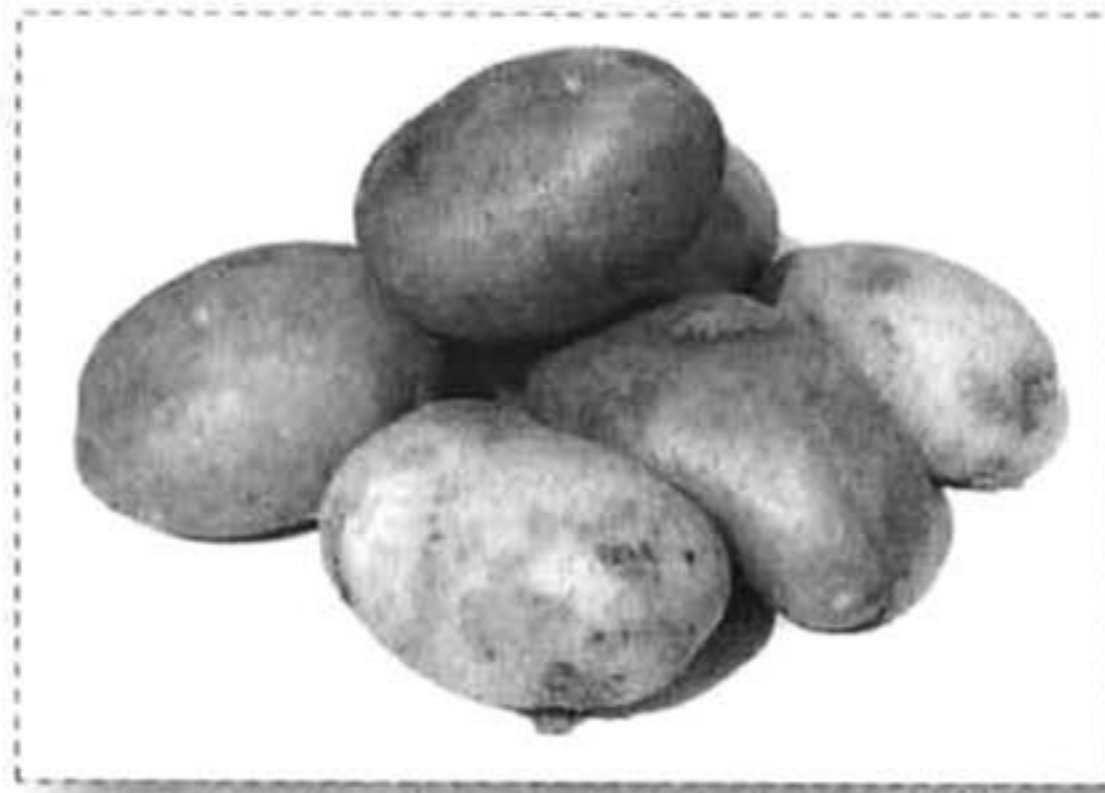
## **2.2 Materias primas (Papa)**

La papa o patata (*Solanum tuberosum*) (Figura 1) es una planta perteneciente a la familia de las solanáceas, originaria de América del Sur y México y es cultivada en todo el mundo por sus tubérculos comestibles (Ballón y col., 2000).

Los expertos han desarrollado miles de variedades, muchas de las cuales van quedando obsoletas por la aparición de otras con mayor rendimiento y adaptabilidad, de manera que sólo se consumen unas pocas decenas. Las variedades se pueden diferenciar por el color de la epidermis y de la pulpa, la resistencia a enfermedades, la duración del ciclo de cultivo y los requerimientos nutritivos, entre otras características de relevancia productiva. Las condiciones de cultivo varían de una variedad a otra, pero por lo general prefiere suelos ricos en humus, sueltos y arenosos (Ballón y col., 2000).

La papa es uno de los cultivos más importantes del mundo. Para el consumo humano solamente es superado por tres cereales: el trigo, el arroz y el maíz. No obstante, los tubérculos de la papa brindan un rendimiento por hectárea varias veces superior a aquellos que se obtienen con los granos de los cereales. Tales tubérculos se utilizan en alimentación animal y para consumo humano en diversos alimentos procesados, como agente gelificante y en la producción de bebidas alcohólicas. Asimismo, los tubérculos de papa presentan un sinnúmero de aplicaciones industriales, por ejemplo el almidón de la papa provee una cobertura para el papel y para productos textiles.





**Figura 1.** Papa (*Solanum tuberosum*).

La papa es fácilmente digerida y tiene un alto valor nutricional. Los tubérculos de papa presentan aproximadamente un 78% de agua y un 18% de almidón. El resto está compuesto por cantidades variables de proteínas, minerales y cerca de 0,1% de lípidos. La papa contiene varias vitaminas, incluyendo la vitamina C, riboflavina, tiamina y niacina (Tabla 2). Entre los distintos minerales que se hallan en la papa merecen citarse el calcio, el potasio, el fósforo y el magnesio por su importancia en la nutrición humana. Debido a que presenta una escasa cantidad de sodio, la papa generalmente se sugiere en las dietas que requieren bajos contenidos de este elemento. Las papas consumidas con la cáscara son una excelente fuente de fibra.

Aparte de su valor nutricional, el consumo de la papa constituye un deleite para millones de personas alrededor de todo el mundo. El almidón de la papa cada vez se utiliza más en la industria. Ejemplos de su utilización en la manufactura de productos no alimenticios son los materiales para embalaje, el polvo para lavar ropa y los cosméticos (pasta dentífrica, cremas, polvos faciales y pastillas). Pese a estos usos no tradicionales, la industria del papel es la que más demanda el almidón de la papa para la confección de cartón corrugado, papel de envoltorio y papel prensa.



Tabla 2. Valor nutricional por cada 100g de papa cruda con cáscara.

	<b>Energía 80 kcal</b>	<b>320 kJ</b>
<b>Carbohidratos</b>	<b>19g</b>	
Almidón	15g	
Grasas	0.1g	
Proteína	2g	
Agua	75g	
Tiamina (vitamina B1)	0.08mg	6%
Riboflavina (vitamina B2)	0.03mg	2%
Niacina (vitamina B3)	1.1mg	7%
Vitamina B6	0.25mg	19%
Vitamina C	20mg	33%
Calcio	12mg	1%
Hierro	1.8mg	14%
Magnesio	23mg	6%
Fósforo	57mg	8%
Potasio	421mg	9%
Sodio		0%
<b>% consumo diario requerido para adultos.</b>		

Fuente: Rivera y col., 2002

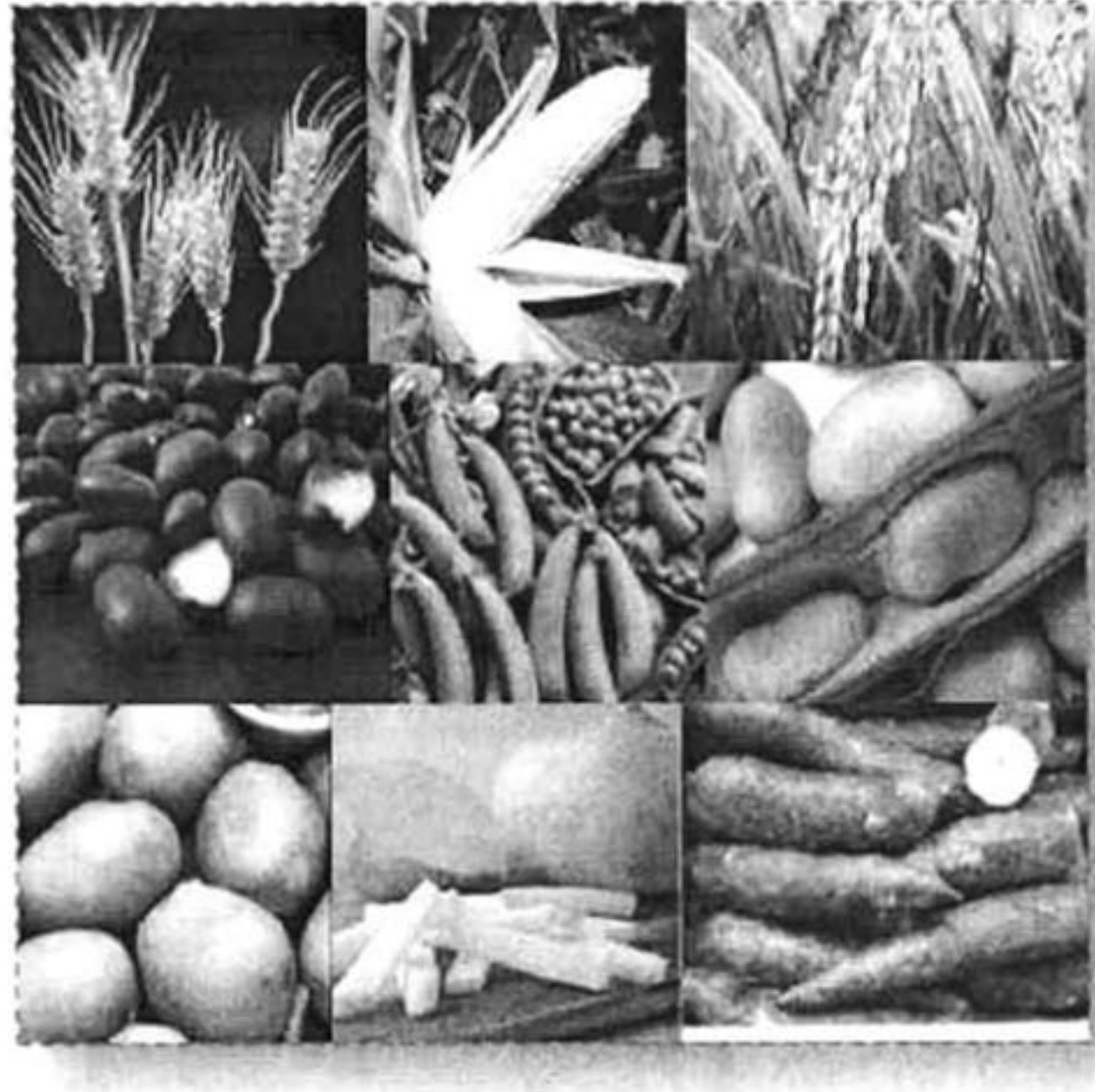
El componente mayoritario de la papa en base seca es el almidón que es utilizado para la elaboración de las botanas de 2ª y 3ª generación de este proyecto.

### 2.2.1 Almidón

Este polímero es el carbohidrato de reserva mayoritario en muchas plantas superiores y es considerado el biopolímero natural más abundante después de la celulosa. Dicho carbohidrato es una sustancia que se obtiene exclusivamente de los vegetales que lo sintetizan a partir del dióxido de carbono que toman de la atmósfera y del agua que toman del suelo, éste se deposita en los órganos de las plantas en forma de gránulos relativamente densos, insolubles en agua, con un tamaño entre 1 y 100 micrómetros, dependiendo de la especie vegetal. Los granos de cereales, raíces, semillas de leguminosas y tubérculos son las fuentes más importantes de almidón (Liu, 2005) (Figura 2). Puede contener otros constituyentes en bajos niveles tales como lípidos, proteínas, bajos niveles de minerales como fósforo y nitrógeno y polisacáridos diferentes de almidón,



dependiendo de la fuente botánica de la cual son extraídos. En los cereales la mayoría del fósforo se encuentra en forma de fosfolípidos; en el almidón de papa (tubérculo), el fósforo se encuentra esterificado en los residuos de glucosa (Liu, 2005).



**Figura 2.** Ejemplos de alimentos que contienen almidón.

El almidón está constituido de la unión de dos polisacáridos, la amilosa y la amilopectina. Ambos están formados por unidades de glucosa y solo difieren en su estructura; la amilopectina se distingue de la amilosa en que contiene ramificaciones que le confieren un forma molecular ramificada, los enlaces están unidos al tronco central por enlaces  $\alpha$ -D-(1-6) localizadas cada 15/25 unidades lineales de glucosa. El almidón se da en forma de gránulos discretos, en la naturaleza se encuentra en una gran variedad de formas y tamaños y las características funcionales cambian de acuerdo a la composición física y química (Tharanathan, 2003).



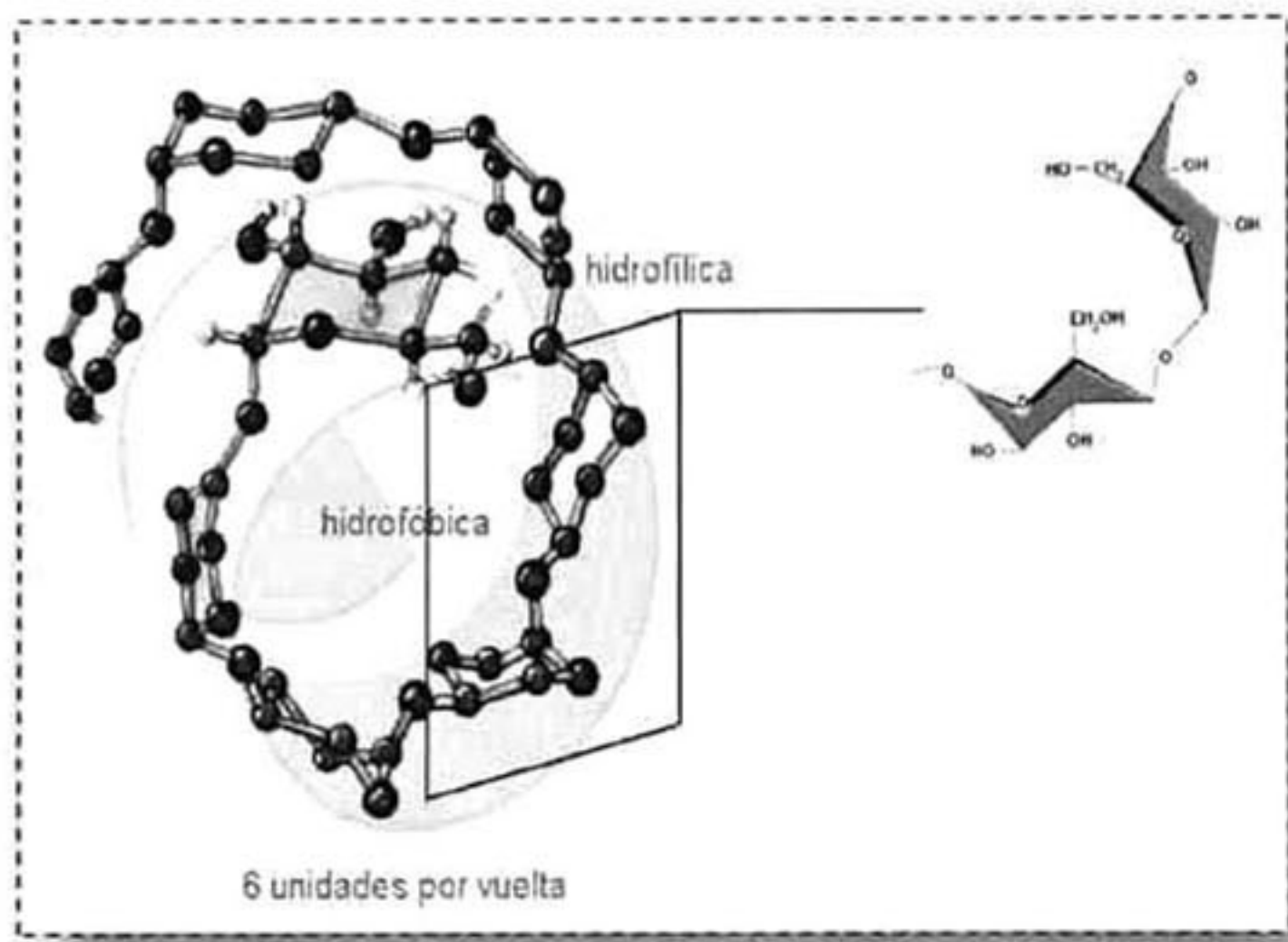
La amilosa es un polímero esencialmente lineal, formado por unidades D-glucosa unidas por enlaces  $\alpha$ -(1-4) (Figura 3), sin embargo, se ha demostrado la presencia de cierta cantidad de enlaces  $\alpha$ -(1-6) en esta macromolécula. La molécula de amilosa contiene en promedio, de 500 a 6000 unidades de D-glucosa repartidas en un número de cadenas que va de 1 a 20. Cada cadena presenta un grado de polimerización (*GP*) promedio de 500 (siendo *GP* el número de unidades de glucosa que se encuentran unidas en una cadena).

La abundancia de grupos hidroxilo a lo largo de las moléculas de amilosa imparte propiedades hidrofílicas al polímero, dándole mayor afinidad por el agua. Debido a su naturaleza lineal, su movilidad y la presencia de numerosos grupos hidroxilo a lo largo de las cadenas del polímero, las moléculas de amilosa tienden a orientarse de forma paralela y acercarse lo suficiente como para permitir la formación de enlaces de hidrógeno entre cadenas adyacentes. Como resultado, la afinidad de los polímeros por el agua se reduce y la solución que forman se vuelve opaca (Liu, 2005). El tamaño de su estructura depende del origen botánico y de los métodos de extracción (Tester y col., 2004). La amilosa tiene un peso molecular de aproximadamente 105-106 g/mol (Mua y Jackson, 1997; Buléon y col., 1998; Biliaderis, 1998). Este polímero posee cadenas largas, rectas, conocidas por formar películas fuertes y flexibles.

La amilopectina es una molécula ramificada formada por cadenas de residuos de  $\alpha$ -D-glucopiranosidos (entre 17 y 23 unidades) unidos principalmente por enlaces  $\alpha$ -(1-4) y  $\alpha$ -(1-6) (Figura 4). Dependiendo de la fuente, la amilopectina es el principal componente en la mayoría de los almidones alcanzando en ciertos casos niveles de hasta un 98-99% en los almidones tipo ceroso o *waxy*. Debido a esto, la amilopectina, es el componente de mayor importancia en términos de las propiedades del almidón. El peso molecular de la amilopectina varía entre 106 y 108, estas variaciones dependen del origen botánico del almidón, las condiciones del aislamiento de la amilosa y amilopectina y al método usado para determinar el peso molecular (Morris, 1990).



La amilopectina, debido a su estructura ramificada, no forma películas fuertes, sino que se caracteriza por su claridad y estabilidad cuando forma geles y puede mostrar una tendencia levemente mayor hacia la absorción o ligación de sabores.



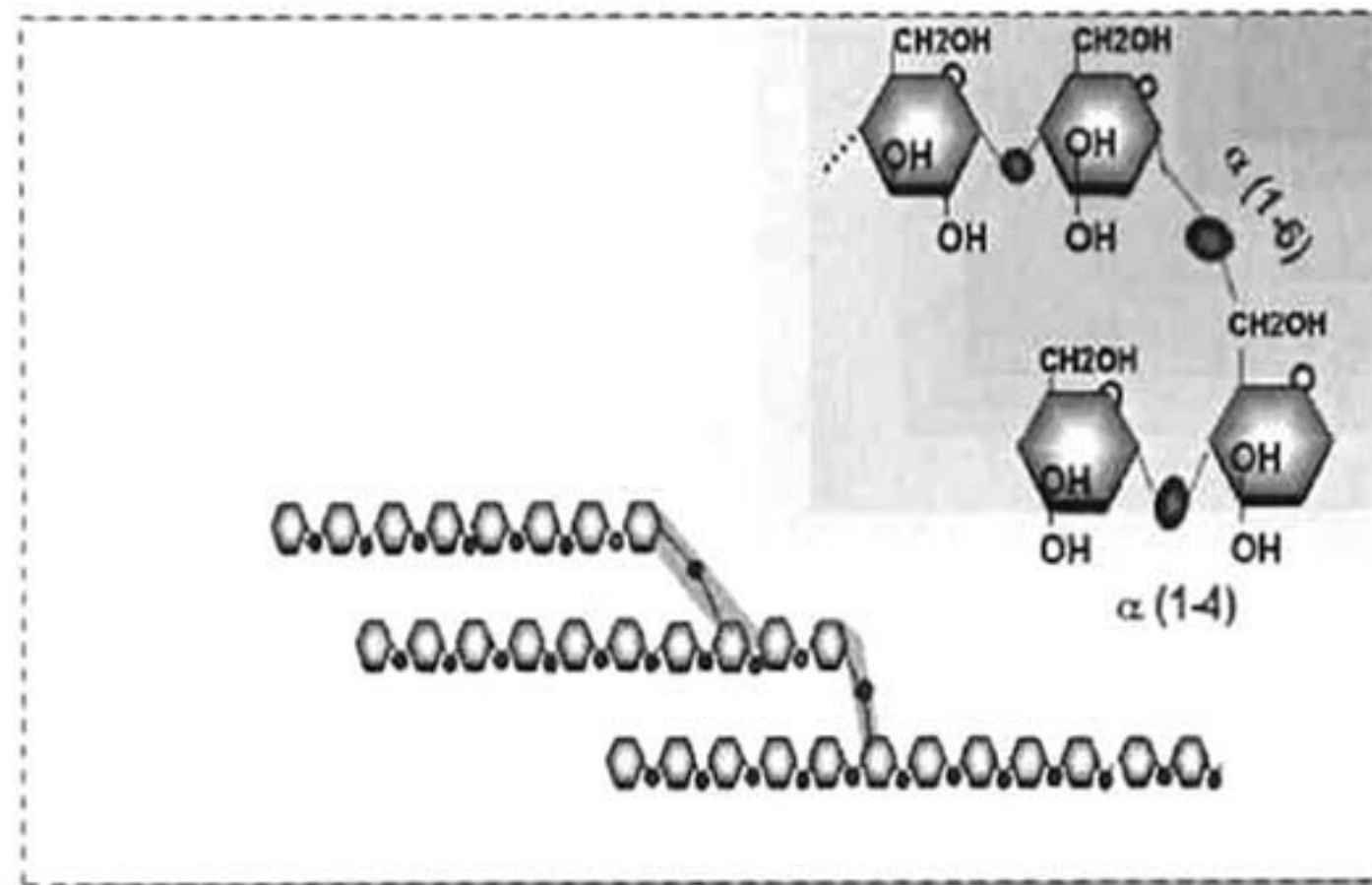
**Figura 3.** Estructura química de la amilosa

La funcionalidad y propiedades del almidón, como la resistencia mecánica y la flexibilidad, relacionadas con el carácter de la región cristalina, dependen de la relación entre la amilosa y la amilopectina, del grado de ramificación y de la distribución del peso molecular. La resistencia de almidón a la digestión es influenciada por la asociación natural entre los polímeros de almidón, con niveles más altos de amilosa asociado con una lenta digestión (Brown, 1981).

El almidón se diferencia de los demás hidratos de carbono presentes en la naturaleza en que se presenta como un conjunto de gránulos o partículas. Estos gránulos son relativamente densos e insolubles en agua fría, aunque pueden dar lugar a suspensiones cuando se dispersan en el agua. Suspensiones que pueden variar en sus propiedades en función de su origen. Las macromoléculas de



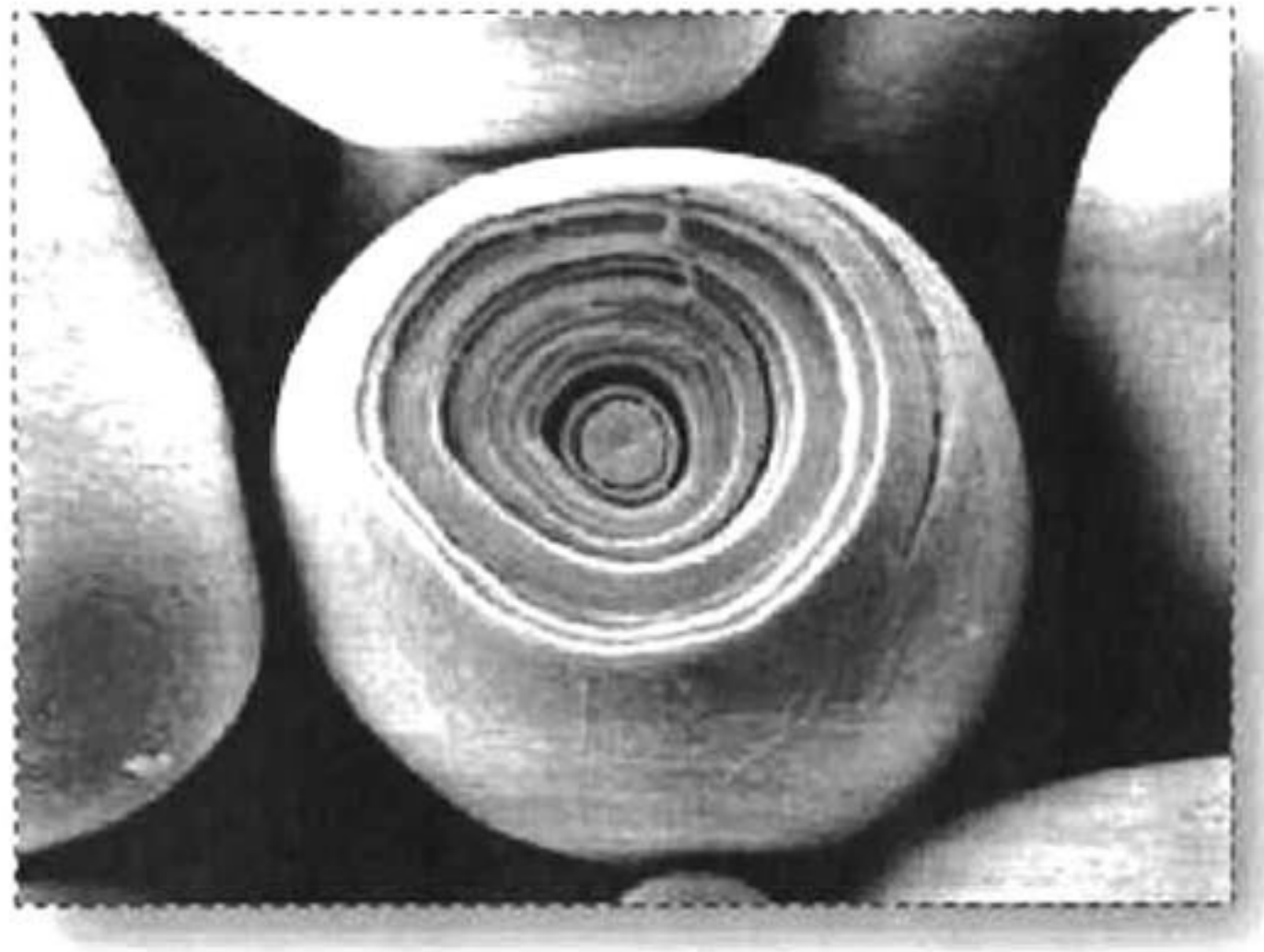
almidón presentan una organización radial, en la que el hilum representa la región menos ordenada (Baker y col., 2001). En el nivel más externo de organización se muestran las cubiertas cristalina (dura) y semicristalina (suave) alternadas. Las cubiertas son delgadas hacia el exterior del gránulo y el hilum se muestra en el centro (Figura 5).



**Figura 4.** Estructura química de la amilopectina.

Cuando los gránulos de almidón son tratados por calor se desorganiza irreversiblemente su estructura cristalina, incrementando la susceptibilidad al ataque enzimático por  $\alpha$ -amilasas y en consecuencia mejoran la digestibilidad y valor nutritivo. La temperatura a la que se alcanza esta fusión depende de la humedad. En ausencia de agua la temperatura de fusión suele ser superior a 150°C, aunque se reduce a 100-120°C con un 20% de humedad (Annison, 1994). Cuando el almidón es calentado con un exceso de humedad se produce la gelatinización, que consta de dos etapas. En la primera, que tiene lugar a 60-70°C, se produce la disgregación de los gránulos de almidón. En la segunda, alrededor de 90°C, el almidón pierde su estructura granular permaneciendo únicamente fragmentos de amilopectina en una solución de amilosa. Sin embargo, la respuesta de los almidones a diferentes condiciones de temperatura y humedad varía según el tipo de gránulo.





**Figura 5.** Gránulo de almidón nativo.

Los almidones retrogradados se refieren a ciertas formas estructurales de *AR*. La retrogradación ocurre cuando el almidón es calentado con agua más allá de su temperatura de gelatinización y después enfriado. La amilosa se encuentra en las partes amorfas del almidón, mientras que la amilopectina en la cristalina. Cuando el almidón se calienta a temperaturas mayores de 50°C en presencia de agua la amilosa del gránulo se hincha, la estructura cristalina de la amilopectina se desintegra y los gránulos se rompen. Las cadenas de polisacáridos adquieren una configuración al azar causando hinchamiento del almidón y engrosamiento entorno a la matriz tal como la gelatinización un proceso que hace más fácilmente la digestión del almidón. En refrigeración o secado ocurre la recristalización (retrogradación).

Durante la retrogradación las moléculas del almidón se reasocian y pueden formar estructuras perfectamente empaquetadas estabilizadas por enlaces de hidrogeno. Estas estructuras son térmicamente muy estables y solo pueden ser rehidratadas entre 80 y 150°C dependiendo de la magnitud y la naturaleza de la retrogradación.



Los almidones nativos se pueden distinguir de acuerdo a su tamaño, especie vegetal y porcentaje de regiones amorfas y/o cristalinas (Tabla 3), su aplicación tecnológica está relacionada directamente con estas características (Ratnayake y Jackson, 2006; Bushuk, 2001).

Tabla 3. Propiedades generales de los almidones nativos.

Espece vegetal	Amilopectina (%)	Amilosa (%)	Tgel* (°C)	Tamaño de gránulo (µm)	Forma de gránulo
Maíz	73	27	62-72	2-30	Angular esféricos
Maíz céreo	99-100	0-1	63-72	5-25	Poliédrico
Arroz	83	17	62-78	2-5	Poliédrico
Trigo	76	24	58-64	1-45	Esférico
papa	78	22	58-67	5-100	Elíptico

Fuente: Vermeulen y col., 2006; Jobling, 2004; Singh y col., 2003; Whistler y BeMiller, 1999.

Tgel\* es la temperatura de gelatinización.

Los almidones de fuentes diversas plantas, como el trigo, el maíz, el arroz y la papa han recibido amplia atención en relación a las propiedades estructurales y fisicoquímicas (Takeda y Preiss, 1993). El almidón nativo es un estabilizador de buena textura y el regulador de los sistemas alimentarios (Cousidine, 1982), pero las limitaciones tales como la resistencia térmica, la descomposición térmica y la elevada tendencia a la retrogradación limitar su uso en algunas aplicaciones industriales de alimentos.

### 2.2.1.1 Almidón resistente (AR)

Comer almidones y carbohidratos se ha vuelto una mala reputación, gracias a la moda baja en carbohidratos. Por otro lado, hay un tipo especial de almidón que se denomina almidón resistente en el cual se está poniendo mucha atención últimamente, ya que ayuda a perder peso. Cuando las bacterias descomponen los almidones indigeribles resistentes, producen una sustancia química llamada butirato, la cual ayuda a proteger las células del colon a partir del tipo de daño que puede conducir a cáncer del mismo. El butirato en los intestinos, también crea el entorno adecuado para el crecimiento de bacterias probióticas que



ayudan a mantener el intestino y el sistema inmunológico saludable. Los almidones resistentes como la fibra, reducen el estreñimiento (Sajilata y col., 2006).

Se denomina almidón resistente (*AR*) a la suma del almidón y los productos de degradación del mismo no absorbidos en el intestino delgado de los individuos sanos después de 120 minutos de haber sido consumido, pero que es fermentable en el colon. Muchos estudios han demostrado que el almidón resistente es una molécula lineal de  $\alpha$ -1,4-D-glucano, esencialmente derivados de la retrogradación de la fracción de amilosa, y tiene relativamente un bajo peso molecular ( $1.2 \times 10^5$  Da) (Tharanathan, 2002). Las propiedades físicas del almidón resistente, es baja capacidad de retención de agua, lo que lo hace un ingrediente funcional que provee un buen manejo y mejora la textura en el producto final. (Baixauli y col., 2008). En comparación con las fibras tradicionales, como cáscaras de granos, cereales o fibras de frutas, el almidón resistente posee la ventaja de no afectar las propiedades sensoriales del producto final, lo que es muy positivo para la aceptabilidad del consumidor.

El *AR* proporciona muchas propiedades, como una mejor apariencia, textura y sabor que las fibras tradicionales (Charalampopoulos y col., 2002). El *AR* es considerado componente de la fibra dietética insoluble, aporta entre 15 y 20 gramos por día. El estilo de vida y salud han sido una de las razones de la popularidad de alimentos ricos en fibra, como almidón resistente.

Los almidones sin gelatinizar altos en amilosa (60-70% del almidón total) son resistentes a la amilosis y se utilizan comercialmente como un ingrediente para aumentar el contenido de almidón resistente de alimentos procesados (Brown y col., 2000). Los almidones químicamente modificados también califican como almidones resistentes; un punto importante para la industria ya que estos alimentos se utilizan ampliamente por sus atributos funcionales en el procesamiento de alimentos. El *AR* se han clasificado cuatro tipos: *AR1-AR4*



(Tabla 3). La producción de almidones resistentes usualmente involucran hidrólisis ácida y tratamientos hidrotérmicos, calentamiento, retrogradación, extrusión, modificación química y repolimerización (Charalampopoulos y col., 2002).

**Tabla 4.** Tipos de almidón resistente.

<b>Tipos de AR</b>	<b>Ejemplos</b>
<i>AR1</i> : Físicamente inaccesible	Granos y semillas enteros o parcialmente molidos
<i>AR2</i> : Gránulos resistentes	Papa cruda, plátano verde, algunas legumbres y almidones altos en amilosa
<i>AR3</i> : Retrogradados	Papas cocidas y pan
<i>AR4</i> : Químicamente modificados	Almidones esterificados, eterificados o con enlaces entrecruzados (utilizados en alimentos procesados)

Fuente: Topping y col., 2003

Las cuatro clases distintas de *AR* en los alimentos son: (1) *AR1* – almidón físicamente inaccesible, que está atrapado total o parcialmente dentro de los granos o semillas, (2) *AR2* - algunos tipos de gránulos de almidón crudo (como del plátano y la papa) y almidones con alto contenido de amilosa (maíz rico en amilosa), (3) *AR3* almidón retrogradado (ya sea procesado a partir de almidón sin modificar o que resulten de las aplicaciones de procesamiento de alimentos), (4) *AR4* almidones químicamente modificados para obtener resistencia a la digestión enzimática (como algunos éteres de almidón, ésteres de almidón, y los almidones entrecruzados) (Ratnayake y col., 2008).

*AR1* y *AR2* representan los residuos de las formas de almidón, que se digieren muy lenta e incompletamente en el intestino delgado. *AR1* es el término dado al *AR* donde el almidón físicamente inaccesible a la digestión, por ejemplo, debido a la presencia de paredes celulares intactas en los granos, semillas o tubérculos (Hernández y col., 2008). *AR1* es estable al calor en las operaciones de cocción normales, que permite su uso como ingrediente en una amplia variedad de alimentos convencionales (Sajilata y col., 2006). *AR2* son gránulos crudos de almidón, tales como almidón de plátano verde, cuya cristalinidad los hace poco susceptibles a la hidrólisis (Hernández y col., 2008).



Los *AR2* son gránulos de almidón nativo que están protegidos de la digestión por la conformación o estructura del gránulo de almidón. Esta estructura compacta limita la accesibilidad de las enzimas digestivas, diversas amilasas, y da muestra de resistencia natural como almidón no gelatinizado. Un tipo particular de *AR2* es único ya que mantiene la estructura y resistencia incluso durante el procesamiento y preparación de muchos alimentos, este *AR2* es llamado almidón de maíz con alto contenido de amilosa (Wepner *et. al.*, 1999). *AR3* se refiere a materiales derivados de almidón no granulares que resisten la digestión. Los *AR3* se forman generalmente durante la retrogradación de los gránulos de almidón (Wepner y col., 1999). *AR3* son almidones retrogradados, que se pueden formar en los alimentos cocinados que se mantienen a baja temperatura o a temperatura ambiente (Hernández y col., 2008). *AR3* es de particular interés, debido a su estabilidad térmica. Esto permite que sea estable en las operaciones de cocción y permite su utilización como un ingrediente de una amplia variedad de alimentos convencionales (Haralampu, 2000). El procesamiento de alimentos involucra calor y humedad, en la mayoría de los casos destruye el *AR1* y el *AR2* pero hay una mayor formación de *AR3* (Faraj y col., 2004).

Aproximadamente el 80-90% de la glucosa producida por la hidrólisis enzimática del almidón estándar se metaboliza en el cuerpo humano. La mayoría de estudios han indicado que 30-70% del *AR* es degradado a ácidos grasos de cadena corta en el colon por amilasas bacterianas, mientras que una parte del *AR* escapa de la fermentación en el colon y se excreta en las heces. La digestibilidad total de *AR* depende de la categoría y fuente de *AR* consumido. De la cantidad total de *AR3* presentes en el maíz y el trigo, cerca del 84% y 65%, respectivamente, son degradados por la fermentación bacteriana en el colon. Del mismo modo, el 89% y 96% de *AR2* de papa cruda y de plátano verde respectivamente se degrada por la fermentación bacteriana en el colon. La amilosa retrogradada es responsable de la generación de *AR3*. De acuerdo con esto, la ingesta prolongada de una dieta rica en amilosa mejora rápidamente los



niveles de triglicéridos y de colesterol que una dieta rica en amilopectina (Mikulíková y col., 2008).

Además de los tres tipos principales de *AR*, el almidón modificado químicamente se ha definido como *AR4*. *AR4* describe un grupo de almidones que han sido modificados químicamente incluyen esteres de almidón, éteres de almidón y almidones entrecruzados con productos químicos de tal manera que disminuye su digestibilidad. *AR4* se pueden subdividir en cuatro subcategorías, de acuerdo a su solubilidad en el agua y los métodos experimentales mediante los cuales pueden ser analizados (Nugent, 2005).

*AR4* puede ser producido por modificaciones químicas, como la conversión, sustitución o entrecruzamiento, que puede impedir que su digestión por enzimas que bloquean el acceso y la formación de enlaces atípicos tales como  $\alpha(1-4)$  y los vínculos  $\alpha(1-6)$  (Kim y col., 2008; Sajilata y col., 2006). Además de los factores estructurales antes mencionados mediante el cual la estructura química del almidón puede influir en la cantidad de *AR* presente, otros factores intrínsecos a los alimentos con almidón pueden afectar la actividad de la  $\alpha$ -amilasa y por lo tanto degradación de almidón. Estos incluyen la formación de complejos lípido-amilosa, la presencia de inhibidores de  $\alpha$ -amilasa y también polisacáridos no amiláceos. Aditivos extrínsecos, por ejemplo, fósforo, también pueden unirse a almidón, haciéndolos más o menos susceptibles a la degradación. Además, los factores fisiológicos pueden afectar la cantidad de *AR* en un alimento.

El *AR* ha recibido mucha atención por sus beneficios potenciales para la salud y sus propiedades funcionales (Sajilata y col., 2006). El almidón resistente es una de las más abundantes fuentes de fibra dietaria de carbohidratos no digeribles (Nugent, 2005) y podría ser tan importante como *NSP* (polisacáridos no amiláceos) promoviendo la salud del intestino grueso, la prevención de las enfermedades inflamatorias intestinales (*EII*) y el cáncer colorrectal (*CCR*) (Topping y col., 2003), pero tiene un menor impacto sobre el metabolismo de



lípidos y la glucosa (Nugent, 2005). Una serie de efectos fisiológicos que se enumeran en la tabla 5 se han atribuido a *AR*, que han demostrado ser benéfico para la salud (Sajilata y col., 2006).

Las propiedades fisiológicas de almidón resistente (y por lo tanto, el beneficio potencial para la salud) pueden variar ampliamente dependiendo del diseño de estudio y las diferencias en el origen, el tipo y la dosis de almidón resistente consumido (Buttriss y Stokes, 2008; Nugent, 2005). Es posible que el procesamiento y prácticas modernas de consumo de alimentos hayan dado lugar a un menor consumo de *AR*, lo que podría contribuir al aumento de las enfermedades graves del intestino grueso en los países ricos.

**Tabla 5.** Efectos fisiológicos de almidón resistente.

<b>Efecto protector</b>	<b>Efecto fisiológico</b>
<b>Diabetes</b>	Control de la glucemia y respuestas a la insulina
<b>Cáncer colorrectal, colitis ulcerosa, enfermedad inflamatoria intestinal, diverticulitis y estreñimiento</b>	Mejora la salud del intestino
<b>Enfermedades cardiovasculares, colesterol y triglicéridos</b>	Mejora el perfil de lípidos sanguíneos
<b>Salud en el colon</b>	Funciona como prebiótico
<b>Obesidad</b>	Aumento de la saciedad y reduce el consumo de energía
<b>Osteoporosis, enriquece la absorción del calcio</b>	Aumento de la absorción de micronutrientes

Fuente: Grabitske y Slavin, 2009; Shama y col., 2008; Scholz y col., 2007.

El *AR* actúa principalmente a través de sus productos de fermentación bacteriana en el intestino grueso que, en los adultos, son transformados a ácidos grasos de cadena corta (*AGCC*) (Topping y col., 2003), pero el interés está aumentando en todo su potencial prebiótico.

Existe evidencia de que el butirato puede reducir el riesgo de la transformación maligna de las células. Los estudios en una población de ratas alimentadas con los preparados de *AR* han demostrado que el aumento en el pH fecal, así como una mayor producción de *AGCC*, están asociados con la



disminución en la incidencia de cáncer de colon, que se ha sugerido que se asemejan a los efectos de la fibra dietética soluble (Ferguson y col., 2000; Tharanathan y Mahadevamma, 2003). Bingham y col., (2003) demostraron que en poblaciones con una ingesta media baja de fibra dietética, la duplicación de la ingesta de fibra dietética puede reducir el riesgo de cáncer colorrectal en un 40%.

Los prebióticos son ingredientes no digeribles de los alimentos que afectan beneficiosamente al huésped mediante la estimulación selectiva del crecimiento y / o actividad de una o más bacterias (probióticos) en el tracto gastrointestinal y por lo tanto ejercen un efecto benéfico para la salud (Scholz y col., 2007; Roberfroid, 2000). Esto es lo que sucede con el *AR*, después de resistir la digestión enzimática en el intestino delgado llegan al colon donde es fermentado a *AGCC* que tienen la función prebiótica en el colon, ya que dichos ácidos sirven de alimento para la reproducción de los colonocitos.

Tosi y col., (2001), estudiaron la formación de *AR* por extrusión en función del contenido de humedad y temperatura de tratamiento. Utilizando sémola de maíz sin desgerminar, a tres temperaturas (150, 175 y 200 °C) y humedades comprendidos entre 12 y 20%. Encontraron que el contenido de *AR* no depende de la humedad después de contenidos de 16%, pues este comportamiento depende fundamentalmente de la temperatura a la que se efectuó el tratamiento, por lo que a temperaturas de 150 y 175 °C, se produce una disminución en el contenido de *AR*, en tanto que a 200 °C se produce un aumento.

Keenan y col., (2006) reportaron que el uso de almidón resistente en la dieta como componente de alimento funcional bioactivo es una forma natural, endógena para aumentar las hormonas intestinales que son eficaces en la reducción de la ingesta de energía, por lo que puede ser un método natural eficaz para el tratamiento de la obesidad.



Jovin y Jay-Lin en el 2009 utilizaron la extrusión y tratamiento hidrotérmico para producir almidón resistente (*AR*) como una alternativa económica a un proceso por lotes de cocción. Un tratamiento hidrotérmico (110°C, 3d) de las muestras de almidón cocido por lotes y extruido facilitaron la propagación de los cristales de almidón estables al calor e incrementaron los contenidos *AR* de 2.1% y 7.7% hasta 17.4%, determinado según el método 991.43 de la AOAC para el total de fibra dietaria. Cuando las muestras de almidón fueron procesadas y tratadas hidrotérmicamente con un contenido de humedad inferior al 70%, y tratadas con ácido se produjo un mayor contenido de *AR* que el almidón de maíz nativo (*NMS*). Esto se atribuyó a la hidrólisis parcial del almidón, El contenido de *AR* de las muestras procesadas por lotes y las extruidas después del tratamiento hidrotérmico fueron similares.

### **2.2.2 Almidones modificados**

Los almidones modificados han sido empleados por años para impartir propiedades funcionales a los alimentos, mejorando la textura, viscosidad, absorción de agua, proporcionando cohesión y manteniendo la tolerancia al proceso de elaboración. Además de proveer la calidad necesaria que el consumidor demanda, aumentando en ocasiones, la vida útil de un producto en el mercado. Algunos de los alimentos en donde pueden encontrarse los almidones modificados son los siguientes: batidos y repostería, dulcería, rellenos, saborizantes/bebidas, salsas y espesantes, sopas, glaseados, carnes, alimentos para mascotas, botanas, pudines, derivados lácteos, entre otros (Jobling, 2004).

Debido a las limitaciones de los almidones en cuanto a propiedades mecánicas y químicas, y a su alta degradación, se realizan modificaciones, que pueden ser de tipo físico, químico y microbiano o por una combinación entre estas. La modificación del almidón, implica la alteración de las características físicas y químicas del almidón nativo para mejorar sus características funcionales (Tabla 6).



El almidón puede ser modificado por medios físicos para mejorar la solubilidad en agua y cambiar su tamaño de partícula. Los métodos de modificación implican el tratamiento de los gránulos de almidón nativo en diferentes combinaciones temperatura-humedad, presión y la irradiación. La modificación física también incluye el desgaste mecánico para alterar el tamaño físico de los gránulos de almidón. El desarrollo de la biotecnología proporciona otro medio para la modificación del almidón durante el crecimiento de la planta. Diferentes niveles de amilosa, amilopectina y contenido de fósforo de fuentes vegetales diferentes se pueden producir con la reducción de la actividad enzimática de una o varias funciones enzimáticas.

### 2.2.2.1 Modificaciones químicas del almidón

El almidón es ampliamente modificado por métodos químicos. Los procesos químicos más comunes son la modificación del tratamiento con ácido, entrecruzamiento, la oxidación, y la sustitución, como la esterificación y eterificación (Figura 5). La modificación química consiste en la introducción de grupos funcionales en la molécula del almidón, lo que altera significativamente las propiedades físico-químicas. Dicha modificación de los almidones nativos granulares altera profundamente su gelatinización y el comportamiento de retrogradación (Singh y col., 2007).

**Tabla 6.** Propiedades de los almidones modificados

#### **Propiedades de los Almidones Modificados:**

Proporcionan una mejora en la funcionalidad, consistencia y fiabilidad en los procesos alimenticios.

Entregan humectación y textura a los alimentos.

Estabilizante de espumas y alimentos.

Otorga resistencia a los alimentos cuando son expuestos a altas temperaturas.

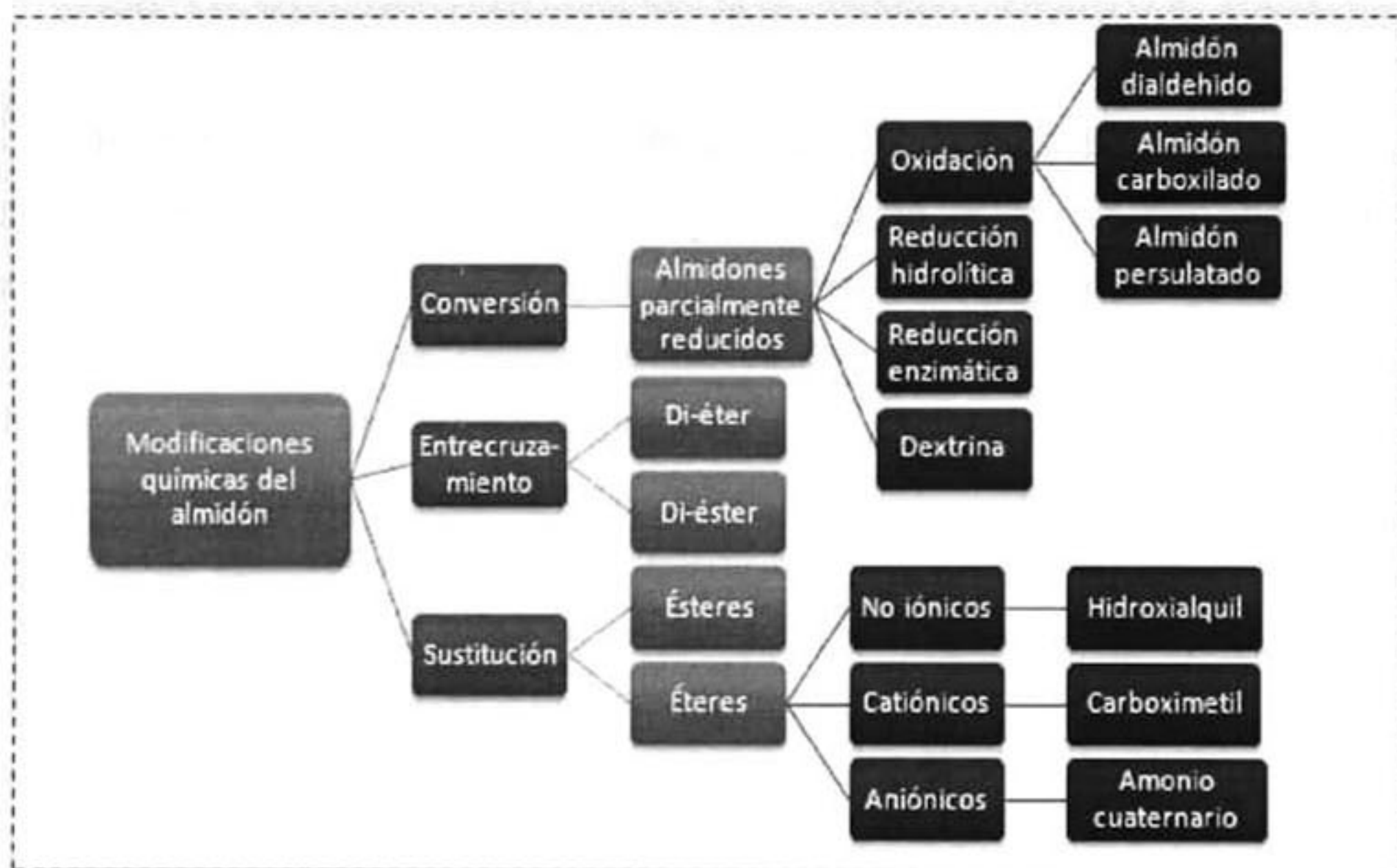
Proporcionan resistencia a los ciclos de congelación y descongelación.

Presentan solubilidad en frío



El tipo de modificación química de almidón más común consiste en el tratamiento del almidón nativo con pequeñas cantidades de reactivos químicos aprobados. La modificación química de almidón cambia la funcionalidad de éste e involucra reacciones primarias asociadas con los grupos hidroxilo del polímero.

Las modificaciones químicas que pueden usarse para la formación de *AR* son conversión, sustitución y entrecruzamiento (Figura 5). Los métodos más comunes de conversión en la industria de almidón incluyen hidrólisis ácida, oxidación, piroconversión y conversión enzimática (Qi y Xu 1999). Las propiedades de almidones convertidos pueden variar dependiendo del tipo o base de almidón utilizado y el proceso de conversión, como por ejemplo el tiempo de conversión y método utilizado (ácido, oxidante, enzima, calor o la combinación de éstos) (Thomas y Atwell, 1999).



**Figura 5.** Modificaciones químicas del almidón.  
Tabla modificada de Peñaranda y col.,2008



Con el objetivo de prevenir la retrogradación del almidón, éste es sustituido o estabilizado mediante la introducción de grupos químicos mono-funcionales, tales como acetilo o hidroxipropilo a lo largo de las cadenas poliméricas, con la formación de enlaces éster o éter. La sustitución disminuye la temperatura de gelatinización y estabiliza el almidón previniendo la re-asociación de las cadenas que causan la retrogradación de los polímeros después de tratamientos hidrotérmicos. Los almidones sustituidos o estabilizados son particularmente útiles en aplicaciones de alimentos refrigerados y congelados (Thomas y Atwell, 1999).

Las propiedades químicas y funcionales obtenidas por la modificación de almidón mediante sustitución química dependen de la fuente de almidón, condiciones de reacción (concentración del reactivo, tiempo de reacción, pH y la presencia de catalizadores), tipo de sustituyente, grado de sustitución y la distribución del sustituyente en la molécula de almidón (Singh y col., 2007).

Probablemente el tipo de modificación química de almidón más común es el entrecruzamiento o derivatización del almidón mediante el uso de reactivos multifuncionales capaces de formar enlaces éter o éster intermoleculares entre grupos hidroxilo de las moléculas de almidón (Rutenberg y Solarek, 1984; Wurzburg, 1986). Los enlaces covalentes formados por entrecruzamiento actúan como refuerzo de la estructura granular, controlando el hinchamiento y produciendo almidones que pueden tolerar altas temperaturas, esfuerzos de corte y condiciones ácidas. El entrecruzamiento altera la gelatinización del gránulo de almidón; se requiere de una mayor energía para separar las moléculas, por lo que se incrementa la temperatura de gelatinización.

La viscosidad máxima desarrollada es mayor debido a que el almidón retiene su estructura molecular; se presenta una retrogradación muy pequeña o nula. La estabilidad de la estructura molecular del almidón también la hace más resistente a la degradación ácida y mecánica. La combinación de reacciones de sustitución y entrecruzamiento han demostrado proveer al almidón de estabilidad



contra la degradación ácida, térmica y mecánica; además, retardan la retrogradación durante el almacenamiento. Los almidones con una doble modificación son ampliamente usados en aderezos de ensalada, alimentos enlatados, pudines y alimentos congelados (Wurzburg, 1986; Jane, 1997).

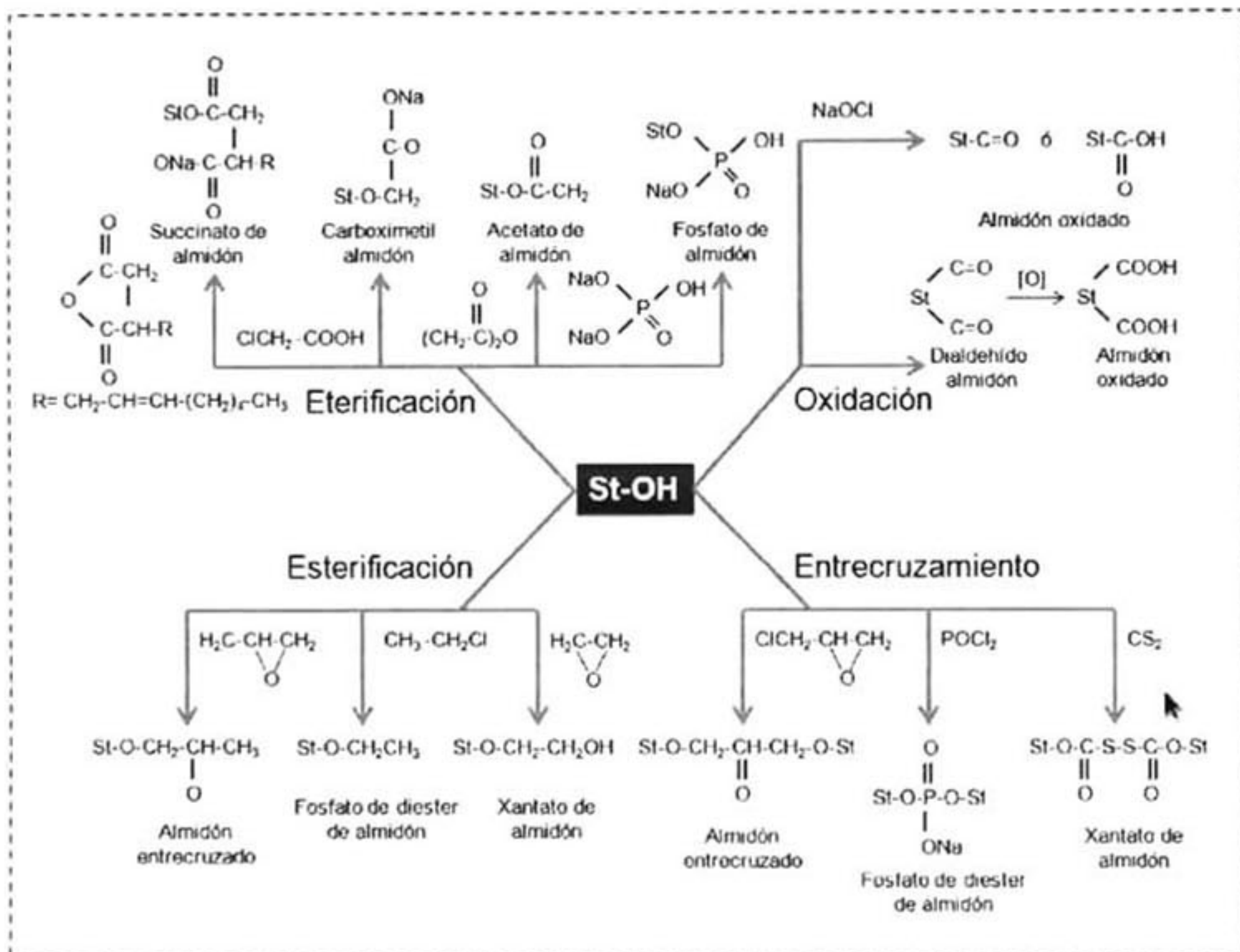
Dentro de las diferentes modificaciones químicas que se pueden realizar al almidón se encuentra la eterificación, esterificación, oxidación y entrecruzamiento (Figura 6). La derivatización se produce mediante la formación de enlaces éter o éster y el entrecruzamiento dado por la formación de enlaces covalentes entre las cadenas adyacentes de los polímeros de almidón, la oxidación de los grupos hidroxilo que forman grupos funcionales carbonilo o carboxilo y la hidrólisis de los enlaces glucosídicos son algunos de los mecanismos más utilizados para la modificación química de almidón (Thomas y Atwell, 1999; Tharanathan, 2005). Dicha modificación puede llevarse a cabo en tres estados del almidón:

- 1) En suspensión, donde el almidón se dispersa en el agua, la reacción química se lleva a cabo en un medio acuoso hasta obtener las propiedades deseadas. La suspensión se filtra, se lava y se seca.
- 2) En pasta, donde el almidón se gelatiniza con productos químicos en una pequeña cantidad de agua, la pasta se agita, y cuando la reacción se ha completado, el almidón se seca.
- 3) En el estado sólido, donde el almidón seco se humedece con productos químicos en una solución de agua, secado al aire y finalmente, reacciona a una temperatura alta (es decir,  $\geq 100^{\circ}\text{C}$ ).

El grado de modificación química es generalmente expresado como grado de sustitución (*GS*) cuando el grupo sustituyente (por ejemplo acetato o fosfato) reacciona con los grupos hidroxilo de las unidades D-glucopiranosas. La sustitución molar (*SM*) es referida cuando el grupo sustituyente puede también reaccionar con el mismo reactivo para formar un sustituyente polimérico (Thomas y Atwell 1999).



La oxidación del almidón ha sido practicada desde principios de 1800, y diversos agentes oxidantes se han introducido, por ejemplo, el peróxido de hidrógeno, hipoclorito, peryodato, permanganato, dicromato, persulfato y clorito. Los principales usos del almidón oxidado son las industrias del papel y textil. Sin embargo, la aplicación de los almidones oxidados de la industria alimentaria está aumentando debido a su baja viscosidad, alta estabilidad, claridad y propiedades de unión. El almidón oxidado para uso alimentario se produce principalmente por la reacción del almidón con hipoclorito de sodio. Los agentes de blanqueo, como el peróxido de hidrógeno, ácido peracético, permanganato de potasio, y el clorito de sodio, también se les permite por la Food and Drug Administration (*FDA*) de los Estados Unidos.



**Figura 6.** Modificaciones químicas del almidón. Modificada de Tharanathan (2005).



El almidón contiene dos tipos de hidroxilos, primario (6-OH) y secundario (2-OH y 3-OH-). Estos hidroxilos son capaces de reaccionar con reactivos multifuncionales que resultan en almidones reticulados. La reticulación o entrecruzamiento se hace para limitar la hinchazón de los gránulos de almidón en las condiciones de cocción o para prevenir la gelificación del almidón. La reticulación de almidón se lleva a cabo por un bajo nivel de reactivo. Las moléculas de almidón son polímeros de cadena larga que se producen en las proximidades en gránulos. Las moléculas de almidón pueden ser interconectados por reacciones con pequeñas cantidades de un agente multifuncional.

Los reactivos permitidos por la *FDA* para la toma de entrecruzamiento de almidón de grado alimenticio son el cloruro de fosforilo, trimetafosfato de sodio, ácido adípico mezclas de anhídrido acético, y las mezclas de trimetafosfato y tripolifosfatos de sodio. La epiclohidrina ya no es utilizada por los fabricantes de almidón en los EE.UU debido a que las clorohidrininas son carcinogénicas.

Los ésteres de almidón son un grupo de los almidones modificados en la que algunos grupos hidroxilo han sido sustituidos por grupos éster. El nivel de los sustituyentes de los grupos hidroxilo en las cadenas de almidón a menudo se expresa como grado medio de sustitución (*GS*). El grado medio de sustitución es la relación de moles de sustituyente por mol de residuos de D-glucosa (unidad de anhidroglucosa). El *GS* posible es de 3.0 cuando los tres hidroxilos son sustituidos en cada unidad de glucosa a lo largo de una cadena de almidón. El *GS* se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$DS = \frac{162W}{100M - (M-1)W} \quad \text{Ecuación 1}$$

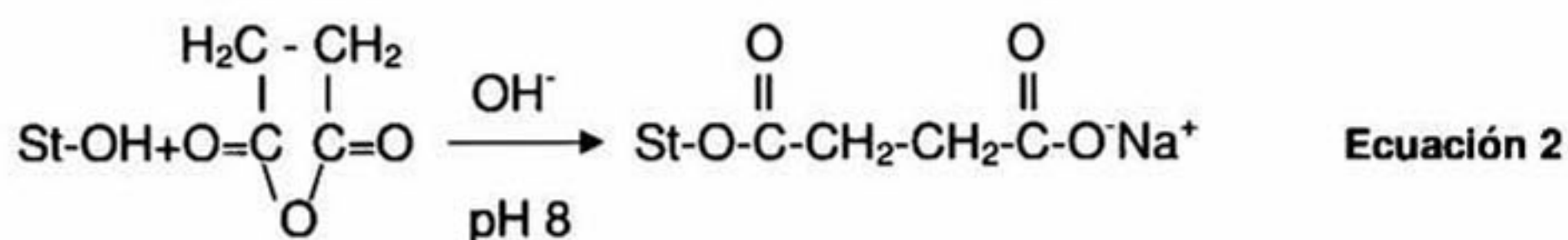
donde  $W$  = % en peso de sustituyente y  $M$  = peso fórmula de sustituyente.

Los reactivos aprobados por la *FDA* para la preparación de monoésteres orgánicos e inorgánicos de almidón para uso de alimentos son el anhídrido



acético, acetato de vinilo, anhídrido succínico, anhídrido 1-octenil succínico, y tripolifosfato de sodio.

El succinato de almidón es un medio éster producido por la reacción del almidón con anhídrido succínico (Ecuación 1). El nivel de anhídrido succínico legalmente permitido por la Food and Drug Administration (*FDA*) de los Estados Unidos en la modificación de almidón no debe exceder del 4%. El succinato de almidón con bajo *GS* se puede preparar con un procedimiento similar al acetato de almidón.

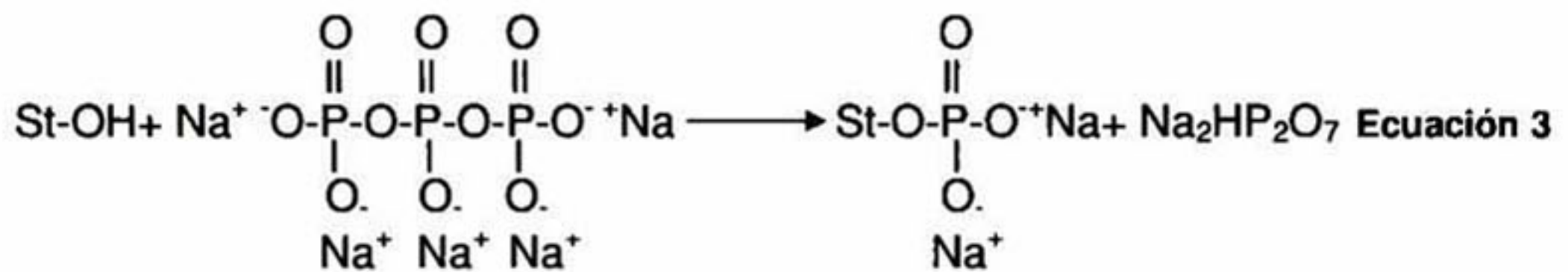


El succinato de almidón contiene un grupo carboxilo libre que incrementa el poder de retención de agua y la tendencia a hincharse en agua fría. La capacidad de hincharse en agua fría aumenta con mayores niveles de anhídrido succínico. La capacidad de hinchamiento en agua fría para tratamientos de anhídrido succínico a 0, 2 y 4% son 34, 40, 49ml respectivamente, los cuales se determina midiendo el volumen de almidón en agua en una probeta graduada (Trubiano, 1986). La presencia de grupos succinatos hidrofílicos en el de almidón de maíz incrementa la viscosidad de manera significativa. Los succinatos de almidón procesados muestran una excelente viscosidad, estabilidad y claridad, así como la estabilidad de congelación-descongelación (Bhandari y Singhal, 2002).

El pH tiene un efecto significativo sobre la viscosidad del succinato de almidón al afectar al grupo de ácidos carboxílicos. El grupo sustituyente está sobre todo en forma de ácido a un pH más bajo, que es menos hidrófila que en forma de sal. Normalmente, la mayor viscosidad se obtiene a pH neutro. El succinato de almidón es un polímero aniónico y su viscosidad se ve muy afectada por la cantidad de sal presente en la solución.



La FDA de EE.UU. también permite ortofosfato monosódico (que no exceda de 0.4% como fósforo) y oxiclорuro de fósforo (que no exceda de 0.1%) para los fosfatos de almidón que se utilizan para la modificación de almidón de grado alimenticio. El esquema de reacción de monoéster de fosfato de almidón con tripolifosfato de sodio es la siguiente:



Un método para medir la sustitución del mono y diésteres de productos de bajo GS ha sido desarrollado en base a sus puntos de equivalencia en las titulaciones de álcali. El monofosfato de almidón tiene dos puntos de equivalencia en el rango de pH de 4 a 9, mientras que, el fosfato de almidón diéster sólo tiene uno (Koch y Koppers, 1982).

Los fosfatos de almidón son polímeros aniónicos fuertemente ligados, que producen una mayor viscosidad, dispersiones más claras y estables con una mayor, textura, cohesión y resistencia a la retrogradación. Las viscosidades se reducen por la presencia de sales. La temperatura de gelatinización disminuye con el aumento del grado de sustitución y el monoéster de almidón se hincha en agua fría cuando el GS es mayor a 0,07. La dispersión de los fosfatos de almidón tiene mejor estabilidad de congelación-descongelación que otros almidones y féculas modificados. Los fosfatos de almidón son buenos agentes de emulsión debido a las propiedades iónicas. Los fosfatos de almidón se utilizan en alimentos como estabilizadores de la emulsión de aceite en agua y agentes espesantes con una buena estabilidad congelación-descongelación. Una combinación de fosfato de almidón, goma guar, y glicol de propileno se ha utilizado como un estabilizador de la emulsión de vinagre y aceite vegetal en el agua. Algunos fosfatos de almidón se han utilizado en panes para mejorar la calidad de cocción.



## **2.3 Proceso tecnológico utilizado**

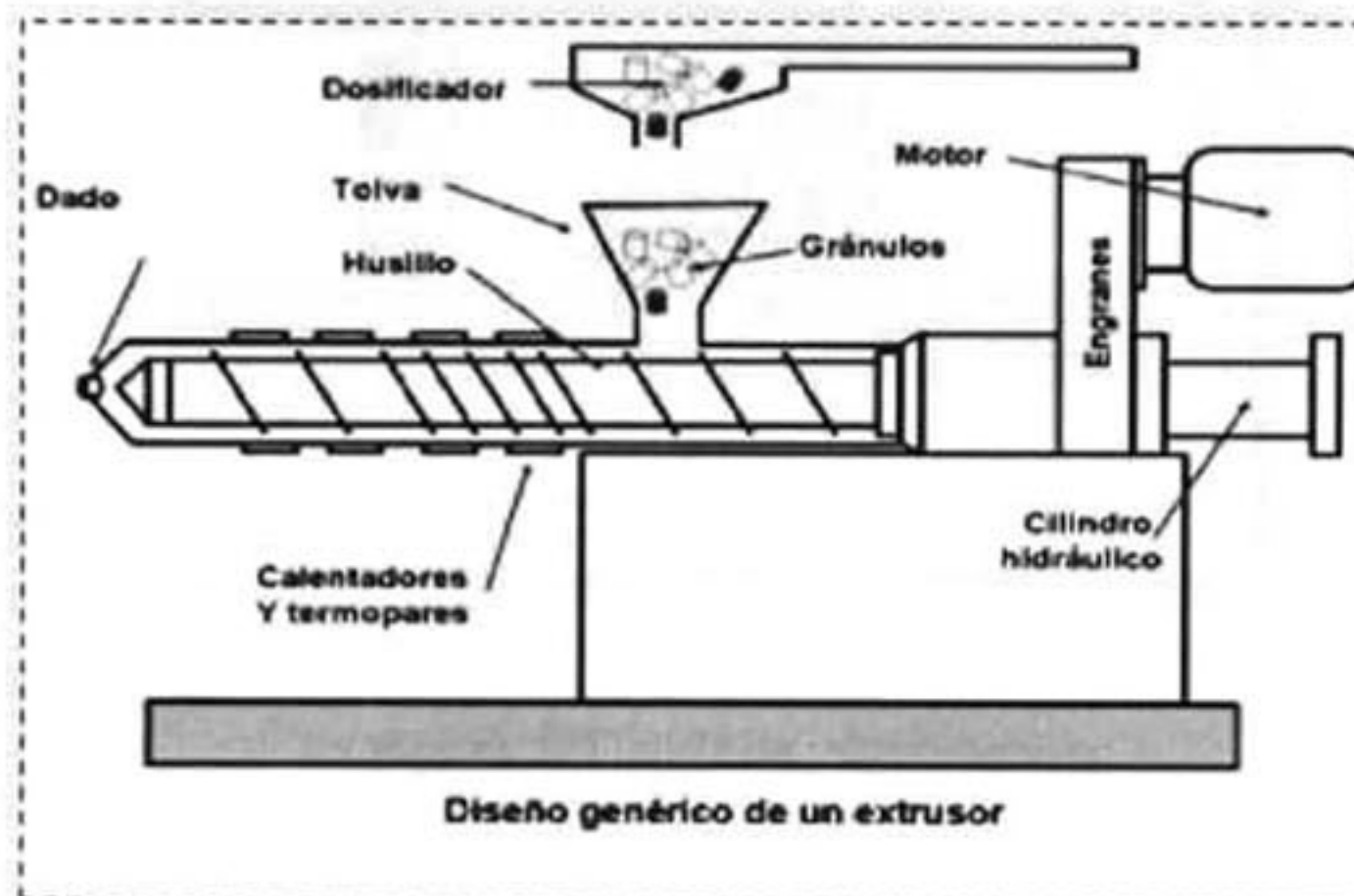
### **2.3.1 Extrusión**

La aplicación de la tecnología de extrusión en almidones fue inicialmente estudiada en el procesamiento de alimentos. La extrusión de alimentos ha sido practicada por más de 50 años con diversos desarrollos en la preparación de cereales listos para consumir (Harper, 1989). El uso de extrusores de doble tornillo para el procesamiento de alimentos comenzó en la década de 70's y se expandió en gran medida en la siguiente década. Durante estos períodos, los extrusores de doble tornillo fueron ampliamente estudiados como reactores para la modificación de biopolímeros con ácidos, álcalis y enzimas.

La extrusión se puede definir como la acción de forzar por medio de presión un material fundido a través de un dado o boquilla (Morton, 1997) en donde las condiciones de proceso son controladas (Dziekak, 1989). Los extrusores ofrecen significativas ventajas, tales como una minimización del tiempo, energía y costos, una producción continua en gran escala, alta capacidad de producción por unidad de área y ausencia de efluentes (Stanley, 1986). El principio fundamental del proceso de extrusión es convertir el material sólido en un fluido mediante la aplicación de calor y trabajo mecánico, promoviendo así la termoplastificación del mismo (Figura 6). En el almidón la combinación de la fuerza de corte, temperatura y plastificante producen un material termoplástico fundido, en donde se presenta rompimiento de la estructura granular cristalina así como plastificación. La extrusión es un proceso extremadamente versátil y el equipo se puede comportar como: (1) Un intercambiador de calor, debido a las chaquetas de calentamiento y/o enfriamiento que envuelven las paredes del cañón; (2) reactor químico de procesamiento de diversos materiales como polímeros y alimentos en condiciones de altas temperaturas, presiones, y cortos tiempos de residencia, en donde se puede producir una abertura de las diversas estructuras terciarias y cuaternarias de los biopolímeros resultando en el rompimiento y rearrreglo de los enlaces de hidrógeno y disulfuro, permitiendo la plastificación y la formación de las texturas deseadas (Olkku y Linko, 1977).



El alimento pasa entonces a la zona con menor área de paso y máxima presión. Finalmente la masa es forzada a través de una serie de orificios en la parte final del cilindro denominada boquilla. Al salir del mismo, la masa se descomprime, se expande hasta su tamaño final y se enfría rápidamente.



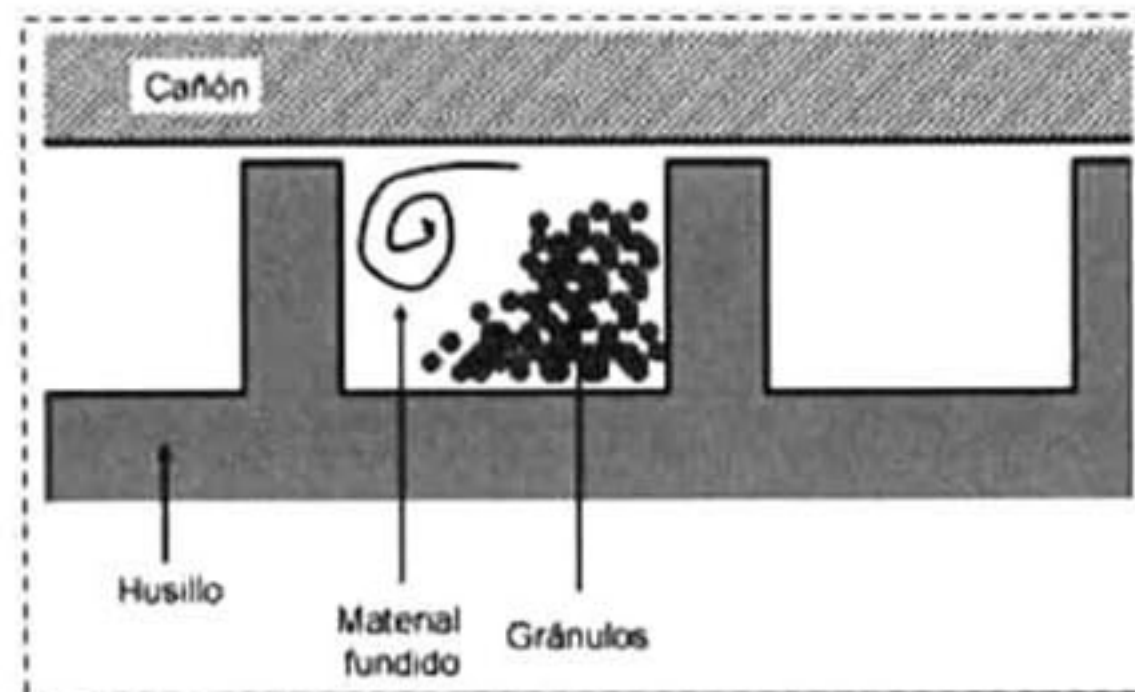
**Figura 6.** Diseño genérico de un extrusor.

La acción mecánica incluye los esfuerzos de corte y el arrastre, que empuja el polímero hacia la boquilla e implica un incremento en la presión. La primera fusión que se presenta en el sistema ocurre en la pared interna del cañón, en forma de una película delgada, resultado del incremento en la temperatura del material y posteriormente también debida a la fricción. Cuando esta película crece, es desprendida de la pared del cañón por el giro del tornillo en un movimiento de ida y vuelta y luego un barrido, formando un patrón semejante a un remolino o rotatorio sin perder el arrastre final.

Los métodos convencionales de modificación química de almidón requieren reactivos en exceso que pueden causar contaminación ambiental, así como tiempos prolongados para conseguir su funcionalidad. Se ha tenido un gran interés por solucionar estos problemas usando la tecnología de extrusión (Harper, 1981; Kim y col., 1999). Las ventajas de extrusión incluyen: construcción simple, fácil operación, bajo costo de tratamiento de la muestra, producción continua y



propiedades físicas uniformes (Watano y col., 2002). Han sido publicados numerosos trabajos sobre la preparación de almidones modificados utilizando el extrusor como un reactor continuo (Xie y col., 2006).



**Figura 7.** Fusión de materia prima.

La extrusión gana popularidad ante otros procesos por las siguientes razones:

- 1) *Versatilidad.*- Es posible obtener una gran variedad de productos mediante modificaciones en los ingredientes, las condiciones del proceso o la forma de la boquilla.
- 2) *Costos reducidos.*- La extrusión tiene menores costos de procesado y mayor productividad que otros procesos de cocinado o conformado.
- 3) *Proceso automático con gran capacidad de producción.* Transforma la materia prima en productos en un tiempo reducido comparado con otros procesos.
- 4) *Calidad en el producto.*- La extrusión con cocción implica temperaturas elevadas aplicadas durante intervalos cortos de tiempo, por lo que este tratamiento térmico limitado retiene muchos de los componentes sensibles al calor.
- 5) *No generación de efluentes del proceso.*- La extrusión es un proceso de bajo uso de agua que no genera efluentes. Esto elimina los costos de tratamiento de aguas y no crea problemas de contaminación (Guy, 2001).



Como la extrusión implica el mezclado, amasado y cocción simultáneamente, esta da lugar a una serie importante de cambios complejos en el alimento, como la hidratación de almidones y proteínas, homogenización, formación de geles, el alineamiento, fusión de grasas, desnaturalización y reorientación de proteínas, plastificación y expansión de la estructura del producto.

Las propiedades del material que se alimenta al extrusor tienen una influencia importante en la textura y color del producto final. Los factores más importantes son:

- 1) Tipo de materiales alimentados
- 2) Contenido de agua
- 3) Estado físico de los materiales,
- 4) Su composición química, particularmente los tipos y cantidades de almidones, proteínas grasas y azúcares
- 5) El pH del material húmedo.

La composición del material alimentado, su humedad y el tamaño de partícula influyen en la viscosidad del producto en el extrusor. Los parámetros de operación más importantes en un extrusor son:

- 1) Temperatura
- 2) Presión
- 3) Diámetro de los orificios de salida de la boquilla
- 4) Velocidad de corte o cizalladura.

Durante la operación, los extrusores de tornillo único actúan de forma parecida a una bomba, arrastrando el alimento a través del interior del cilindro y aumentando la presión y la temperatura antes de que se haga pasar al mismo por la boquilla. El bombeo es óptimo si el material se adhiere a las paredes del cilindro y resbala de la superficie del tornillo. Detalladamente un extrusor de tornillo único está conformado por un tornillo que rota en el interior de un cilindro acanalado,



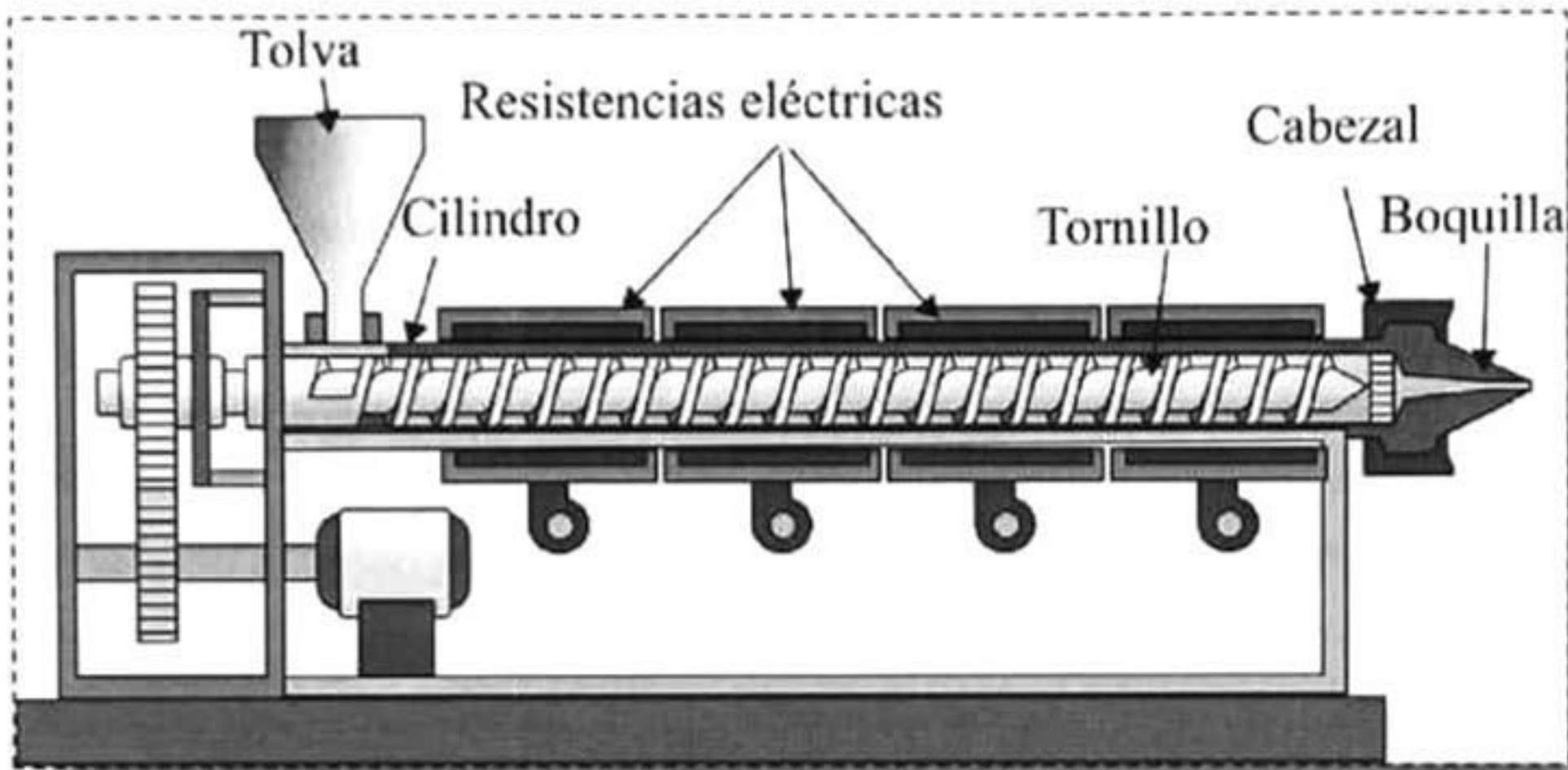
construido en aleaciones duras o en acero inoxidable endurecido para que pueda resistir la fricción que tiene lugar durante su uso (Valdés y col., 2003). En la figura 8 se puede observar de una mejor manera las partes que constituyen un extrusor de tornillo simple. Todos los extrusores se consideran divididos en tres zonas que, junto con la evolución de la presión a lo largo del extrusor. La zona de alimentación es la más cercana a la tolva, en la cual la profundidad del canal del tornillo es máxima. Tiene como objetivo principal compactar el alimento en una forma sólida densa y transportarlo hacia la siguiente zona a una velocidad adecuada. La zona de transición o compresión es la zona intermedia en la cual la profundidad del canal disminuye de modo más o menos gradual. Conforme el material sólido va compactándose en esta zona el aire que pudiera quedar atrapado escapa del material vía la tolva de alimentación. En la zona de transición, además, tiene lugar la fusión del material. La zona de dosificado se sitúa al final, en la parte más cercana a la boquilla y tiene una profundidad de canal muy pequeña y constante. En esta zona el material fundido es homogeneizado y presurizado para forzarlo a atravesar a presión la boquilla de conformado. Hay que tener presente que esta asignación de funciones a cada una de las zonas de la extrusora no es estricta; por ejemplo, el transporte, presurización y homogeneización se producen a lo largo de todo el extrusor. Los extrusores actuales pueden operar entre 10 y 500 rpm y según su tamaño, pueden proporcionar caudales de 2000 kg/h de material.

Los extrusores de un solo tornillo pueden clasificarse de acuerdo a la acción de cizalla o corte sobre el material tratado en:

- 1) *Alta cizalla*.- Se usan altas velocidades y alabes poco profundos para crear elevadas temperaturas y presiones.
- 2) *Media cizalla*.- Para proteínas texturizadas y comida semihúmeda.
- 3) *Baja cizalla*.- Se usan álabes profundos y bajas velocidades para crear presiones bajas.



Los extrusores de tornillo único requieren menor inversión y costo de operación, además de menor habilidad para trabajarlos y para su mantenimiento comparado con los extrusores de tornillos gemelos.



**Figura 8.** Partes de un extrusor.

Es viable la modificación química del almidón según lo señalado por Wang y col., (1997), ellos dijeron que varios factores afectan la succinación del almidón incluyendo el contenido de agua, la cantidad de anhídrido succínico, del tipo catalizadores y cantidad y la temperatura de reacción. El grado de sustitución (GS) aumenta con la disminución del contenido de agua y aumenta la cantidad de anhídrido succínico. Temperaturas más altas favorecen una mayor GS usando bicarbonato de sodio como catalizador, mientras que ocurre lo contrario con el hidróxido de magnesio como catalizador. Durante el desarrollo de una de varias décadas, la extrusión reactiva (*REX*) ha sido ampliamente utilizada en la modificación de fibras sintéticas de polímeros, la creación de varias resinas y termoplásticos. Más tarde se convirtió en la extrusión importante también en procesamiento de alimentos y para la modificación de almidón para fines no alimentarios, un ejemplo de esto es lo reportado por Fengwei y col., (2006) que determinó que *REX* es sin duda un proceso que hace posible y que modifica de manera eficiente los almidones y genera mejores productos con muchas aplicaciones.



### **3. JUSTIFICACIÓN**

En la actualidad México es uno de los países con mayor grado de obesidad infantil y adulta, que es la enfermedad detonadora de otros problemas de salud como diabetes e hipertensión. Esto es debido principalmente a los malos hábitos alimenticios y a la poca actividad física de la población. Uno de los alimentos chatarra más consumidos son las botanas (snacks).

Generalmente las botanas más consumidas son a base de almidón, y productos nixtamalizados fritos, pero estos productos contienen una gran cantidad de grasa y de almidón nativo digerible por el organismo en un alto porcentaje. Por otro lado un almidón resistente es decir químicamente modificado posee propiedades similares a la de la fibra insoluble proporcionando efectos benéficos a la salud como limpiar la pared intestinal, facilitar el tránsito intestinal, disminuir la concentración y el tiempo de contacto de potenciales carcinogénicos con la mucosa del colon, por lo que al elaborar botanas ricas en almidón resistente se estarán generando alimentos botanas funcionales.

La elaboración de las botanas de segunda y tercera generación producidas a través de la tecnología de extrusión termoplástica la cual es un proceso continuo de alta temperatura-corto tiempo que no genera efluentes y sirve para grandes volúmenes de producción.

Por todo lo anterior se propone optimizar las condiciones de proceso de elaboración de botanas de tercera generación y de productos directamente expandidos (botanas de segunda generación) ricos en almidón resistente y evaluar sus características de textura y sensoriales.



## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo general**

Elaborar y caracterizar botanas de tercera generación y productos directamente expandidos conteniendo almidón resistente procesadas por extrusión.

### **4.2 Objetivos específicos**

1. Optimizar el proceso de elaboración en una sola etapa de productos directamente expandidos obtenidos por la tecnología de extrusión conteniendo almidón resistente tipo IV, mediante fosfatación y succinatación de almidón nativo de papa.
2. Realizar una cinética de expansión para determinar el tiempo óptimo de expandido por microondas de las botanas de tercera generación.
3. Determinar las condiciones óptimas de procesamiento de los productos directamente expandidos y botanas de tercera generación en base al análisis de superficie de respuesta del índice de expansión, densidad aparente, índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua y luminosidad de los productos obtenidos.
4. Determinar el efecto de procesamiento en la cantidad de almidón resistente y el grado de sustitución de los mejores tratamientos.
5. Caracterizar las propiedades térmicas y estructurales de los mejores tratamientos.



## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1 Preparación de la materia prima**

#### **5.1.1 Botana control**

Para la elaboración de la botana control de 2ª y 3ª generación se acondicionaron las humedades según el diseño experimental mostrado en el apéndice 1 y 2 respectivamente. Esto sirvió para comparar las propiedades de las botanas con almidón resistente obtenido por fosfatación y succinatación con una botana libre de aditivos y componentes químicos.

#### **5.1.2 Botanas con almidón resistente obtenido por fosfatación**

Se adicionaron 4g de tripolifosfato de sodio (TPS)/100 g de almidón b/s en lotes de 300g según el método reportado por Chang y Lii, (1992) con algunas modificaciones. Se agitó constantemente un recipiente con agua destilada y se adicionó el *TPS* poco a poco hasta obtener una suspensión lechosa; como siguiente paso, se agregaron unas gotas de ácido clorhídrico para disolver por completo el reactivo usado. Terminado este proceso se adicionó la solución al almidón nativo de papa y se acondicionaron las humedades según el diseño experimental para la botanas de 2ª y 3ª generación mostrados en los apéndices 1 y 2 respectivamente. Los tratamientos se almacenaron en bolsas de polietileno a 4°C durante 12 horas para su posterior extrusión.

#### **5.1.3 Botanas con almidón resistente obtenido por succinatación**

Para el acondicionamiento de las harinas base para la elaboración de las botanas de 2ª y 3ª generación con almidón resistente obtenido por succinatación, se adicionó 1ml de anhídrido n-octenil succínico por cada 325 g de almidón b/s, se ajustó a pH 8 posteriormente se ajustó la humedad según lo indicado en los diseños experimentales encontrados en los apéndices 1 y 2.



## 5.2 Elaboración de Botanas

### 5.2.1 Productos directamente expandidos (Botanas de 2ª generación)

Para la elaboración de los productos directamente expandidos, el producto final se obtuvo directamente de la extrusión en las modificaciones que incluyen este proceso (Figura 9). El número de tratamientos fue establecido de acuerdo a las especificaciones de un diseño central compuesto rotable de segundo orden con dos variables con un  $\alpha$  de 1.414 (Apéndice 1).

El proceso de extrusión se llevó a cabo con temperaturas de barril en las zonas de alimentación, transporte y alta presión de 60, 140-170 y 140°C con una matriz redonda de 4mm de diámetro.

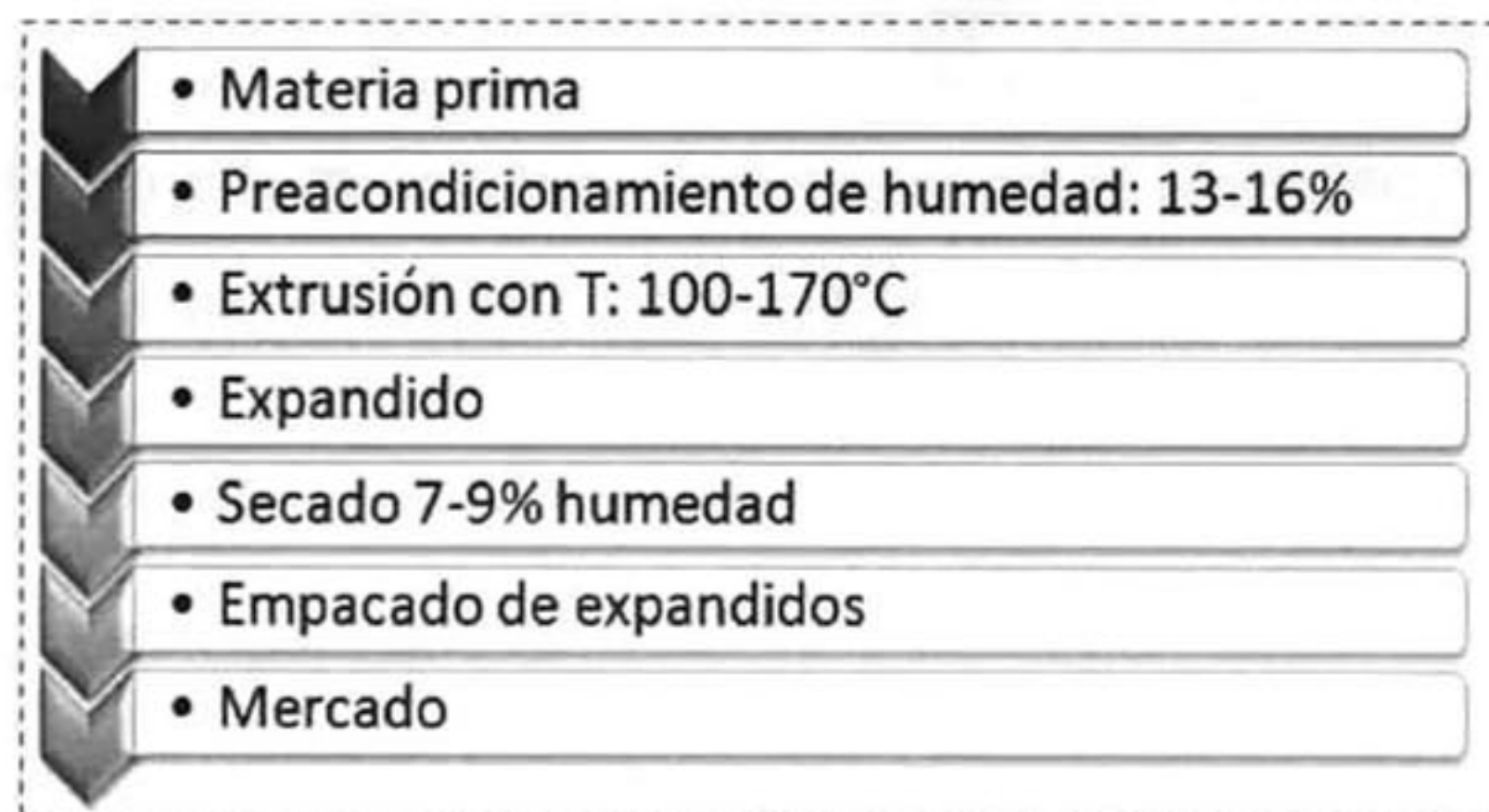


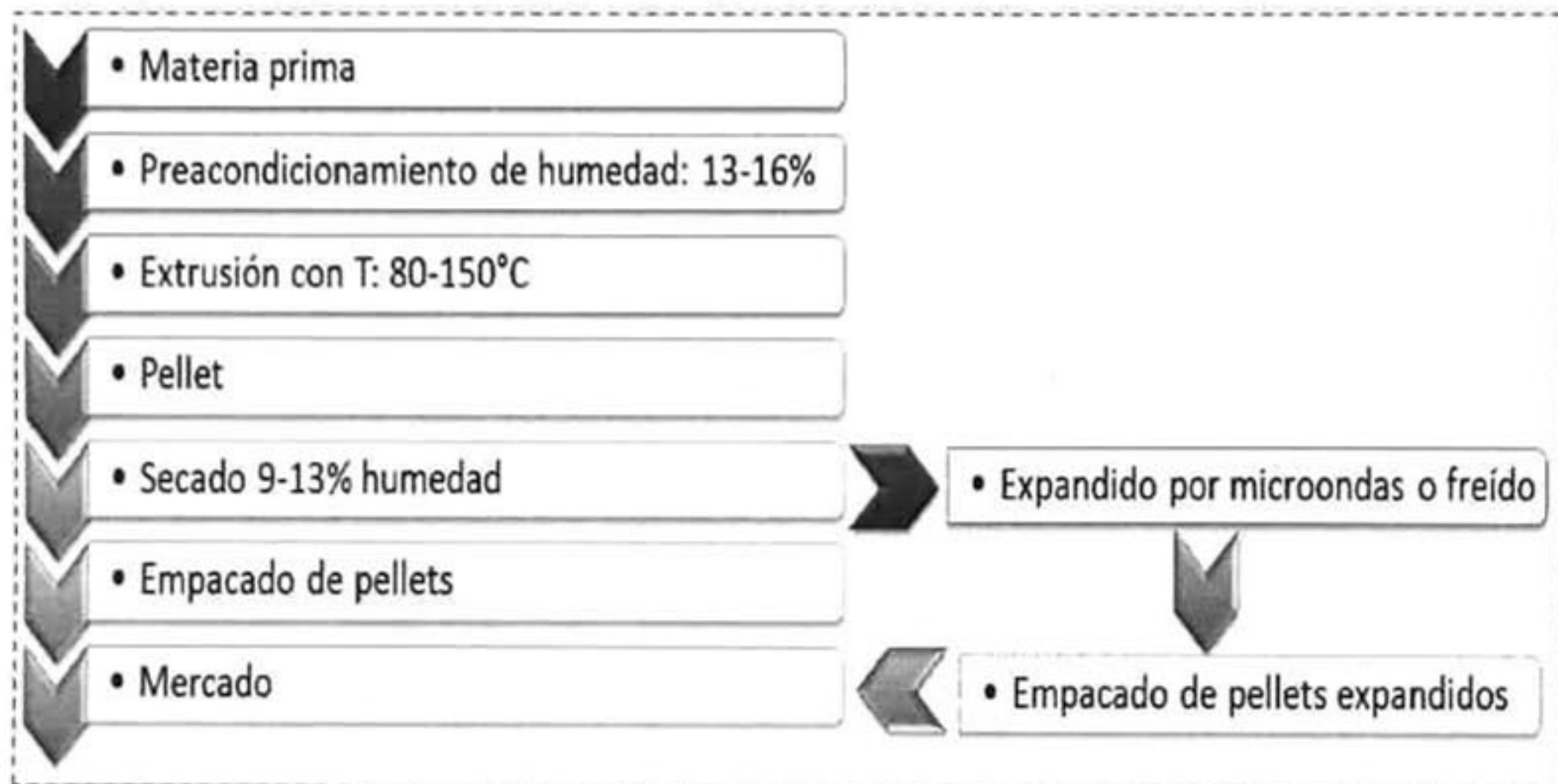
Figura 9. Esquema de elaboración de botanas de 2ª generación.

### 5.2.2 Botanas de 3ª generación

Para la elaboración de las botanas de 3ª generación. Se hizo el acondicionamiento de humedad de almidón de papa con los reactivos necesarios para la modificación y se procedió a extrusión con una matriz con abertura rectangular, con medidas internas de 20 mm de ancho y 1.5 mm de espesor, la



temperatura en las zonas de alimentación y alta presión fueron de 60 y 140°C respectivamente, la temperatura en la zona de transporte varió de acuerdo al diseño experimental elaborado de acuerdo a los estudios preliminares (Apéndice 3). La manera genérica de elaboración de las botanas se llevó a cabo de acuerdo a la figura 10.



**Figura 10.** Esquema de elaboración de botanas de 3ª generación.

## **5.4 Caracterización de propiedades fisicoquímicas y mecánicas**

### **5.4.1 Índice de expansión (IE)**

#### **5.4.1.1 Productos directamente expandidos (Botanas de 2ª generación)**

El índice de expansión de los productos extrudidos se determinó de acuerdo al método propuesto por Jin y col. (1994), dividiendo el diámetro promedio del producto extrudido entre el diámetro interior del dado de salida del extrusor, para lo cual se utilizó un vernier digital (Mitutoyo Corp., modelo CD-6 C5). Se realizaron 10 determinaciones por tratamiento y se reportó el valor promedio.



#### **5.4.1.2 Botanas de 3ª generación**

Para obtener el índice de expansión se determinó el área frontal promedio del producto expandido por microondas y se dividió entre el área frontal promedio del producto seco sin expandir (Figura 11). Dicha área se obtuvo multiplicando el ancho del producto extrudido por el espesor del mismo. Se realizaron 15 determinaciones por tratamiento.

#### **5.4.2 Densidad aparente (DA)**

##### **5.4.2.1 Productos directamente expandidos (Botanas de 2ª generación)**

La densidad aparente se determinó en los productos extrudidos de acuerdo a lo reportado por Gujska y Khan (1991). Se pesaron piezas de aproximadamente 5cm, previamente deshidratadas (45° por 24 horas). Se midieron el diámetro y la longitud de los extrudidos de 10 piezas. El volumen aparente (V) fue calculado mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l}{4} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde, d = diámetro promedio del producto extrudido (mm), l = longitud del producto extrudido (mm). La densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>) se calculó dividiendo el peso (g) de la pieza entre su volumen aparente (cm<sup>3</sup>).

##### **5.4.2.2 Botanas de 3ª generación**

Para obtener la densidad aparente se usó el método reportado por Gujska y Khan (1991), la cual se obtiene dividiendo el peso de una muestra del producto por su volumen aparente. Se pesaron pequeños trozos que representan una estructura uniforme a un rectángulo (Figura 11), estos fueron previamente deshidratados (50°C, 18h), con una humedad entre 9-13% en base seca. El volumen se obtuvo de la siguiente manera.



$a$  = largo (mm)

$b$  = ancho (mm)

$c$  = espesor del extrudido (mm)

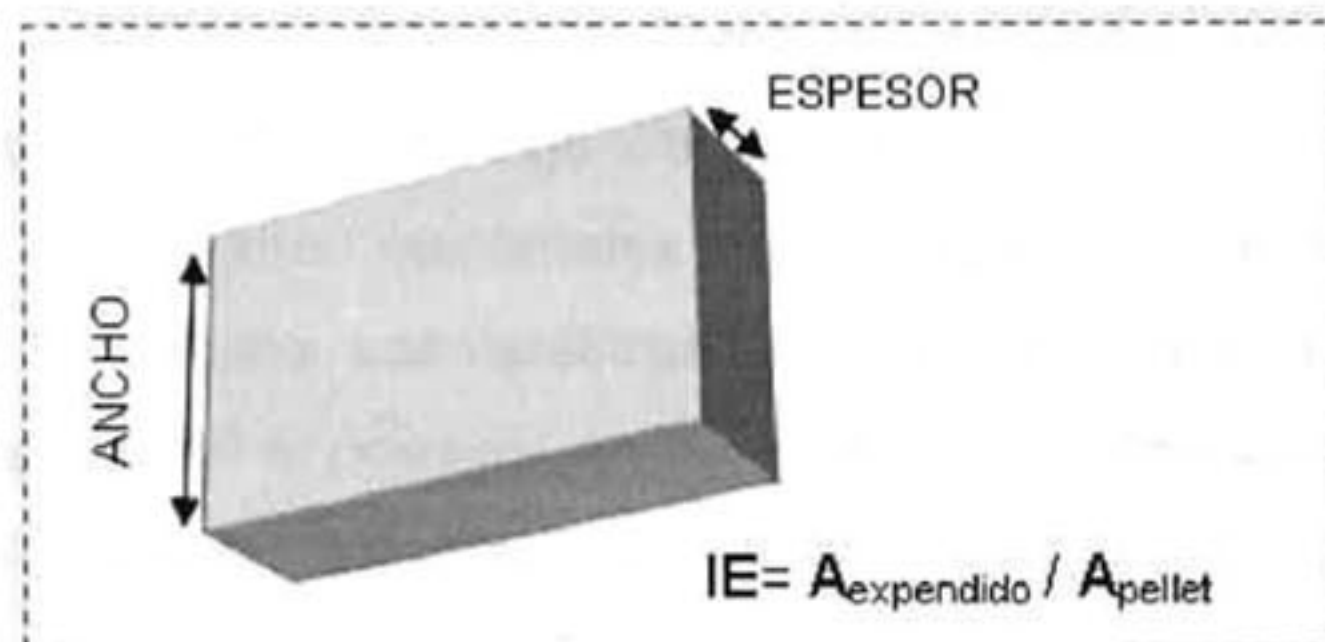


Figura 11. Área tomada para el cálculo del índice de expansión.

### 5.4.3 Luminosidad ( $L$ )

La determinación de luminosidad se realizó en las botanas control y en los productos extrudidos con almidón resistente, la misma metodología se siguió para calcular la luminosidad de las botanas de 2ª y 3ª generación. Los productos extrudidos se molieron en un molino casero para café a un tamaño de partícula igual o menor a malla 60. El almidón ( $8.0\% \pm 0.5\%$  de humedad) se colocó en una cápsula de cuarzo transparente, se compactó ligeramente hasta obtener una superficie completamente plana y se tapó con una cubierta negra. Se realizaron cinco mediciones para reportar un promedio de ellas. Se usó un colorímetro triestímulo Hunter Lab (MiniScan Hunter Lab, modelo 45/0L, Hunter Associates Lab., Ind., USA), registrándose el valor  $L^*$  [luminosidad, de 0 (oscuro) a 100 (claro)].



#### 5.4.4 Índice de absorción de agua (*IAA*) e índice de solubilidad en agua (*ISA*)

Ambos índices fueron determinados a los almidones extrudidos siguiendo el método descrito por Anderson y col., (1969). La misma metodología se utilizó para las botanas de 2ª y 3ª generación, sin importar el tipo de modificación química que se hizo en dichos productos extrudidos. Se realizaron tres repeticiones para cada análisis y los valores se reportaron como un promedio. Se pesaron 2.5 g de muestra en un tubo de centrífuga de 50 ml y se adicionaron 3 ml de agua destilada. Los tubos fueron mantenidos a una temperatura de 30°C y en agitación constante por 30 minutos. Las muestras fueron centrifugadas a 3000 rpm durante 10 minutos. Se registró el peso del residuo sólido y el sobrenadante se evaporó en un crisol de aluminio en una estufa a temperatura de 105°C. El peso del residuo en el crisol se registró como residuo de evaporación. El índice de absorción de agua (*IAA*) e índice de solubilidad en agua (*ISA*) se calcularon de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$IAA = \frac{\text{peso del residuo de centrifugación}}{\text{peso seco de la muestra} - \text{peso del residuo de evaporación}} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$ISA = \frac{\text{peso del residuo de evaporación}}{\text{peso seco de la muestra}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

#### 5.4.5 Fuerza de penetración (*FP*)

Se determinó en piezas extrudidas de 5cm de longitud para las botanas de 2ª generación y pellets expandidos para las botanas de 3ª generación, usando la misma metodología para las botanas control y modificadas químicamente; utilizando un texturómetro Universal texture analyzer TA-XT2®, en un modo de compresión, por punción, para determinar la fuerza requerida para penetrar el producto extrudido. Se usó una aguja cilíndrica de 2mm de diámetro y de punta plana, corrido a una velocidad de descenso de 2mm\*s<sup>-1</sup> y una distancia de penetración de 3mm. Las muestras fueron colocadas sobre una plataforma de



1 cm de espesor, que contiene una ranura sobre la cual se colocan las muestras, a manera de que no se muevan durante la punción. Se realizaron 15 mediciones por tratamiento y se reportó la máxima fuerza de penetración en N.

#### **5.4.6 Determinación de almidón resistente (AR)**

Para encontrar la cantidad de almidón resistente obtenido en las botanas control, fosfatadas y succinatadas de 2<sup>a</sup> y 3<sup>a</sup> generación se usó el método de Goñi y col., (1996), que ayuda a determinar la cantidad de almidón indigestible en muestras vegetales tal y como se ingieren. Inicialmente se realizó una hidrólisis proteica con pepsina a pH ácido para emular las condiciones estomacales, seguida de la hidrólisis del almidón digestible con  $\alpha$ -amilasa pancreática durante 16 horas y a pH cercano a la neutralidad. Una vez eliminados los productos de la hidrólisis tras centrifugación, en el residuo permaneció la fracción de almidón indigerible. Esta se dispersó en medio alcalino e hidrolizó en su totalidad con amiloglucosidasa, determinándose la glucosa liberada mediante un método enzimático-colorimétrico.

#### **5.4.7 Determinación de grado de sustitución (GS)**

##### **5.4.7.1 Grado de sustitución de almidones fosfatados**

El contenido de fósforo de los almidones fosfatados se determinó siguiendo el método descrito por Smith y Caruso (1964). Se realizaron 3 repeticiones para cada análisis y se reportó el valor promedio. El grado de sustitución fue calculado con la siguiente ecuación:

$$GS = \frac{162P}{(3100 - 102P)} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde P = % de fósforo (en base seca) en el almidón fosfatado.



#### 5.4.7.2 Grado de sustitución de almidones succinatados.

Se determinó de acuerdo a lo reportado por Jeon y col., (1999). Se disolvieron 0.1 gr de muestra en 10 ml de dimetil sulfóxido (*DMSO*) calentando 10 minutos a 70°C. Después de enfriar, se adicionaron 5-6 gotas de indicador de fenolftaleína. La solución fue titulada con una solución estándar de 0.05 M de hidróxido de sodio hasta obtener un color rosa pálido. El grado de sustitución fue obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$GS = \frac{0.162 \cdot V_{NaOH} \cdot \frac{M_{SOL}}{W_{mues}}}{1 - \left[ 0.210 \cdot V_{NaOH} \cdot \frac{M_{SOL}}{W_{mues}} \right]} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde  $V$  = Volumen de titulación de la solución de NaOH (ml),  $W$  = peso seco de la muestra (g) y  $M$  = Molaridad de la solución de NaOH. Los pesos moleculares de la glucosa anhidra (162) y anhídrido octenil succínico (210) están representados en la ecuación. Se llevaron a cabo dos repeticiones por cada análisis y se reportó el promedio de las mediciones.

### 5.6 Caracterización de propiedades estructurales y térmicas

#### 5.6.1 Calorimetría diferencial de barrido (*DSC*)

Las propiedades térmicas de los materiales obtenidos por extrusión se realizaron usando un calorímetro diferencial de barrido *DSC-60* marca Shimadzu. Previamente, el equipo se calibra con indio, el cual tiene un punto de fusión de 156.4 °C y una entalpía de 6.8 cal/g. La temperatura de transición se evaluó mediante el método propuesto por Krueger y otros (1987) y Ordorica (1988). Se pesaron 3mg de muestra (base seca, n=3) y se colocaron sobre una cápsula estándar de aluminio de 40 µl, se añade 7 µl de agua desionizada con una jeringa Hamilton (Hamilton Company, USA) y se sellaron herméticamente. Esto permitió preparar la muestra 1 h antes de realizar los análisis. Una cápsula estándar de aluminio vacía se utilizó como referencia. Entonces, la muestra se sometió a un



calentamiento programado en un rango de temperatura de 20 °C a 180 °C y a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. La temperatura inicial (onset), el pico de temperatura ( $T_p$ ), temperatura final y la entalpía de transición ( $\delta H$ ) se obtuvieron directamente de los análisis utilizando el software TA Instruments OS/2, versión 2.1.

### 5.6.2 Difractometría de rayos X

Las modificaciones de cristalinidad de las batanas de 2ª y 3ª generación de almidón nativo y las modificadas por fosfatación y succinatación fueron estudiadas por el método de difracción de rayos-X descrito por Martínez (1997). Esta determinación se realizó con las muestras molidas a un tamaño de partícula menor a malla 40 (420  $\mu\text{m}$ ), con un contenido de humedad de entre 9 y 13%. Las muestras fueron empacadas en un porta-muestras de vidrio con un profundidad de 0.5 mm y montadas en un difractómetro de rayos X (Siemens D500).

Los difractogramas fueron obtenidos con un barrido de ángulo de Bragg de 5°-30° sobre una escala de  $2\theta$ , con intervalos de 0,02, operando a 30 KV y 16 mA, con una longitud de onda  $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ . La cristalinidad relativa se calculó de acuerdo al método Hermen. El área de la fracción cristalina fue dividida por el área de la fracción de difracción de la muestra control. El área de la fracción cristalina del difractograma presentando por la muestra no extrudida se considerará como la muestra control con 100% de cristalinidad y la cristalinidad relativa fue calculada como:

$$CR(\%) = \frac{(RCEx * 100)}{RCH} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde CR = cristalinidad relativa (%), RCEx = región cristalina del producto extrudido y RCH = región cristalina de la mezcla sin procesar (control).



### **5.6.3 Microscopia electrónica de barrido (*SEM*)**

Los análisis de microscopía electrónica de barrido se realizaron a las botanas de acuerdo con el método descrito por Cárabez y col., 1989. A temperatura ambiente, la muestra se cortó y se pegó verticalmente sobre una placa metálica (para visualizar transversalmente) en un Microscopio Electrónico de Barrido Philips®, modelo XL30 Esem, empleando un detector de electrones secundarios y un campo de 20 KV para así se registrar las respectivas microfotografías.

### **5.6.4 Perfiles de viscosidad (*RVA*)**

Las características de viscosidad de la botana control, con almidón fosfatado y succinatado de 2ª y 3ª generación se evaluaron usando un equipo "Rapid Visco-Analyzer" (*RVA*), modelo 3C (Newport Scientific PTY Ltd., Sydney, Australia). Se utilizaron 2.5g de muestra en 25.5ml de agua destilada. Las mediciones se realizaron de acuerdo a las especificaciones del método de la AACC 61-02 (1999). La temperatura inicial (50 °C fue mantenida durante un minuto y posteriormente la temperatura fue elevada a 92 °C a una velocidad de calentamiento de 5.6 °C/min. Una vez alcanzada la temperatura indicada, ésta se mantuvo constante durante 5 minutos; el enfriamiento se llevó a cabo a la misma velocidad de calentamiento hasta alcanzar una temperatura de 50 °C temperatura final se mantuvo constante durante dos minutos. El tiempo total de la prueba fue de 23 minutos.



## 5.7 Análisis estadístico

Los datos experimentales fueron analizados mediante la metodología de superficie de respuesta, la cual es aplicada usando el paquete estadístico Design Expert (Stat-Ease 2001) versión 6.0.5. Se empleó un polinomio de orden k (lineal, cuadrático o cúbico según la significancia de los datos experimentales) con dos variables (ecuación 1) para predecir el comportamiento experimental:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{111} x_1^3 + \beta_{222} x_2^3 + \beta_{112} x_1^2 x_2 + \beta_{121} x_1 x_2^2$$

**Ecuación 11**

Donde:

$y$  = respuesta genérica

$B_{i...ij}$  = coeficientes de regresión

$x_1$  = Contenido de humedad

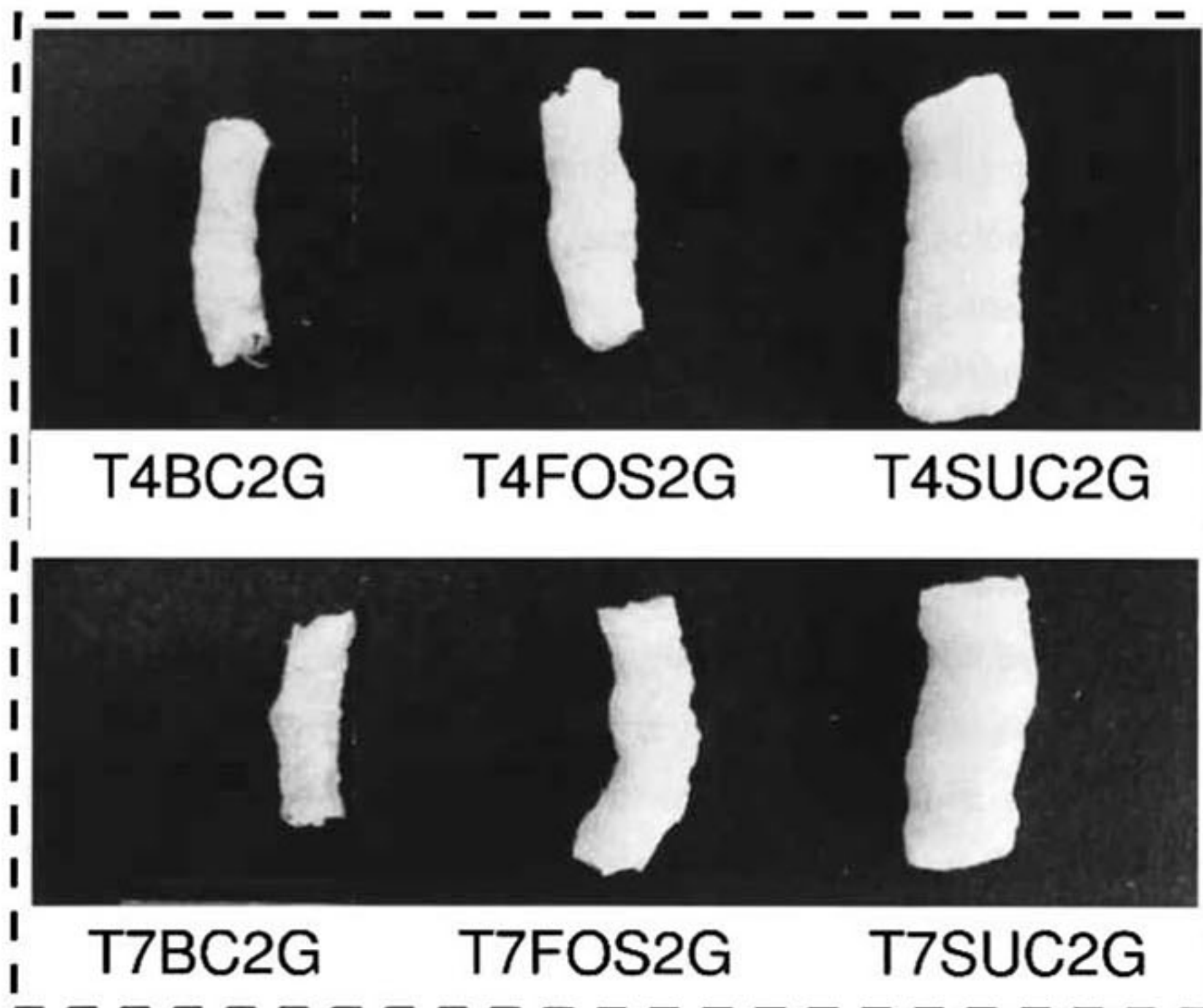
$x_2$  = Temperatura de proceso



## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Productos directamente expandidos (Botanas de 2ª generación)

La extrusión de las botanas de segunda generación se llevó a cabo con temperaturas mayores a 150°C y velocidades de tornillo mayores a 45 Hz con una humedad de 16% que de acuerdo a estudios preliminares resultó en un índice de expansión (IE) de expansión mayor que a humedades más altas. En la figura 12 se muestra la apariencia de los tratamientos 4 y 7 de productos expandidos directamente con almidón resistente obtenido por fosfatación, succinatación y una botana control que es libre de aditivos y reactivos químicos y se puede observar que para los dos tratamientos mostrados la botana con almidón succinatado presentó una mayor expansión comparada con la botana control y la botana con almidón fosfatado.



**Figura 12.** Apariencia de tratamientos 4 (procesado a 55Hz y 170°C) y 7 (procesado a 50Hz y 145.6°C) de los productos directamente expandidos (T=tratamiento, BC=botana control, FOS=botanas con almidón fosfatado, SUC=botanas con almidón succinatado, 2G=de segunda generación o productos directamente expandidos).



## 6.1.1 Propiedades fisicoquímicas y de textura

### 6.1.1.1 Índice de expansión (*IE*)

La expansión en general es el resultado de las modificaciones de las condiciones de operación del extrusor y el material utilizado. La expansión está influenciada por los bajos contenidos de humedad de la materia prima, la temperatura del proceso, los incrementos en el esfuerzo de corte y en los tiempos de residencia. Estos parámetros probablemente pueden afectar potencialmente el grado de gelatinización del almidón y por tanto el grado de expansión (Moraru y Kokini, 2003). Chang y Lii (1992) reportaron que una temperatura elevada de extrusión conduce a una mayor presión de vapor que favorece la expansión inicialmente, aunque esto puede conducir también a una disminución en la viscosidad del almidón plastificado y consecuentemente incrementar la tendencia de los extrudidos a colapsar.

Los valores de índice de expansión están relacionados con el grado de sustitución del almidón, ya que soportan la formación de estructuras tridimensionales firmes en los extrudidos. La densidad aparente (*DA*) refleja la compactación del material. Brümmer y col., (2002) reportaron que la caída abrupta de presión a la salida del dado del extrusor causa la plastificación del material dentro del barril al ser calentado a temperaturas mayores a los 100°C, favoreciendo el crecimiento de la burbuja y como consecuencia se produce la expansión por la rápida evaporación de agua, formando una estructura firme por el enfriamiento del material extrudido. Debido a lo anterior se puede decir que los extrudidos fosfatados presentaron menores valores de *IE*. Por otro lado los extrudidos succinatados presentaron valores muy superiores de *IE* una vez que el contenido de anhídrido-octenil succínico es muy bajo, lo que permite una buena estabilidad en la estructura formada por los enlaces entrecruzados, permitiendo así, valores muy altos de *IE* (Gráfica 1).



**Tabla 7.** Análisis de varianza para el índice de expansión (IE), Densidad aparente (DA), Índice de absorción de agua (IAA), Índice de solubilidad en agua (ISA), Fuerza de penetración (FP) y Luminosidad (L) de productos directamente expandidos (botanas de segunda generación).

Respuesta	Botana	R <sup>2</sup>	Coefficiente de variación (%)	Valor de F	P de F (modelo)	Falta de ajuste
IE	BC	0.2670	3.30	0.51	0.7620	0.0002
	FOS	0.9694	1.89	22.64	0.0017	0.0014
	SUC	0.9797	0.53	34.41	0.0006	0.0608
DA	BC	0.9927	0.62	97.51	<0.0001	0.9462
	FOS	0.9817	4.36	38.23	0.0005	0.8624
	SUC	0.9550	3.40	15.17	0.0043	0.0252
IAA	BC	0.6192	7.92	2.28	0.1566	0.0406
	FOS	0.9337	3.86	10.05	0.0109	0.0323
	SUC	0.9615	5.27	17.85	0.0029	0.0659
ISA	BC	0.8033	4.13	2.92	0.1283	0.0039
	FOS	0.8362	2.86	3.65	0.0867	<0.0001
	SUC	0.9503	2.33	13.66	0.0055	0.1470
FP	BC	0.7988	10.68	2.84	0.1346	<0.0001
	FOS	0.9773	9.55	30.70	0.0008	0.0062
	SUC	0.8925	7.69	5.93	0.0337	0.0038
L	BC	0.9954	0.14	153.73	<0.0001	0.6039
	FOS	0.9133	0.46	7.53	0.0205	0.3822
	SUC	0.9866	0.099	52.43	0.0002	0.5955

BC= botana control,  
 FOS= botanas con almidón resistente obtenido por fosfatación,  
 SUC=botanas con almidón resistente obtenido por succinatación.



Tabla 8. Diseño experimental utilizado y variables de respuesta: índice de expansión (IE), densidad aparente (DA), índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), fuerza de penetración (FP) y luminosidad (L) para botana control de productos directamente expandidos.

BOTANA CONTROL								
Tratamiento	Variables independientes		Variables dependientes					
	$X_1$	$X_2$	IE	DA(Kg/m <sup>3</sup> )	IAA	ISA(%)	FP(N)	L
1	45	150	2.33	536.55	10.98	68.10	80.64	88.59
2	55	150	2.27	550.68	10.06	66.50	77.09	87.79
3	45	170	2.45	486.35	11.80	70.10	64.88	87.04
4	55	170	2.37	512.11	9.91	74.60	58.69	89.18
5	42.93	160	2.29	528.30	10.82	70.00	65.53	85.41
6	57.07	160	2.54	506.31	8.13	62.90	95.68	89.61
7	50	145.58	2.42	510.81	9.34	57.90	87.15	88.93
8	50	174.41	2.45	541.04	9.26	71.70	89.23	88.84
9	50	160	2.37	556.35	9.54	68.10	93.10	88.94
10	50	160	2.37	558.27	10.01	66.50	93.10	88.96
11	50	160	2.35	555.60	9.21	68.10	92.49	89.26
12	50	160	2.35	564.71	8.95	67.20	92.75	89.09
13	50	160	2.37	560.89	9.51	69.10	92.99	89.01
BOTANA CON ALMIDÓN RESISTENTE OBTENIDO POR FOSFATACION								
Tratamiento	Variables independientes		Variables dependientes					
	$X_1$	$X_2$	IE	DA(Kg/m <sup>3</sup> )	IAA	ISA(%)	PF(N)	L
1	45	150	2.59	421.85	7.70	66.80	67.34	86.14
2	55	150	2.82	363.54	8.81	77.60	40.77	87.52
3	45	170	2.82	315.93	9.71	72.90	33.43	85.81
4	55	170	3.23	225.72	11.38	80.60	12.97	88.02
5	42.93	160	2.81	306.19	10.11	76.46	32.72	86.40
6	57.07	160	2.68	382.85	10.27	79.50	49.43	87.73
7	50	145.58	2.92	328.37	8.92	76.20	28.28	87.19
8	50	174.41	2.73	319.32	10.25	79.40	18.54	87.29
9	50	160	2.60	479.00	9.33	75.60	61.69	88.18
10	50	160	2.57	477.23	8.93	75.40	58.95	88.63
11	50	160	2.57	464.97	9.19	75.30	62.01	87.68
12	50	160	2.59	440.55	8.86	75.10	62.71	88.53
13	50	160	2.60	442.15	9.30	75.70	59.23	87.90
BOTANA CON ALMIDÓN RESISTENTE OBTENIDO POR SUCCINATACION								
Tratamiento	Variables independientes		Variables dependientes					
	$X_1$	$X_2$	IE	DA(Kg/m <sup>3</sup> )	IAA	ISA(%)	PF(N)	L
1	45	150	3.73	101.04	16.33	85.60	4.80	90.91
2	55	150	3.82	118.47	14.22	84.80	6.06	90.39
3	45	170	3.52	116.39	18.28	84.80	4.94	89.49
4	55	170	3.55	125.13	10.55	64.70	6.47	90.25
5	42.93	160	3.60	105.52	17.09	81.60	7.07	89.32
6	57.07	160	3.73	113.85	17.00	84.00	6.90	90.28
7	50	145.58	3.64	119.37	14.60	84.70	6.73	90.65
8	50	174.41	3.73	99.85	14.37	77.60	4.48	90.95
9	50	160	3.62	132.71	12.37	82.80	6.71	90.75
10	50	160	3.59	131.82	12.69	81.40	6.91	90.69
11	50	160	3.59	129.03	12.63	82.80	7.13	90.65
12	50	160	3.58	134.51	11.54	79.00	7.07	90.60
13	50	160	3.61	134.51	11.78	80.90	7.07	90.50

$X_1$ = velocidad de tornillo (Hz),  $X_2$ = temperatura en la zona de alta presión del extrusor (°C)



**Tabla 9.** Coeficientes de regresión del modelo y nivel de significancia para las variables de respuesta: Índice de expansión (IE), densidad aparente (DA), índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), fuerza de penetración (FP) y luminosidad (L) de los productos directamente expandidos (botanas de segunda generación).

Respuesta	Coeficientes											
	Intercepto	Lineales			Cuadráticos			Cúbicos			Interacciones	
		b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>11</sub>	b <sub>22</sub>	b <sub>111</sub>	b <sub>222</sub>	b <sub>12</sub>	b <sub>13</sub>	b <sub>23</sub>	b <sub>123</sub>
IE	BC	2.36	0.025 <sup>NS</sup>	0.032 <sup>NS</sup>	0.009 <sup>NS</sup>	0.018 <sup>NS</sup>	-	-	0.0036 <sup>NS</sup>	-	-	0.0036 <sup>NS</sup>
	FOS	2.59	0.37 <sup>***</sup>	0.39 <sup>***</sup>	0.099 <sup>***</sup>	0.14 <sup>***</sup>	-0.21 <sup>***</sup>	-0.023 <sup>***</sup>	0.046 <sup>NS</sup>	-0.023 <sup>***</sup>	-	0.046 <sup>NS</sup>
	SUC	3.60	0.13 <sup>NS</sup>	-0.27 <sup>***</sup>	0.029 <sup>**</sup>	0.038 <sup>***</sup>	0.017 <sup>NS</sup>	0.15 <sup>***</sup>	-0.015 <sup>NS</sup>	-0.015 <sup>NS</sup>	-	-0.015 <sup>NS</sup>
DA	BC	559.17	27.72 <sup>***</sup>	-55.08 <sup>***</sup>	-20.98 <sup>***</sup>	-16.67 <sup>***</sup>	-17.75 <sup>***</sup>	32.88 <sup>***</sup>	2.91 <sup>NS</sup>	32.88 <sup>***</sup>	-	2.91 <sup>NS</sup>
	FOS	460.78	-101.36 <sup>***</sup>	-118.67 <sup>***</sup>	-58.74 <sup>***</sup>	-69.07 <sup>***</sup>	64.23 <sup>***</sup>	57.74 <sup>***</sup>	-7.97 <sup>NS</sup>	57.74 <sup>***</sup>	-	-7.97 <sup>NS</sup>
	SUC	132.52	10.13 <sup>*</sup>	17.90 <sup>**</sup>	-10.01 <sup>***</sup>	-10.05 <sup>***</sup>	-3.59 <sup>NS</sup>	-12.40 <sup>***</sup>	-2.17 <sup>NS</sup>	-12.40 <sup>***</sup>	-	-2.17 <sup>NS</sup>
IAA	BC	9.94	-0.83 <sup>**</sup>	0.071 <sup>NS</sup>	0.34 <sup>NS</sup>	0.25 <sup>NS</sup>	-	-	-0.24 <sup>NS</sup>	-	-	-0.24 <sup>NS</sup>
	FOS	9.12	1.33 <sup>**</sup>	1.82 <sup>***</sup>	0.41 <sup>**</sup>	0.11 <sup>NS</sup>	-0.64 <sup>*</sup>	-0.68 <sup>**</sup>	0.14 <sup>NS</sup>	-0.68 <sup>**</sup>	-	0.14 <sup>NS</sup>
	SUC	12.20	-4.88 <sup>***</sup>	-0.78 <sup>NS</sup>	2.19 <sup>***</sup>	0.91 <sup>***</sup>	2.43 <sup>***</sup>	0.35 <sup>NS</sup>	-1.40 <sup>**</sup>	0.35 <sup>NS</sup>	-	-1.40 <sup>**</sup>
ISA	BC	67.80	3.96 <sup>NS</sup>	0.17 <sup>NS</sup>	0.38 <sup>NS</sup>	-0.45 <sup>NS</sup>	-3.24 <sup>NS</sup>	2.35 <sup>NS</sup>	1.52 <sup>NS</sup>	2.35 <sup>NS</sup>	-	1.52 <sup>NS</sup>
	FOS	75.42	8.18 <sup>**</sup>	3.42 <sup>NS</sup>	0.43 <sup>NS</sup>	0.34 <sup>NS</sup>	-3.55 <sup>*</sup>	-1.14 <sup>NS</sup>	-0.77 <sup>NS</sup>	-1.14 <sup>NS</sup>	-	-0.77 <sup>NS</sup>
	SUC	81.38	-11.30 <sup>***</sup>	-7.94 <sup>**</sup>	0.21 <sup>NS</sup>	-0.61 <sup>NS</sup>	6.07 <sup>***</sup>	2.71 <sup>*</sup>	-4.83 <sup>***</sup>	-4.83 <sup>***</sup>	-	-4.83 <sup>***</sup>
FP	BC	92.88	-15.53 <sup>NS</sup>	-17.82 <sup>NS</sup>	-9.66 <sup>**</sup>	-5.87 <sup>NS</sup>	13.09 <sup>*</sup>	9.28 <sup>NS</sup>	-0.66 <sup>NS</sup>	9.28 <sup>NS</sup>	-	-0.66 <sup>NS</sup>
	FOS	60.92	-29.42 <sup>***</sup>	-27.41 <sup>***</sup>	-8.33 <sup>***</sup>	-17.16 <sup>***</sup>	17.66 <sup>***</sup>	11.98 <sup>**</sup>	1.53 <sup>NS</sup>	11.98 <sup>**</sup>	-	1.53 <sup>NS</sup>
	SUC	6.98	1.45 <sup>**</sup>	1.07 <sup>NS</sup>	-0.18 <sup>NS</sup>	-0.87 <sup>***</sup>	-0.76 <sup>*</sup>	-0.93 <sup>**</sup>	0.068 <sup>NS</sup>	-0.93 <sup>**</sup>	-	0.068 <sup>NS</sup>
L	BC	89.05	-0.81 <sup>***</sup>	-0.47 <sup>NS</sup>	-0.78 <sup>***</sup>	-0.095 <sup>*</sup>	1.15 <sup>***</sup>	0.007 <sup>***</sup>	0.73 <sup>***</sup>	0.007 <sup>***</sup>	-	0.73 <sup>***</sup>
	FOS	88.18	1.32 <sup>**</sup>	0.051 <sup>NS</sup>	-0.63 <sup>***</sup>	-0.54 <sup>**</sup>	-0.43 <sup>NS</sup>	-0.00797 <sup>NS</sup>	0.21 <sup>NS</sup>	-0.00797 <sup>NS</sup>	-	0.21 <sup>NS</sup>
	SUC	90.64	-0.22 <sup>*</sup>	-0.89 <sup>***</sup>	-0.43 <sup>***</sup>	0.071 <sup>*</sup>	0.28 <sup>***</sup>	0.50 <sup>***</sup>	0.32 <sup>***</sup>	0.50 <sup>***</sup>	-	0.32 <sup>***</sup>

\* = p ≤ 0.1

\*\* = p ≤ 0.05

\*\*\* = p ≤ 0.01

NS = No es significativo

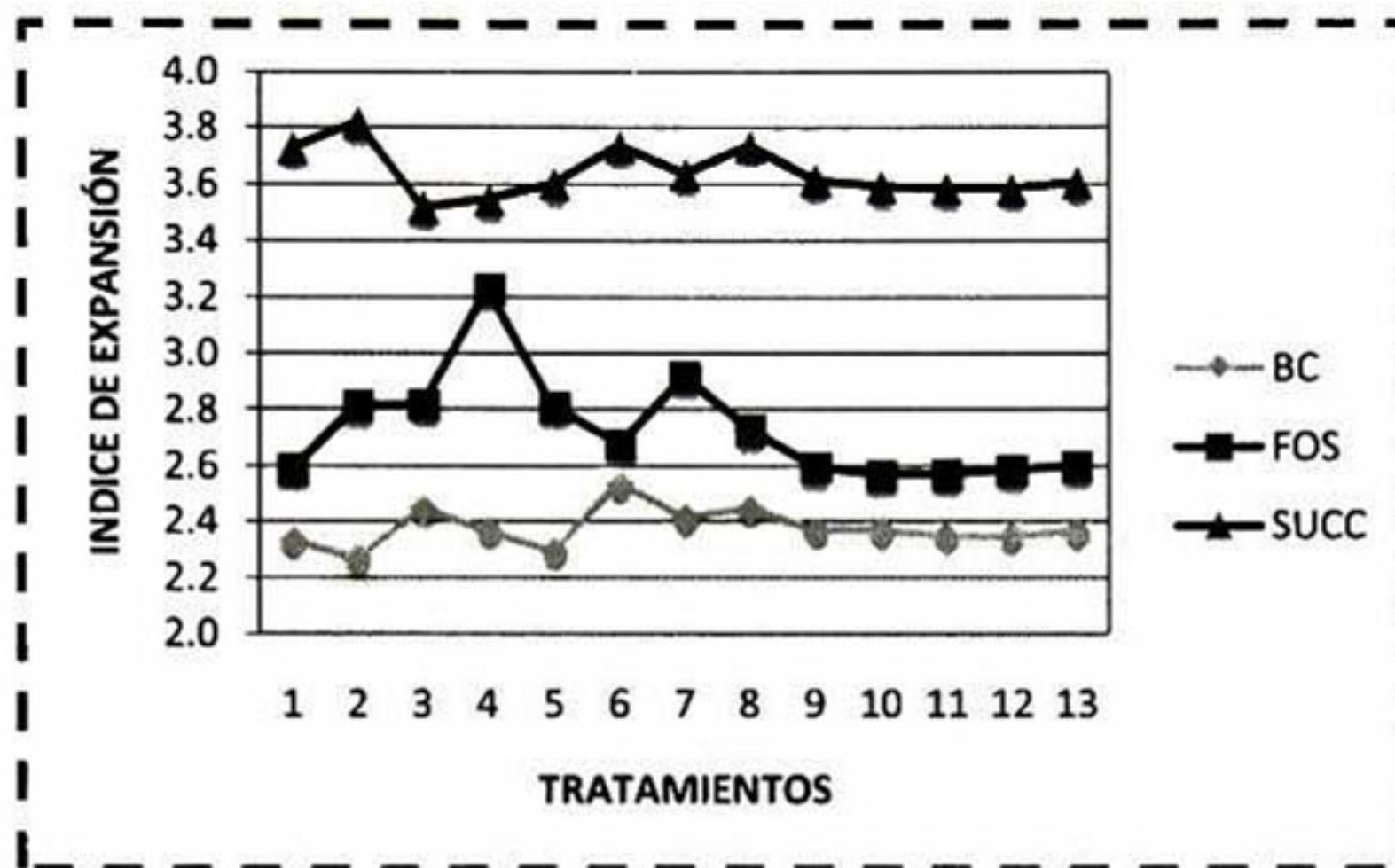
BC = Botana control

FOS = Botana con almidón resistente obtenido por fosfatación

SUC = Botana con almidón resistente obtenido por succinatación

El subíndice 1 corresponde a la velocidad de tornillo y el subíndice 2 corresponde a la temperatura de alta presión en el cañón del extrusor.





Gráfica 1. Valores comparativos de *IE* de productos directamente expandidos (botanas de 2ª generación).

Los valores de *IE* de la botana control variaron de 2.27 a 2.54, para los productos directamente expandidos conteniendo *AR* obtenido por fosfatación, este parámetro varió de 2.57 a 3.23 y para las botanas con *AR* obtenido por succinación se encuentran en el rango de 3.52 a 3.82 (Tabla 8). Los coeficientes de regresión del modelo (Tabla 9) para la botana control, muestran que la temperatura en la zona de alta presión del extrusor y la velocidad de tornillo no presentaron un efecto significativo sobre el *IE*. Por otro lado, ninguno de los términos de interacción fue significativo.

Para las botanas con almidón resistente obtenidas por fosfatación, los coeficientes de regresión del modelo para el *IE* (Tabla 9), muestran que la velocidad de tornillo presentó efecto altamente significativo en sus términos lineal ( $b_1$ ), cuadrático ( $b_{11}$ ) y cúbico ( $b_{111}$ ) ( $p \leq 0.01$ ) al igual que la temperatura de alta presión en su forma lineal ( $b_2$ ), cuadrática ( $b_{22}$ ) y cúbica ( $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). Por otro lado, ninguno de los términos de interacción fue significativo. En la gráfica 2a) de superficie de respuesta se puede observar que a medida que aumentó la temperatura (170°C) en las mezclas se incrementó el *IE* y a velocidades de tornillo mayores (55Hz) se incrementó también, el *IE* de los productos fosfatados directamente expandidos por extrusión.



En el caso de los coeficientes de regresión del modelo para el *IE* de las botanas con almidón resistente obtenido por succinatación (Tabla 9), muestran que la velocidad de tornillo presentó efecto significativo únicamente en su término cuadrático ( $b_{11}$ ) ( $p \leq 0.05$ ), mientras que la temperatura de extrusión presentó un efecto altamente significativo en su forma lineal ( $b_2$ ), cuadrática ( $b_{22}$ ) y cúbica ( $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). Además, ninguno de los términos de interacción fue significativo. En la gráfica 3a) de superficie de respuesta se puede observar que para las botanas con almidón resistente formado por succinatación, a temperaturas altas ( $170^\circ\text{C}$ ) en las mezclas disminuyó el *IE* y la velocidad de tornillo no tiene efecto sobre el *IE*.

El contenido de humedad presente en el material procesado fue de 16% ya que basándose en estudios preliminares se observó que a este contenido de humedad la expansión de los productos fue significativamente mayor a los extrudidos con un porcentaje de humedad altos ( $>20\%$ ) debido a que el flujo de la mezcla dentro del extrusor se encuentra limitado, por lo que la presión en el interior del extrusor incrementa respecto a la presión en el exterior del equipo, y al salir el material por el dado de salida del extrusor se genera una caída abrupta de presión, lo cual favorece la evaporación del agua y por lo tanto el incremento del índice de expansión de los extrudidos. Por esta razón se analizó el efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre este parámetro.

San Martín y col., (2004) observaron una disminución en los valores *IE* de almidones de trigo fosfatados por extrusión a altas temperaturas, debido a una mayor fragmentación del almidón, el cual no puede resistir la alta presión de vapor de agua que conduce a un colapso de la estructura del producto a la salida del extrusor disminuyendo la expansión. Estos reportaron que un incremento en el contenido de tripolifosfato de sodio y de la temperatura de extrusión, también resultó en bajos valores de *IE*, posiblemente debido a la formación de estructuras débiles que no fueron capaces de mantener una estructura expandida debido al

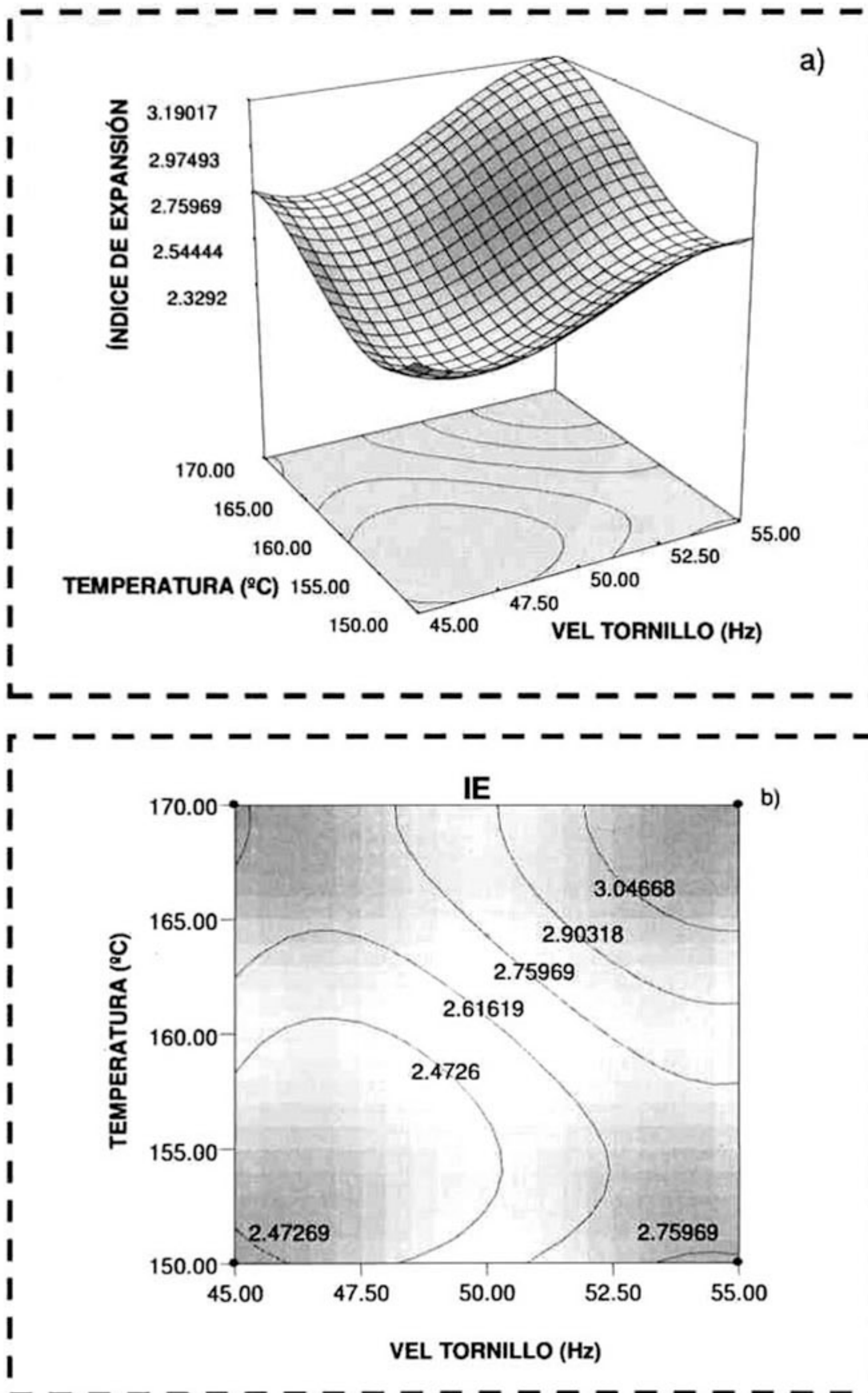


alto grado de sustitución de grupos fosfato, lo que resulta en cargas negativas en el polímero que conducen a una mutua repulsión entre éstas.

Valores similares de *IE* fueron reportados por Chaiyakul y col., (2009), que evaluaron los efectos de la concentración de proteínas, el contenido de humedad y la temperatura extrusión en las propiedades químicas y físicas de un producto extruido a base de harina de arroz con alto valor proteico. Usaron el análisis de superficies de respuesta para los parámetros evaluados utilizando un polinomio de segundo grado. Estos autores encontraron valores de 2.41-3.82 para el *IE* de las muestras. La adición de proteínas de en los extrudidos de almidón redujo la expansión de los productos mediante la reducción de la extensibilidad del polimeros durante su expansión en el dado de salida. Se encontró que al aumentar la temperatura de extrusión, se obtuvo una mejor expansión para concentraciones bajas en proteína, baja humedad y altas temperaturas barril.

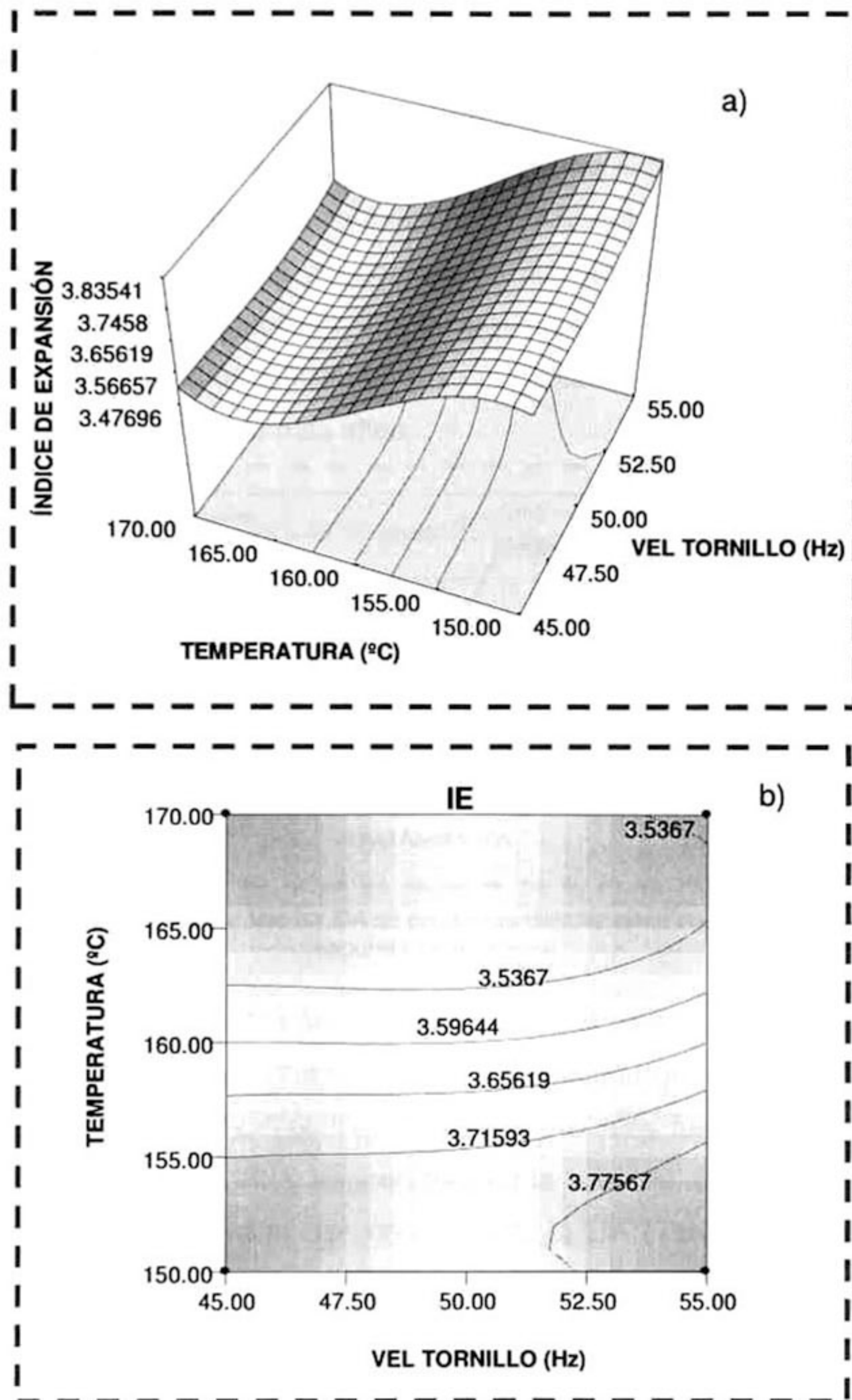
Upadhyay y col., (2010), desarrollaron extrudidos a base de harina de zanahoria y utilizaron la metodología de superficie de respuesta para analizar el efecto de la temperatura de extrusión (65-125°C), velocidad de alimentación (2,5 a 8,5 g/s), contenido de humedad (10-30%) y contenido de harina de zanahoria (1.5 a 15.5%) sobre el índice de expansión, densidad aparente y características sensoriales de los productos extruidos. Estos autores obtuvieron valores de *IE* de 2.34 a 4.33, los valores máximos de *IE* fueron obtenidos al incrementar la temperatura de extrusión. Estos autores relacionaron la expansión de los productos extrudidos con el grado de gelatinización que mostraron los expandidos, esto también esta relacionado con el contenido de humedad de las muestras, al procesarlas con una humedad de 15-20% el *IE* aumentó.





**Gráfica 2.** Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre el índice de expansión (IE) de productos fosfatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.



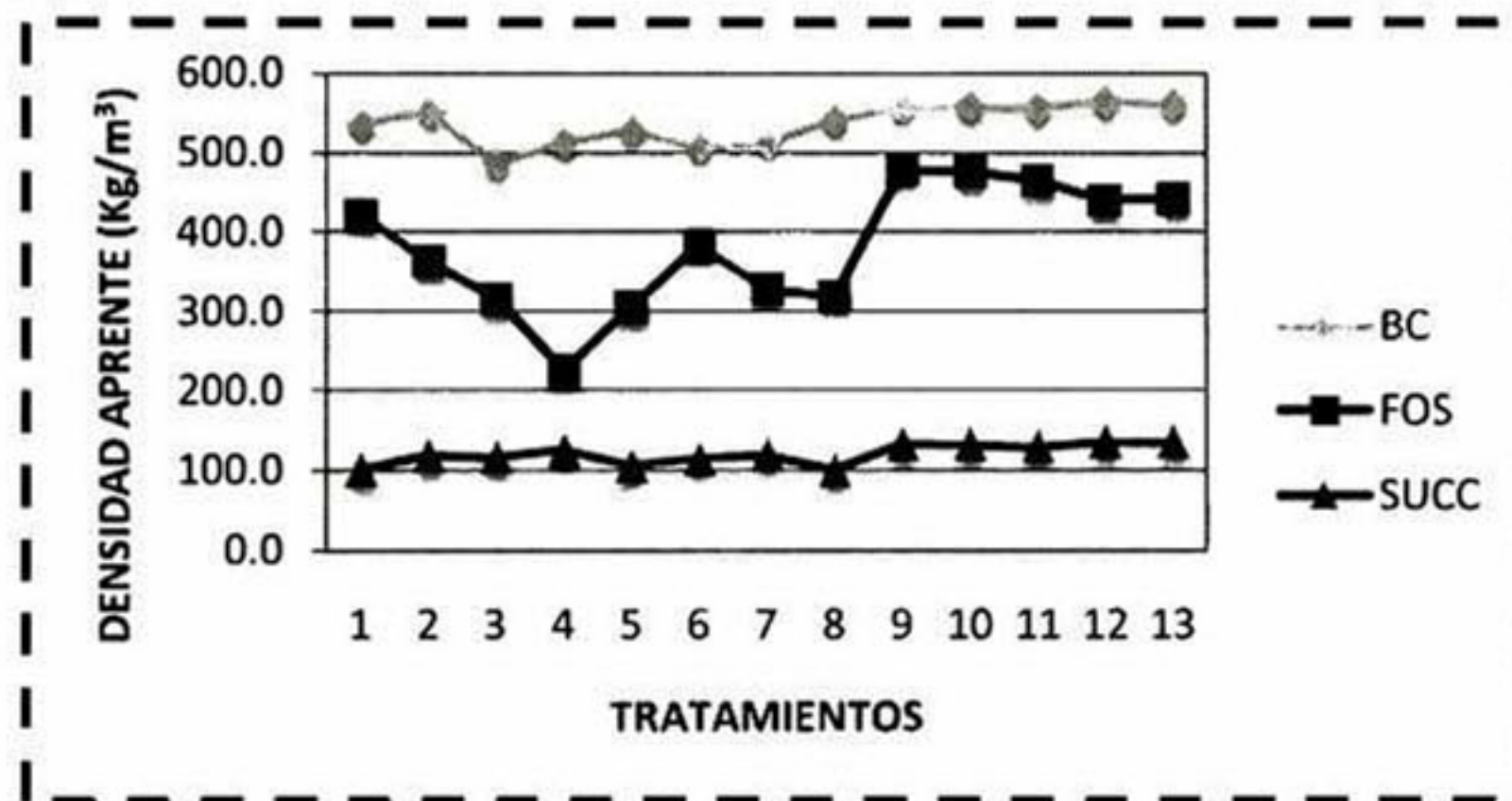


**Gráfica 3.** Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre el índice de expansión (*IE*) de productos succinatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.



### 6.1.1.2 Densidad aparente (DA)

Densidad aparente es la densidad del material incluyendo el aire que hay entre sus partículas. Lógicamente, la densidad aparente del material siempre será inferior a la densidad real. La densidad aparente ha sido asociada directamente con la expansión radial de productos extrudidos Ascheri y col., (1995). En general, las densidades más bajas se encuentran en las muestras que presentaron los valores más altos de expansión. En la gráfica 4 se puede observar que los menores valores de *DA* se obtuvieron para las botanas con almidón succinatado, las cuales presentaron los *IE* más altos.



Gráfica 4. Valores comparativos de *DA* de productos directamente expandidos (botanas de segunda generación).

Los valores para la *DA* para la botana control se encontraron en un rango de 486.35 a 564.71 Kg/m<sup>3</sup> (Tabla 8). Los tratamientos que presentaron valores mayores de *DA* son el T<sub>9</sub>, T<sub>10</sub>, T<sub>11</sub>, T<sub>12</sub>, T<sub>13</sub> los cuales fueron procesados con velocidad de tornillo de 50Hz y temperatura en la zona de alta presión de 160°C. Los coeficientes de regresión del modelo para la *DA* (Tabla 9) para la botana control muestran que la velocidad de tornillo en su forma lineal ( $b_1$ ), cuadrática ( $b_{11}$ ) y cúbica ( $b_{111}$ ) presentaron un efecto altamente significativo ( $p \leq 0.01$ ). Por otra parte, la temperatura de alta presión del extrusor, también tuvo efecto altamente significativo en sus términos lineal ( $b_2$ ) cuadrática ( $b_{22}$ ) y cúbica ( $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). Las interacciones entre las variables estudiadas no tuvieron efecto significativo. El modelo de predicción utilizado explicó el 99.27% de la variación



total para los valores de *DA*. La gráfica 5a) de superficie de respuesta muestra que a mayor Temperatura de alta presión (45Hz) la densidad aparente disminuyó y a bajas velocidades de tornillo (170°C) presentó el mismo comportamiento.

El parámetro de *DA*, para las botanas con almidón fosfatado mostró valores de 306.19 a 479.00 Kg/m<sup>3</sup> (Tabla 8). Los tratamientos que presentaron valores mayores de *DA* son el T<sub>9</sub>, T<sub>10</sub>, T<sub>11</sub>, T<sub>12</sub>, T<sub>13</sub> los cuales fueron procesados con velocidad de tornillo de 50Hz y temperatura en la zona de alta presión de 160°C. Para las botanas con almidón resistente obtenido por fosfatación, los coeficientes de regresión del modelo para el *DA* (Tabla 9), muestran que tanto la velocidad de tornillo como la temperatura de alta presión del extrusor presentaron un efecto altamente significativo en sus términos lineal ( $b_1$  y  $b_2$ ), cuadrático ( $b_{11}$  y  $b_{22}$ ) y cúbico ( $b_{111}$  y  $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). Por otro lado, ninguno de los términos de interacción fue significativo. El modelo de predicción utilizado explicó el 98.17% de la variación total para los valores de *DA*. La gráfica 6a) de superficie de respuesta muestra que a mayores temperaturas (170°C) y velocidad de tornillo (55Hz) la densidad aparente es menor.

En el caso de las botanas con almidón succinatado se registraron valores de 99.85 a 134.51 Kg/m<sup>3</sup> (Tabla 8). Los tratamientos que presentaron valores mayores de *DA* son el T<sub>9</sub>, T<sub>10</sub>, T<sub>11</sub>, T<sub>12</sub>, T<sub>13</sub> los cuales fueron procesados con velocidad de tornillo de 50Hz y temperatura en la zona de alta presión de 160°C. Los coeficientes de regresión del modelo para el *DA* de las botanas con almidón resistente obtenido por succinatación (Tabla 9), muestran que la velocidad de tornillo presentó efecto significativo únicamente en sus términos lineal ( $b_1$ ) ( $p \leq 0.1$ ) y cuadrático ( $b_{11}$ ) ( $p \leq 0.01$ ), mientras que la temperatura de extrusión presentó efecto significativo en sus forma lineal ( $b_2$ ) ( $p \leq 0.05$ ), cuadrática ( $b_{22}$ ) ( $p \leq 0.01$ ) y cúbica ( $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). Además, ninguno de los términos de interacción fue significativo. El modelo de predicción utilizado explicó el 95.50% de la variación total para los valores de *DA*. La gráfica 7a) de superficie de respuesta muestra que



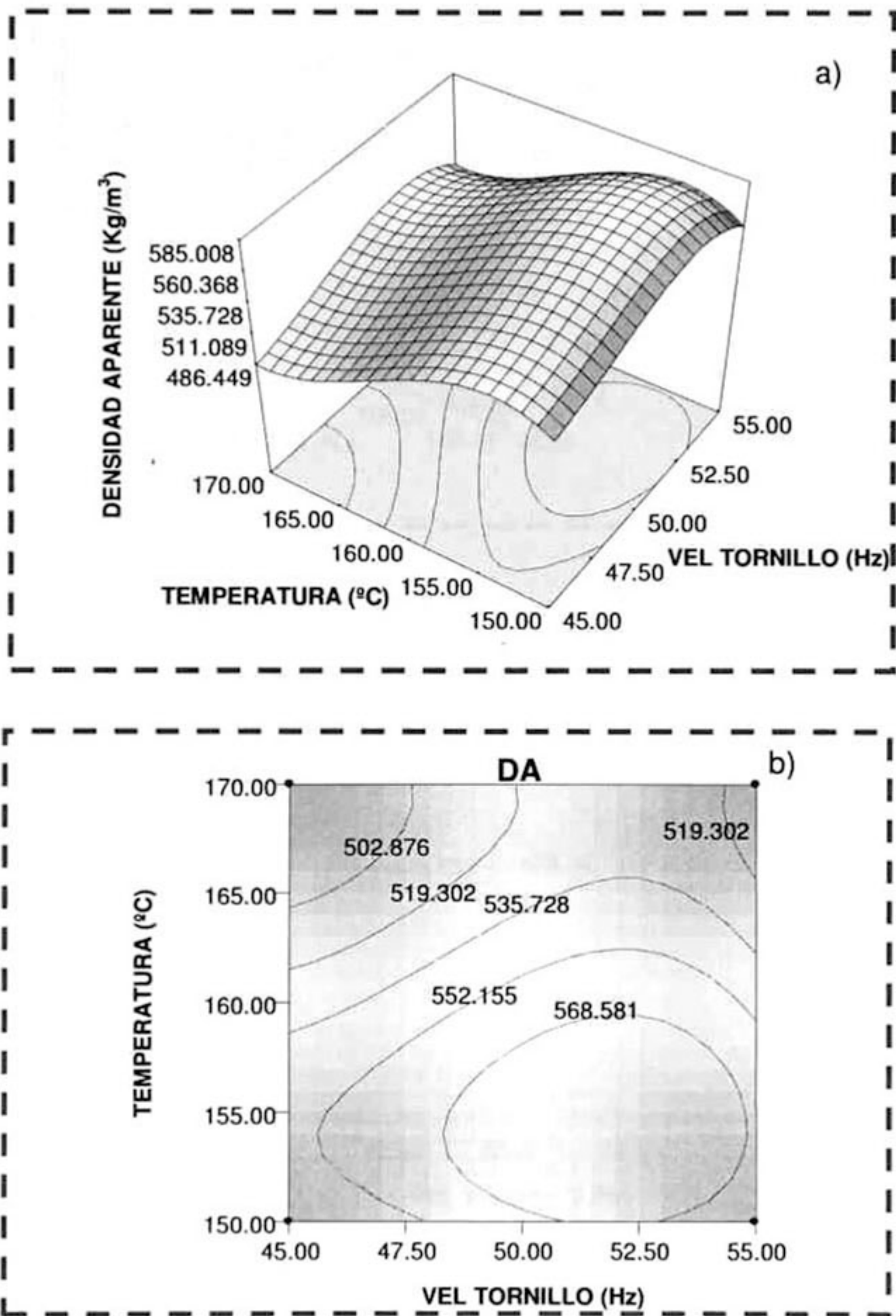
a menor temperatura (150°C) y velocidad de tornillo (45Hz) la densidad aparente fue menor.

Chaiyakul y col., (2009) evaluaron los efectos de la concentración de proteínas, el contenido de humedad y la temperatura extrusión en las propiedades químicas y físicas de un producto extruido a base de harina de arroz con alto valor proteico. Estos autores encontraron valores de 70 a 290Kg/m<sup>3</sup> para el *DA* de las muestras. Se encontró que al aumentar la temperatura de extrusión, se obtuvo una menor densidad aparente para concentraciones bajas en proteína, baja humedad y altas temperaturas barril.

Meng y col., (2010) encontraron que la densidad aparente de botanas extrudidas a base de harina de garbanzo disminuyó cuando el contenido de humedad fue mayor, mientras que *DA* disminuyó con el aumento de la velocidad del tornillo y la temperatura del barril. La densidad aparente de los extruidos varió entre 130 y 275 Kg/m<sup>3</sup>, rango que es comparable con los valores obtenidos para *DA* de los productos directamente expandidos con *AR* obtenido por succinación.

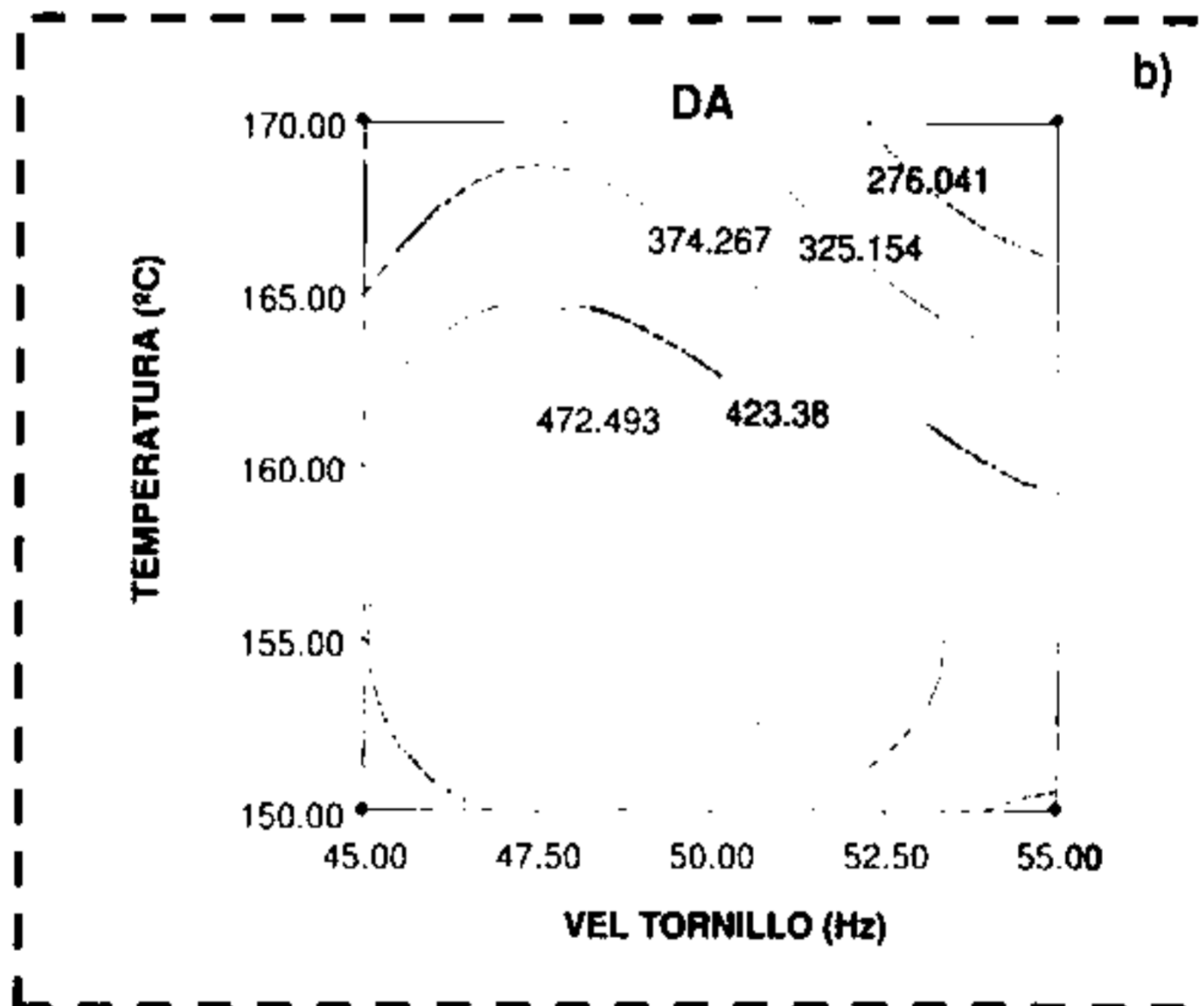
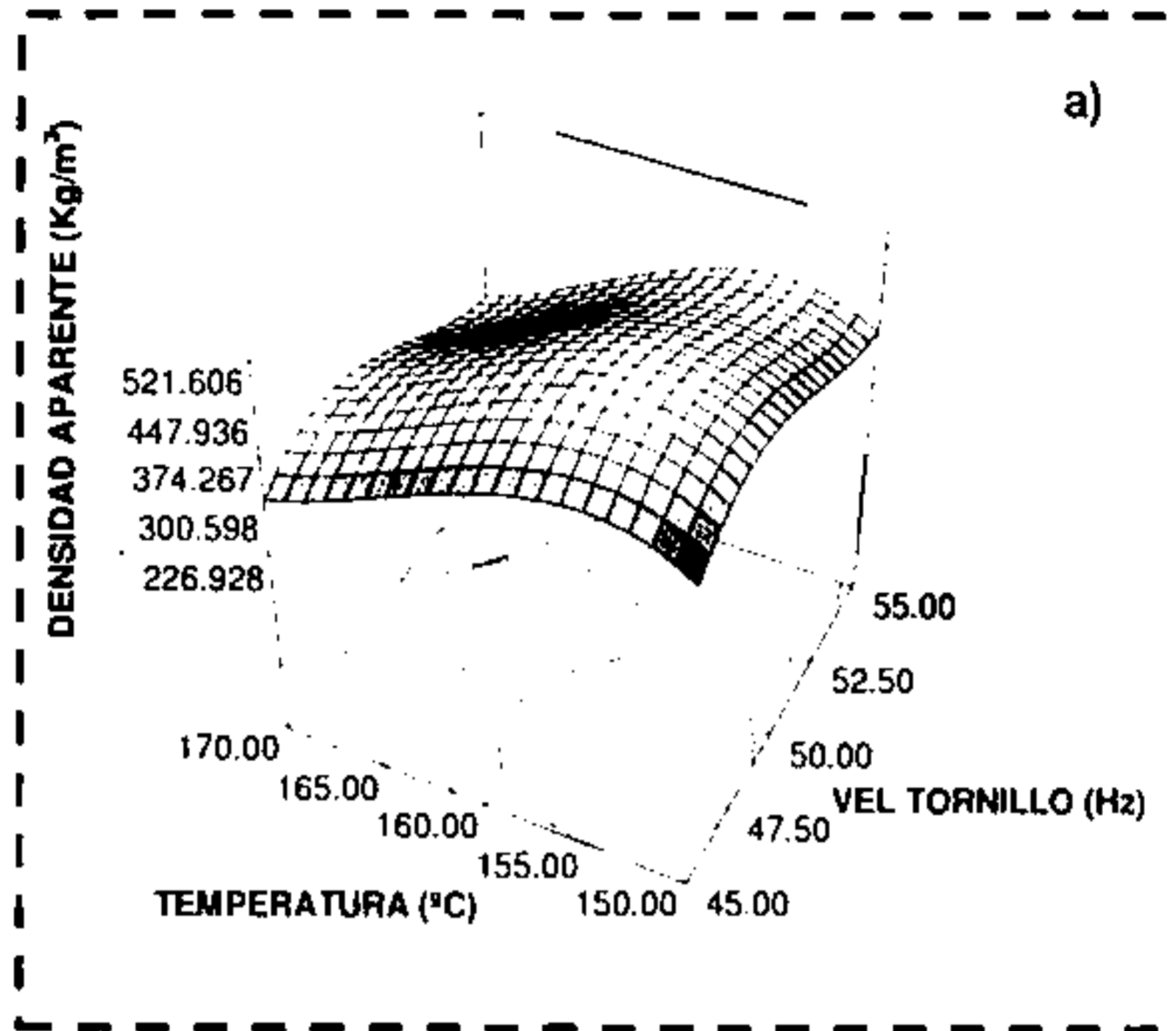
Valores similares a los obtenidos para las botanas con almidón succinatado fueron encontrados por Upadhyay y col., (2010), quienes obtuvieron extruidos a base de harina de zanahoria y utilizaron la metodología de superficie de respuesta para analizar el efecto de la temperatura de extrusión (65-125°C), velocidad de alimentación (2,5 a 8,5 g/s), contenido de humedad (10-30%) y contenido de harina de zanahoria (1.5 a 15.5%) sobre la densidad aparente. Estos autores obtuvieron valores de *IE* de 2.34 a 4.33, los valores máximos de *IE* fueron obtenidos al incrementar la temperatura de extrusión. Estos autores atribuyeron los resultados obtenidos a una mayor cantidad de agua residual, es decir mayor contenido de humedad en extruidos procesados con temperaturas bajas de extrusión.





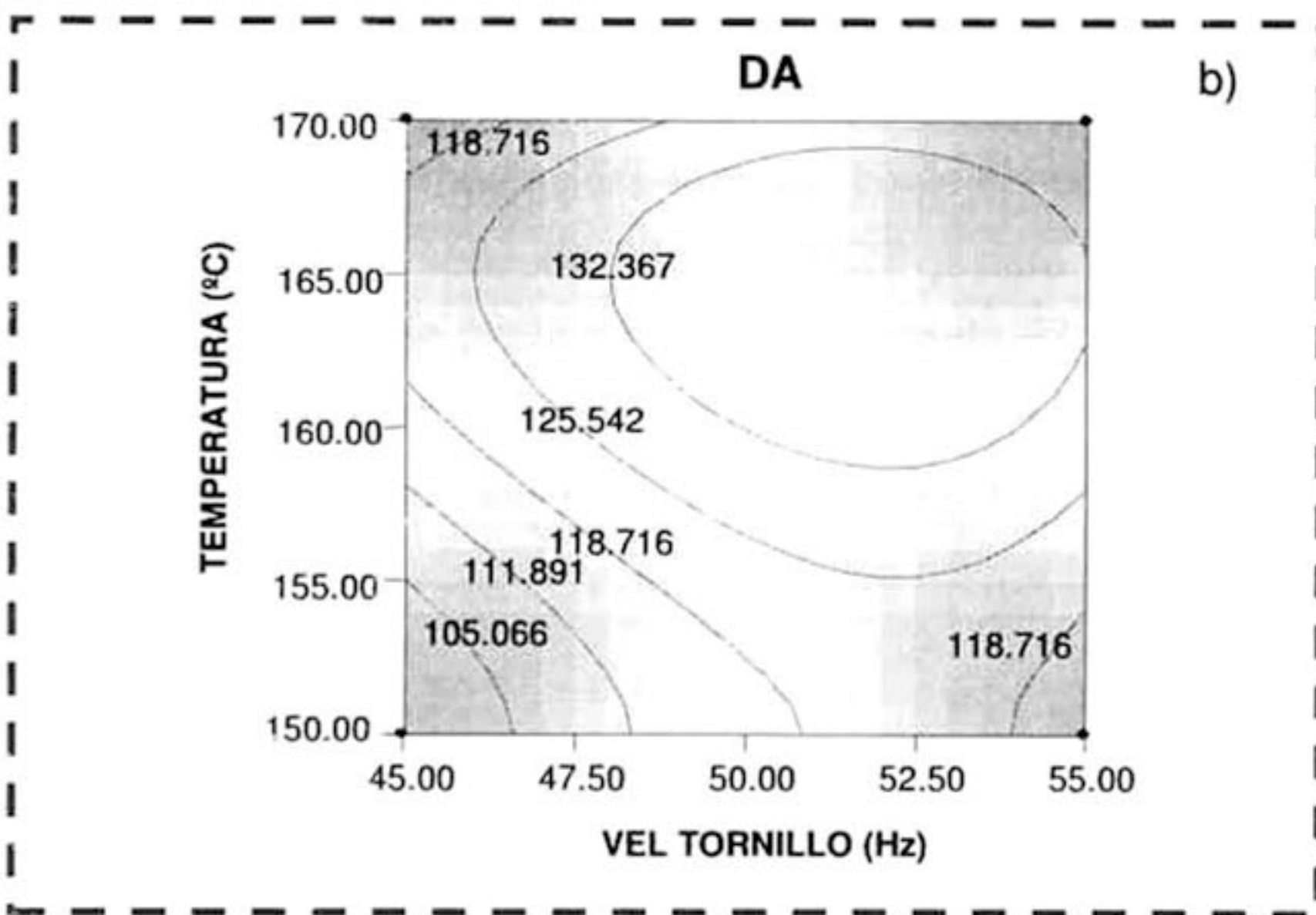
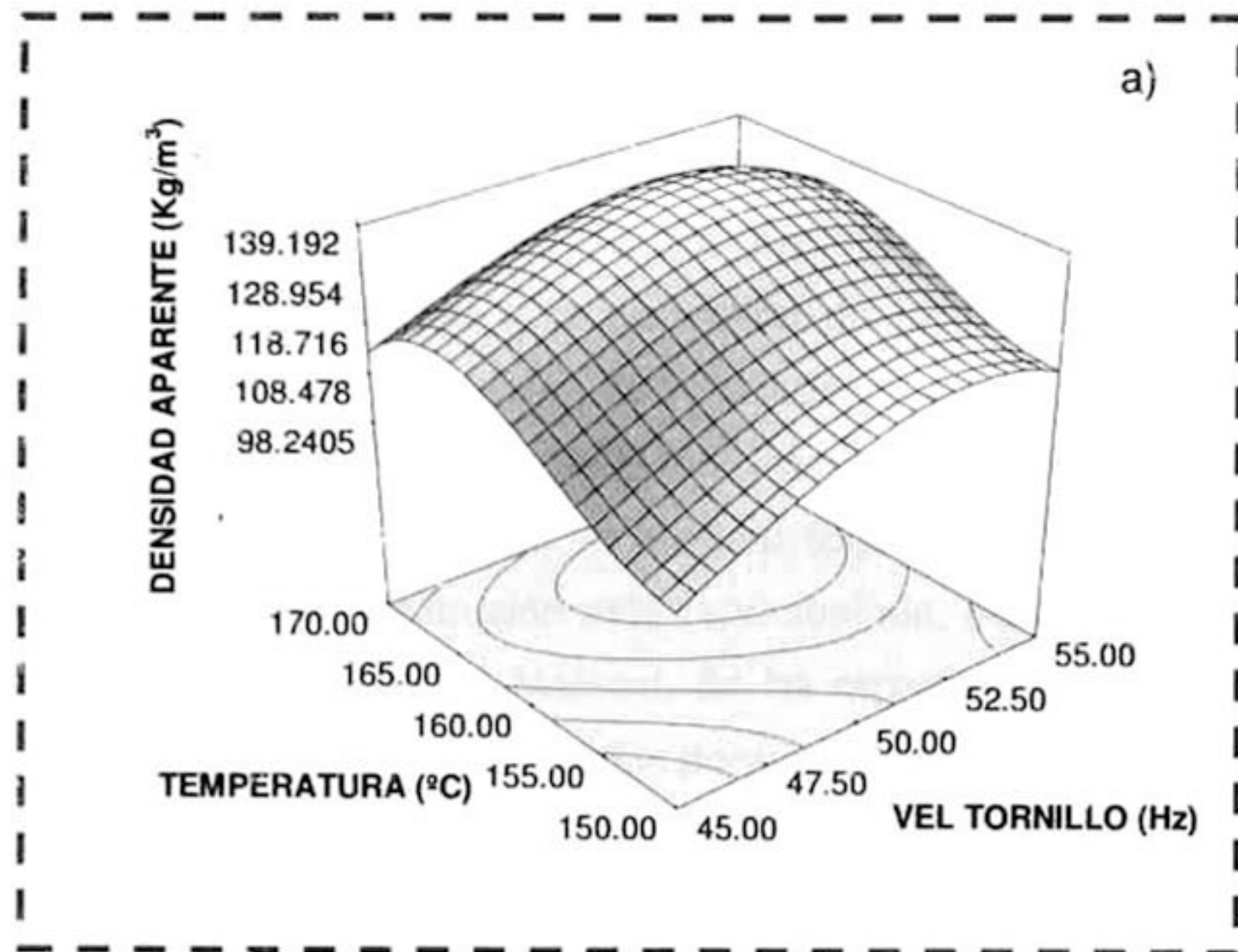
**Gráfica 5.** Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la densidad aparente (DA) de botanas control directamente expandidas por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.





Gráfica 6. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la densidad aparente (DA) de productos fosfatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.





**Gráfica 7.** Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la densidad aparente (DA) de productos succinatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.



### 6.1.1.3 Luminosidad ( $L$ )

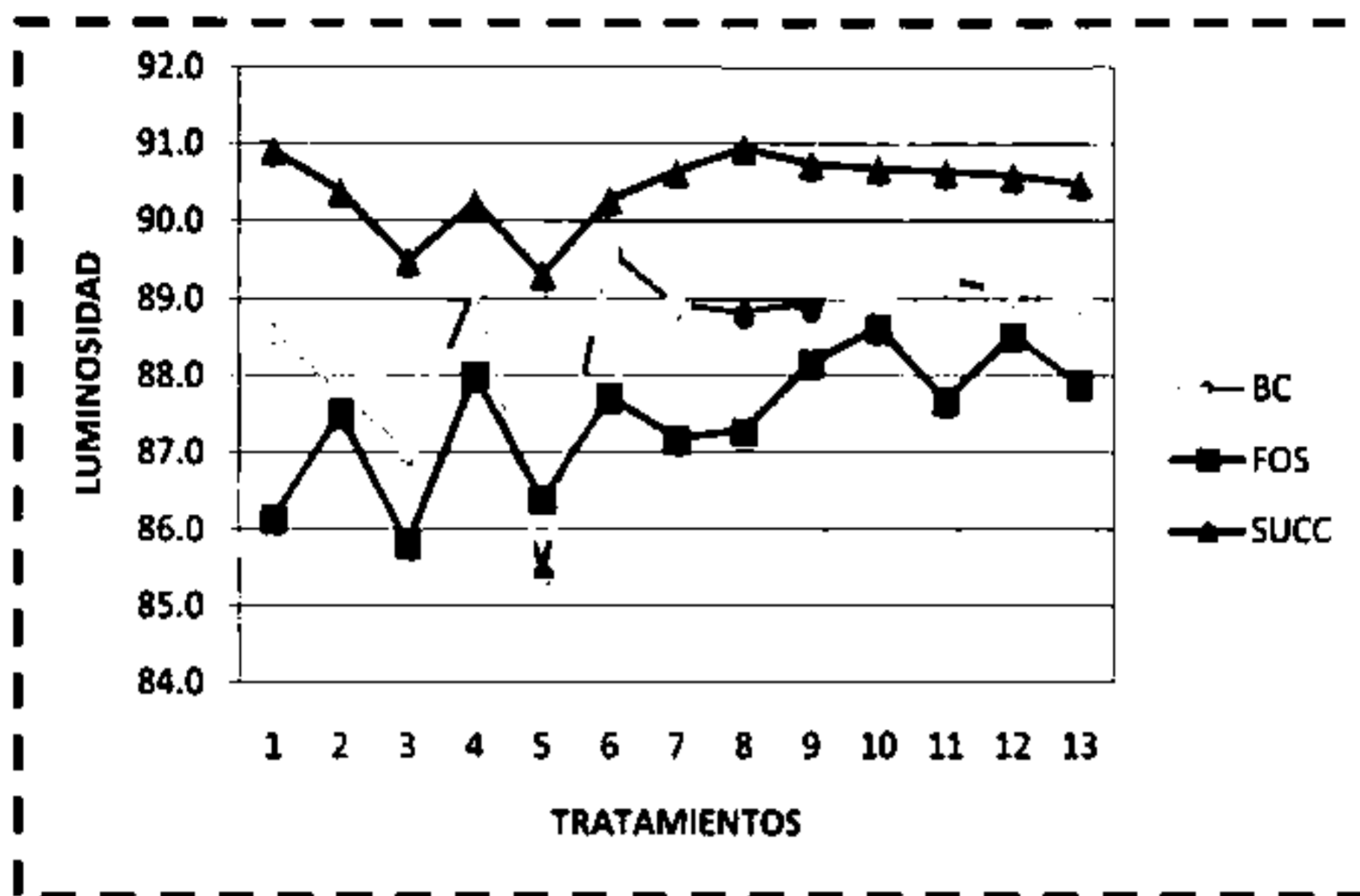
En los productos expandidos térmicamente, la estabilidad del color puede estar afectada por dos factores: debido a la expansión su intensidad de color generalmente disminuye debido a la dispersión de la luz y otro factor es la estabilidad térmica del colorante que puede provocar decoloración u oscurecimiento. Adicionalmente, algunos productos pueden presentar oscurecimiento debido a la reacción de Maillard (Sgaramella y Ames, 1993). El cambio de color durante la extrusión está representado, principalmente, por las reacciones de oscurecimiento de Maillard. Se ha reportado que las reacciones que pueden afectar el color son conocidas porque favorecen la condensación de los grupos amino con los azúcares reductores, producidos por la hidrólisis del almidón, lo cual conduce a la formación de compuestos coloreados y una reducción de la lisina disponible (Camire y col., 1990).

Los valores de luminosidad ( $L$ ) de la botana control varían de 85.41 a 89.61, para los productos directamente expandidos conteniendo  $AR$  obtenido por fosfatación, este parámetro varió de 85.81 a 87.19 y para las botanas con  $AR$  obtenido por succinatación se encuentran en el rango de 89.32 a 90.95 (Tabla 8) (Gráfica 8). Los valores más bajos de  $L$  pertenecen a las botanas control y las botanas con almidón succinatado mostraron mayores valores de  $L$ , lo cual es conveniente para no modificar las tonalidades de los colorantes que puedan llegar a agregarse a la formulación.

Los coeficientes de regresión del modelo (Tabla 9) para la botana control, muestran que la velocidad de tornillo presentó efecto altamente significativo en sus términos lineal ( $b_1$ ), cuadrático ( $b_{11}$ ) y cúbico ( $b_{111}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). La temperatura en la zona de alta presión presentó efecto significativo en sus términos cuadrático ( $b_{22}$ ) ( $p \leq 0.1$ ) y cúbico ( $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). Por otro lado, el término de interacción entre la velocidad de tornillo y la temperatura de extrusión presentaron un efecto altamente significativo ( $b_{12}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). En la gráfica 9a) de superficie de respuesta se puede observar que el mayor valor de  $L$  se obtiene al procesar la muestra a una



velocidad de tornillo de  $\approx 47.5\text{Hz}$  mientras que a altas velocidades de tornillo se obtienen bajos valores de  $L$ .



Gráfica 8. Valores comparativos de  $L$  de productos directamente expandidos.

En el caso de los coeficientes de regresión del modelo para  $L$  de las botanas con  $AR$  obtenido por fosfatación (Tabla 9), muestran que la velocidad de tornillo presentó efecto significativo únicamente en sus términos lineal ( $b_1$ ) ( $p \leq 0.05$ ) y cuadrático ( $b_{11}$ ) ( $p \leq 0.01$ ), mientras que la temperatura de extrusión presentó efecto significativo solo en su forma cuadrática ( $b_{22}$ ) ( $p \leq 0.05$ ). Además, ninguno de los términos de interacción fue significativo.

En la gráfica 10a) de superficie de respuesta se puede observar que para las botanas con almidón resistente obtenido por succinatación, a velocidades de tornillo altas (55Hz) en las mezclas  $L$  aumenta y la temperatura no tiene efecto notorio sobre  $L$ .

En el caso de los coeficientes de regresión del modelo para  $L$  de las botanas con almidón resistente obtenido por succinatación (Tabla 9), muestran que la velocidad de tornillo presentó efecto significativo solo en sus términos lineal



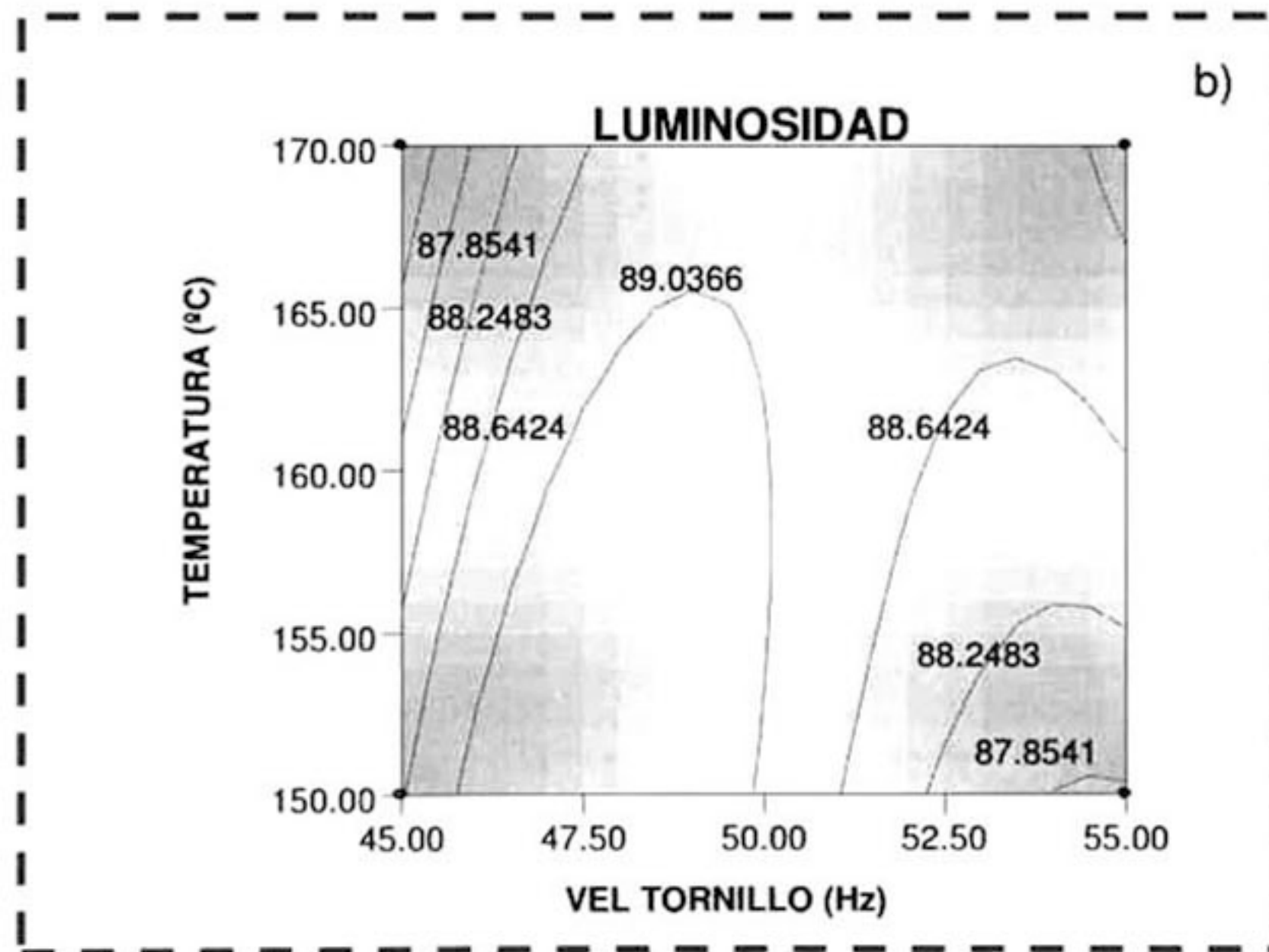
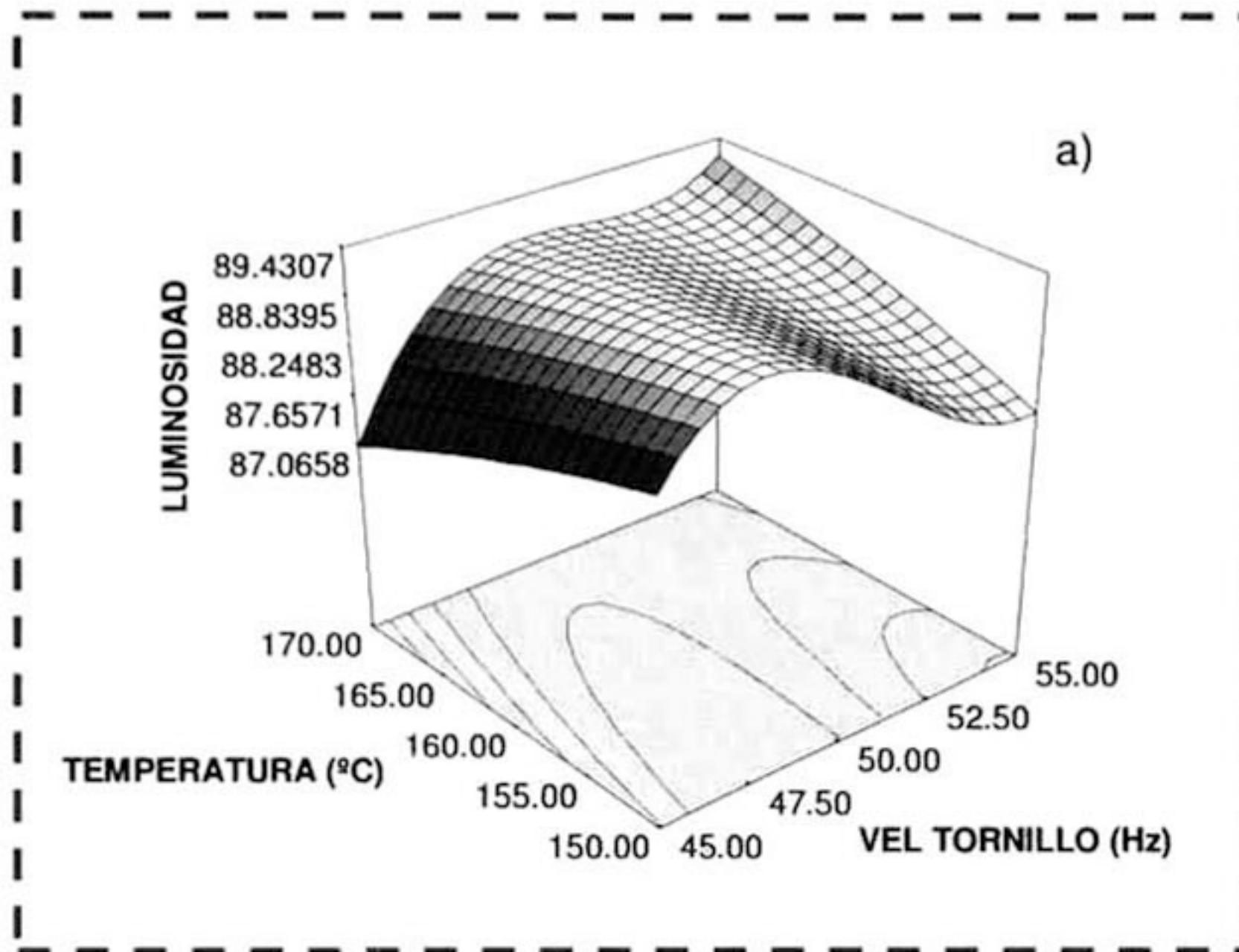
( $b_1$ ) ( $p \leq 0.1$ ), cuadrático ( $b_{11}$ ) ( $p \leq 0.01$ ) y cúbico ( $b_{111}$ ) ( $p \leq 0.01$ ), mientras que la temperatura de extrusión presentó efecto significativo en sus formas lineal ( $b_2$ ) ( $p \leq 0.01$ ), cuadrática ( $b_{22}$ ) ( $p \leq 0.1$ ) y cúbica ( $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). Además, el término de interacción entre la velocidad de tornillo y la temperatura de extrusión presentaron un efecto altamente significativo ( $b_{12}$ ) ( $p \leq 0.01$ ).

En la gráfica 11a) de superficie de respuesta se puede observar que para las botanas con almidón resistente formado por succinatación, a temperaturas altas ( $170^\circ\text{C}$ ) y velocidades de tornillo  $\approx 55\text{Hz}$   $L$  disminuye.

Singh y col., (2009) encontraron valores para los productos extruidos elaborados con harina de papa (25%), de  $L$  51.71, mientras que las botanas formuladas a base de harina de maíz tuvieron el mayor valor de  $L$  de 61.22. Lo cual muestra que las botanas obtenidas son más blancas.

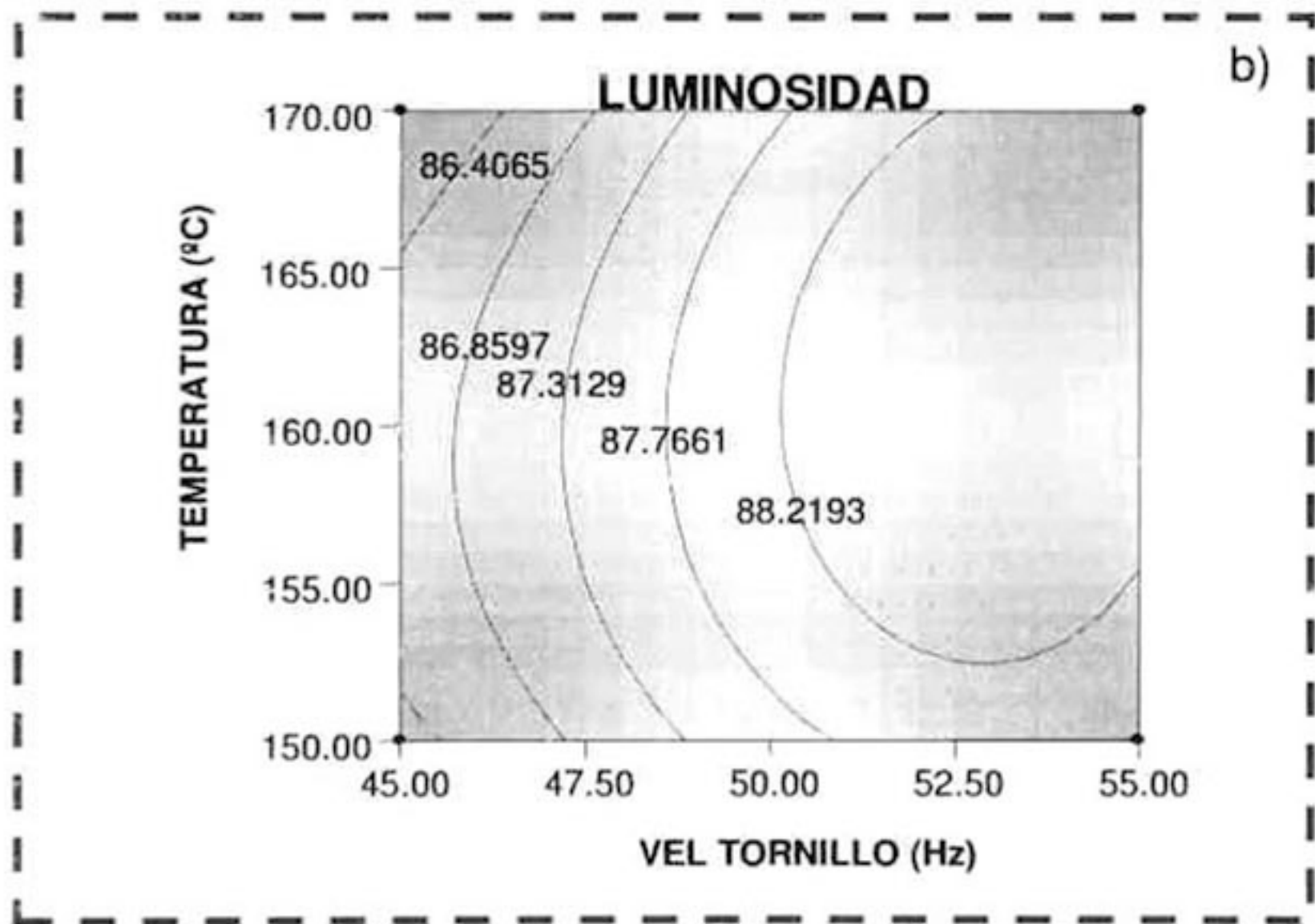
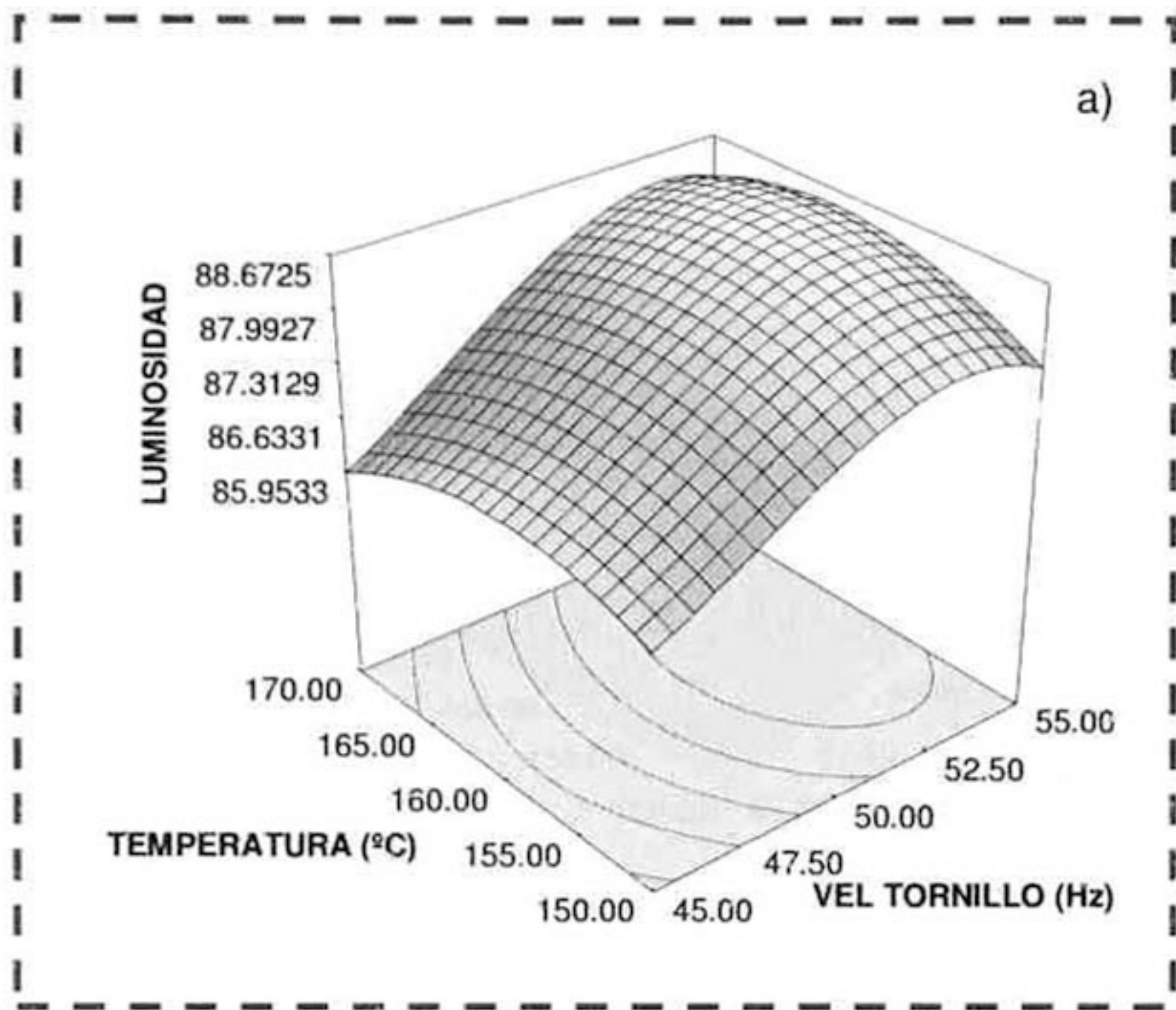
Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Rodríguez y col., (2011) quienes elaboraron extruidos a base de harina de malanga, harina de maíz y harina de maíz nixtamalizado; estos presentaron valores de  $L$  de 81.20, 84.70 y 85.3 respectivamente. Se utilizó para su elaboración un extrusor de un solo tornillo y un diseño central compuesto





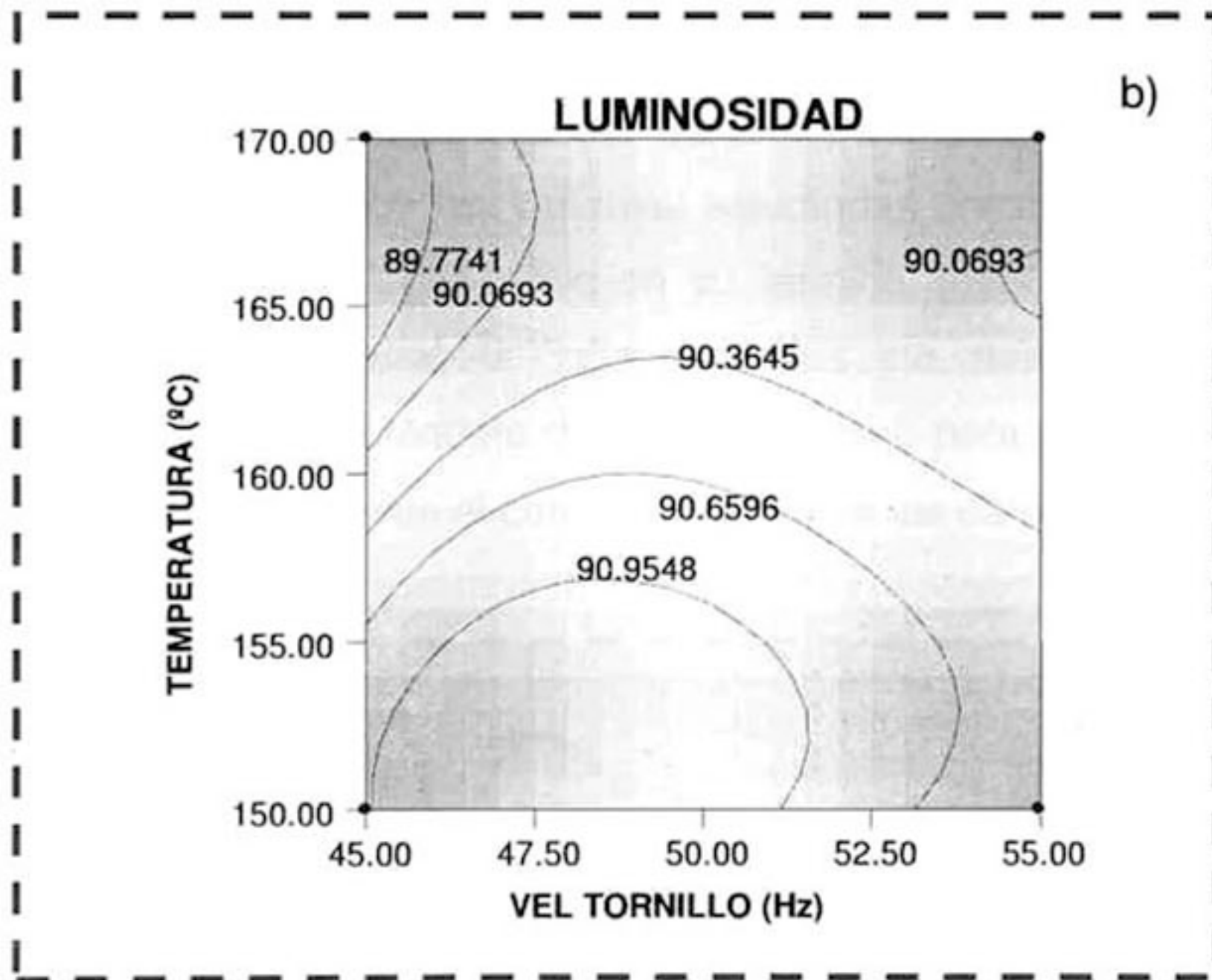
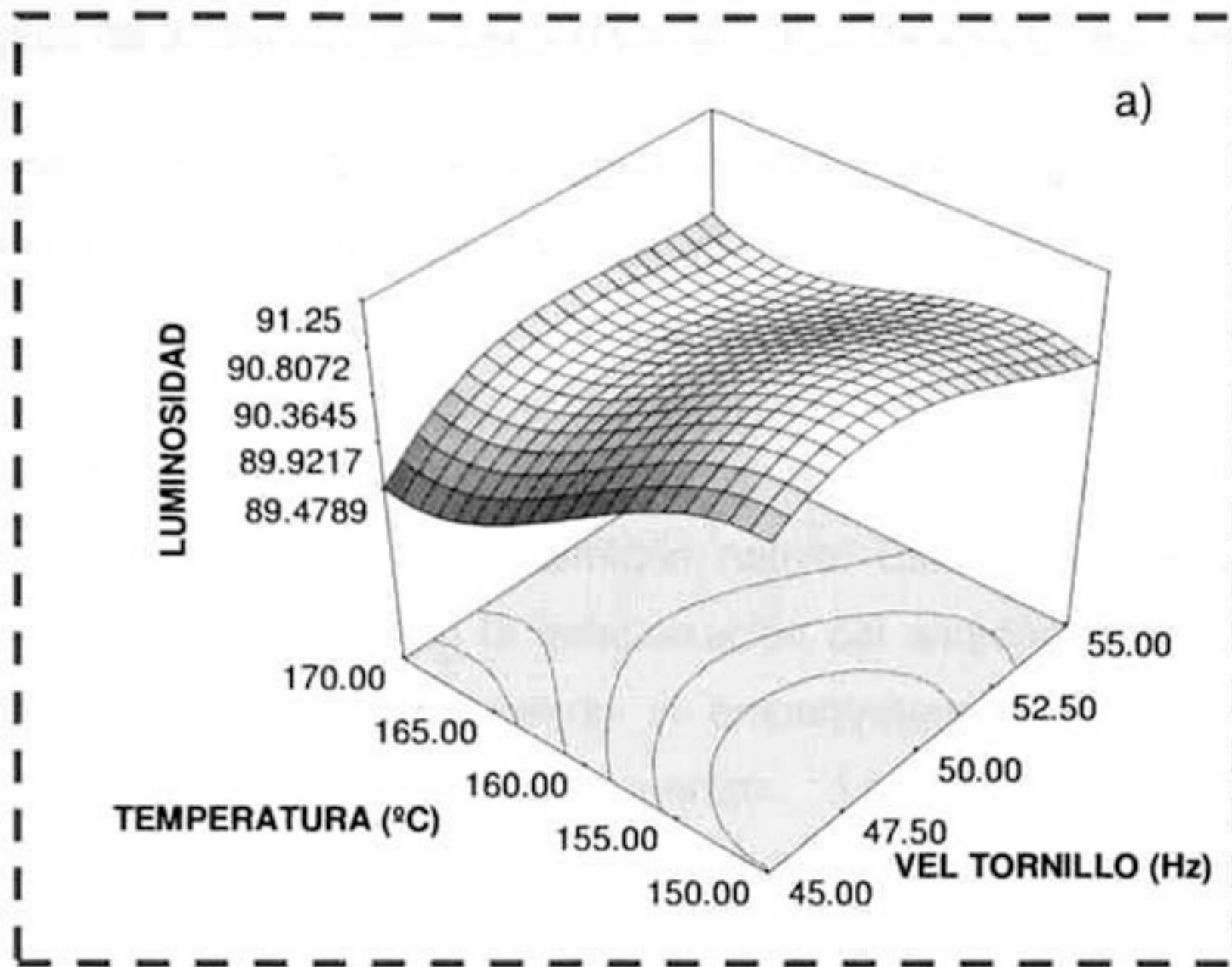
**Gráfica 9.** Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la luminosidad de botana control directamente expandida por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.





**Gráfica 10.** Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la luminosidad de productos fosfatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.





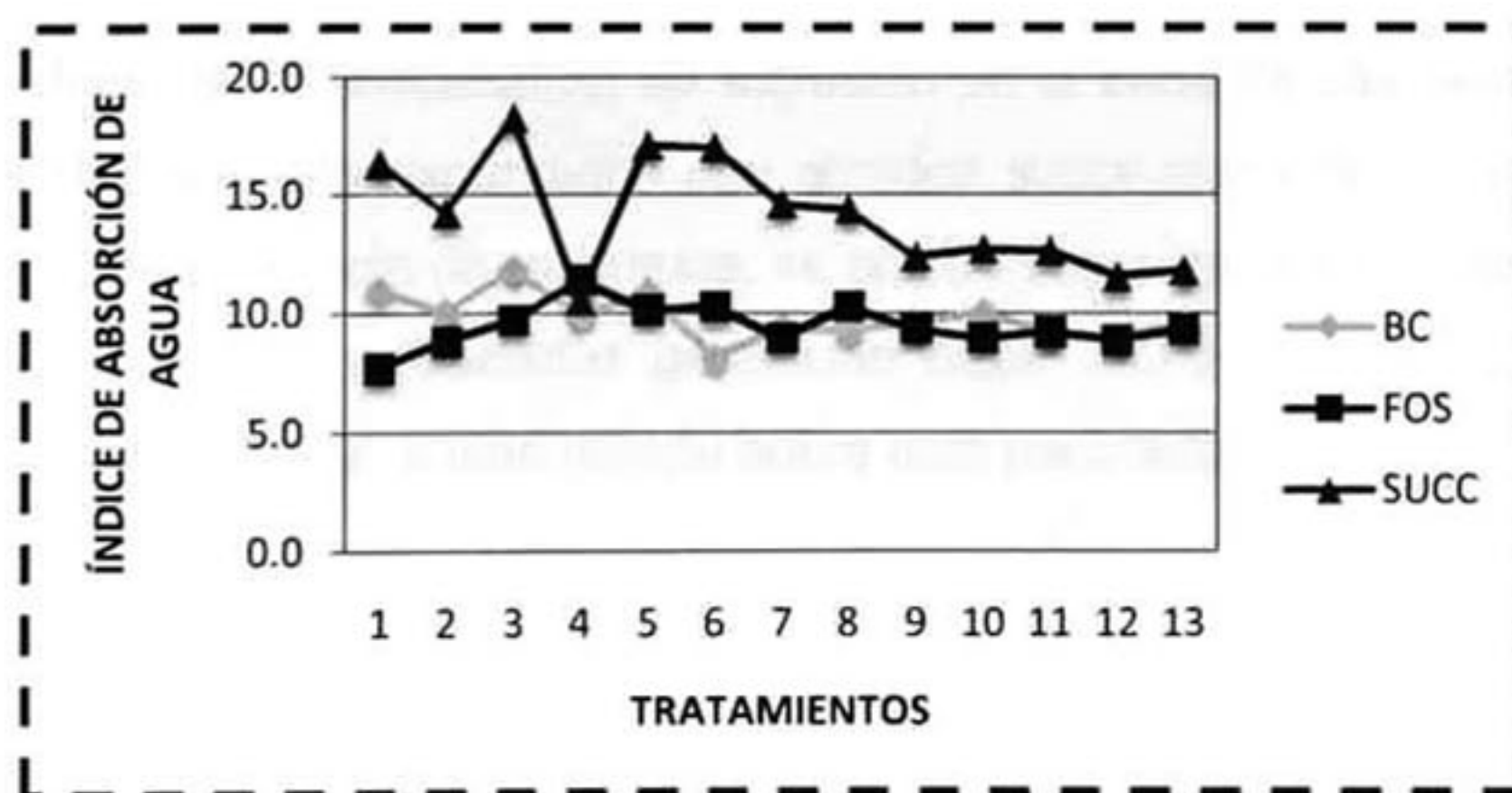
**Gráfica 11.** Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la luminosidad de productos succinatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.



#### 6.1.1.4 Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA)

Se determinó el *IAA* para el almidón nativo de papa para mostrar que existen cambios de un almidón nativo que no ha sido modificado o procesado de alguna forma con un almidón modificado químicamente y procesado para la obtención de botanas. Gómez y Aguilera (1984) reportaron este mismo comportamiento para almidón de maíz en el que el *IAA* fue mayor para los productos extrudidos que para el almidón nativo. Esto puede deberse a que durante el proceso de extrusión la gelatinización del almidón introduce cambios estructurales significativos destruyendo el empaquetamiento de los polímeros permitiendo la liberación de los componentes. Los valores de *IAA* para los tratamientos de la botana control fueron similares a los obtenidos por las botanas con almidón fosfatado, mientras que las botanas con almidón succinatado mostraron una mayor absorción de agua (Gráfica 12).

Los coeficientes de regresión del modelo para *IAA* (Tabla 9) para las botanas control, muestran que las variables estudiadas únicamente la velocidad de tornillo presentó efecto significativo en su término lineal ( $b_1$ ) ( $p \leq 0.05$ ). Las interacciones entre las variables independientes no mostraron un efecto significativo sobre el *IAA*. El modelo de predicción de *L* para las botanas control no representó significativamente el comportamiento de los datos.



Gráfica 12. Valores comparativos de *IAA* de productos directamente expandidos.



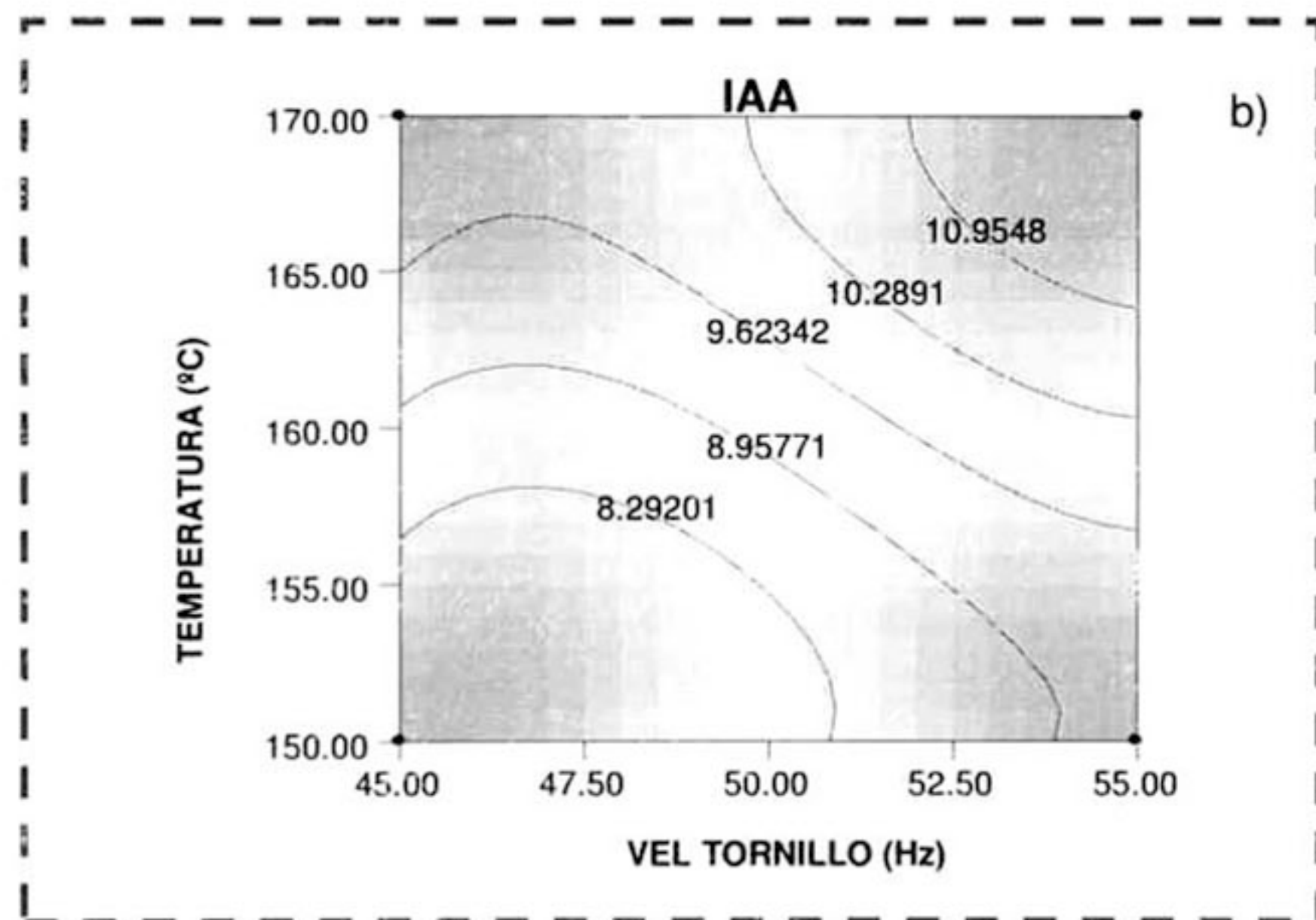
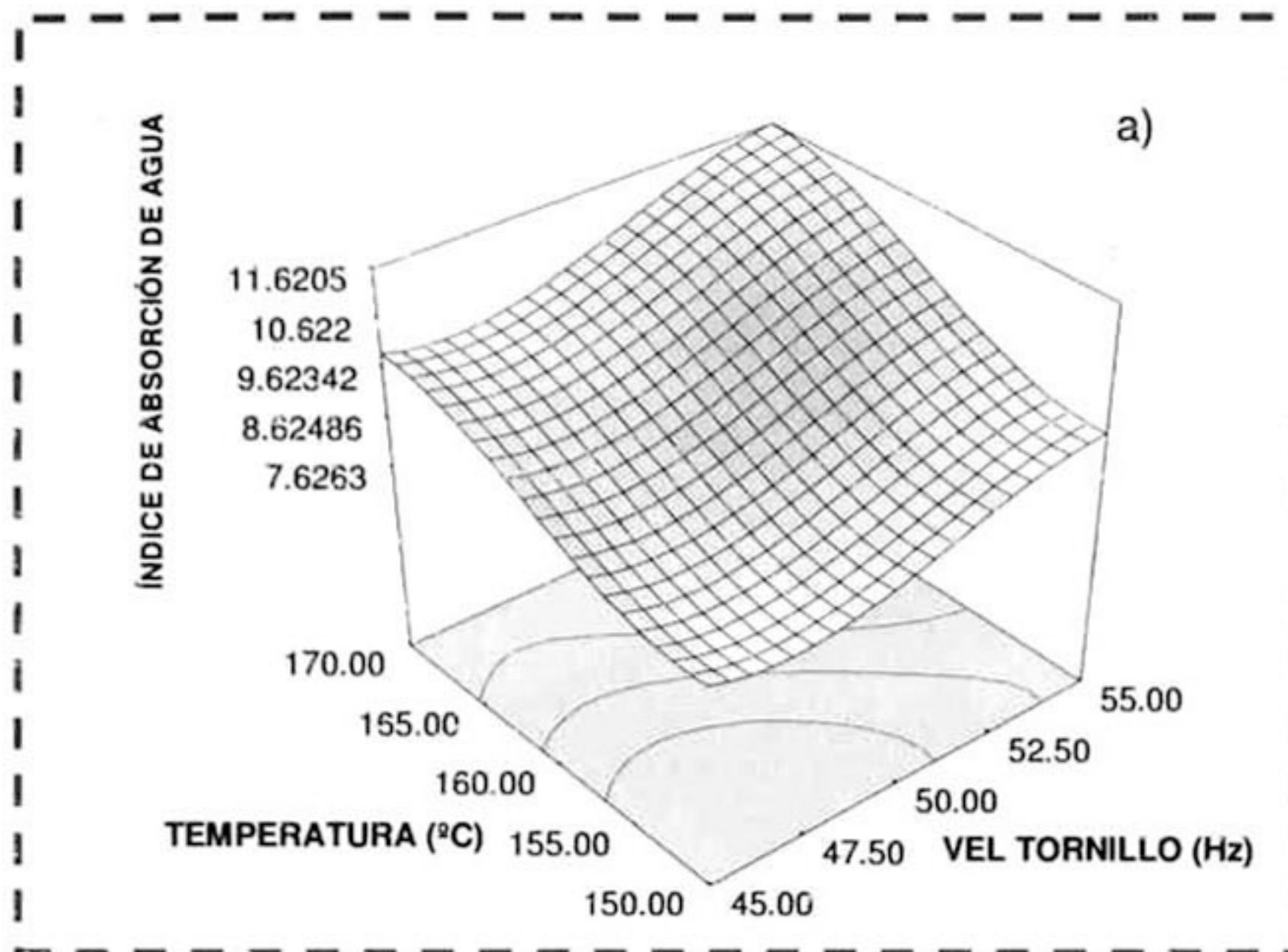
Para el modelo de predicción de las botanas con almidón fosfatado, los coeficientes de regresión del modelo para *IAA* (Tabla 9), muestran que la velocidad de tornillo presentó efecto significativo en sus términos lineal ( $b_1$ ) ( $p \leq 0.05$ ) cuadrático ( $b_{11}$ ) ( $p \leq 0.05$ ) y cúbico ( $b_{111}$ ) ( $p \leq 0.1$ ), mientras que la temperatura de extrusión solo presentó efecto significativo en su forma lineal ( $b_2$ ) ( $p \leq 0.01$ ) y cúbica ( $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.05$ ). Las interacciones entre las variables independientes no mostraron un efecto significativo sobre el *IAA*.

En la gráfica de superficie de respuesta (Gráfica 13a), se observa el efecto de la velocidad de tornillo y la temperatura sobre el índice de absorción de agua de las botanas con almidón fosfatado. Los valores más altos de *IAA* se encuentran a mayor temperatura de barril ( $170^\circ\text{C}$ ) y alta velocidad de tornillo (55Hz); sin embargo el modelo de predicción para estas botanas presentó falta de ajuste.

En el caso de los coeficientes de regresión del modelo para el *IAA* de las botanas con almidón resistente obtenido por succinatación (Tabla 9), muestran que la velocidad de tornillo presentó efecto altamente significativo en sus términos lineal ( $b_1$ ), cuadrático ( $b_{11}$ ) y cúbico ( $b_{111}$ ) ( $p \leq 0.01$ ), mientras que la temperatura de extrusión presentó efecto significativo únicamente en su forma cuadrática ( $b_{22}$ ) ( $p \leq 0.05$ ). Además, el término de interacción  $b_{12}$  fue significativo ( $p \leq 0.05$ ).

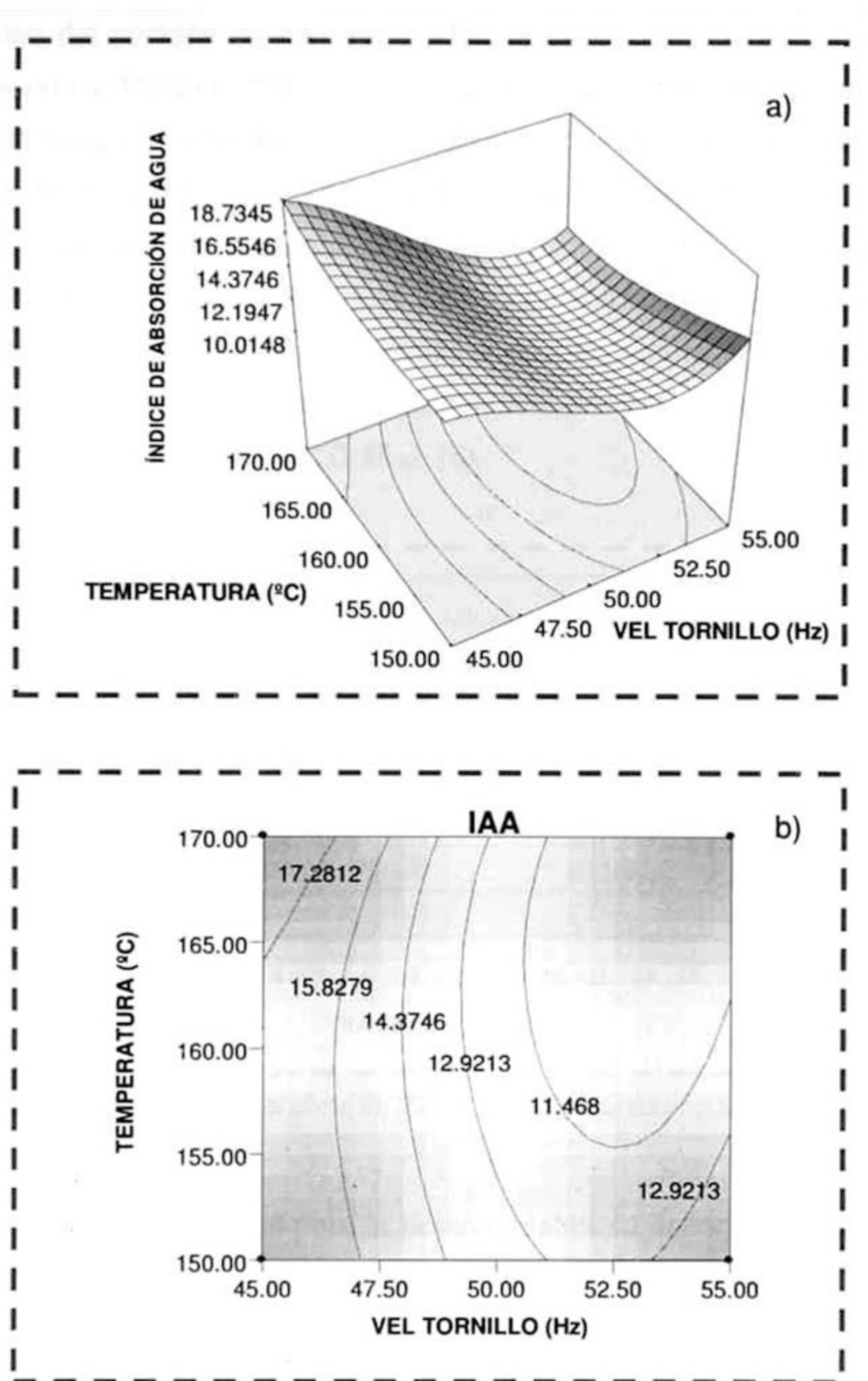
El efecto de la temperatura de extrusión en la zona de alta presión de los productos directamente expandidos con almidón succinatado se muestran en la gráfica 14 a) de superficie de respuesta, se observa que los valores más altos de *IAA* se encuentran a velocidades de tornillo bajas (45Hz) y la temperatura de extrusión no presentó un efecto notorio sobre este parámetro.





**Gráfica 13.** Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre el índice de absorción de agua (IAA) de productos fosfatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.

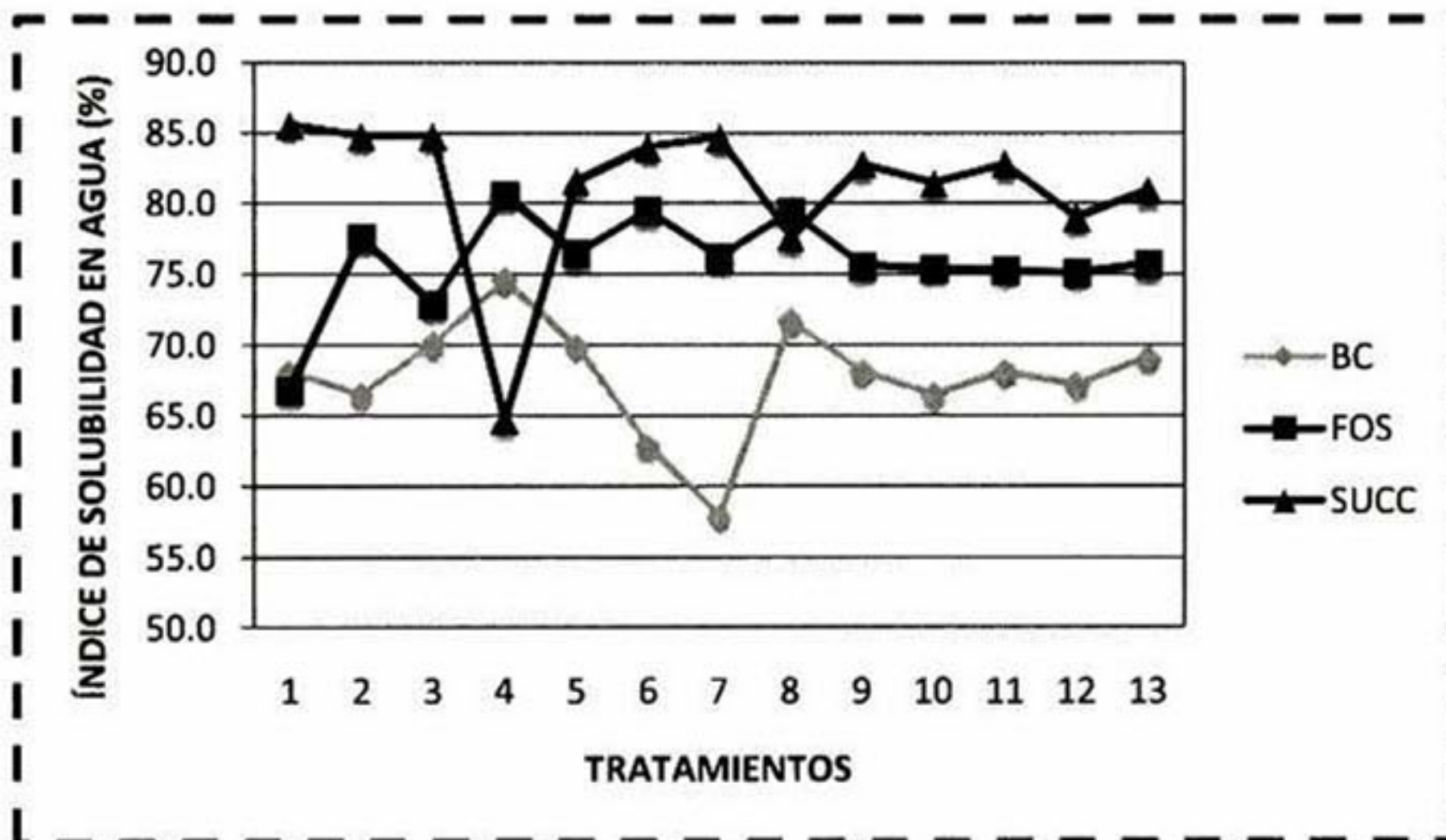




**Gráfica 14.** Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre el índice de absorción de agua (IAA) de productos succinatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.



Los efectos de la extrusión sobre la solubilidad en agua, absorción de agua y viscosidad del almidón se han estudiado por varios autores (Anderson y col., 1969; Colonna y Mercier, 1983; Colonna y col., 1989) quienes indicaron que a bajos contenidos de humedad y altas temperaturas de extrusión incrementa la solubilidad en agua de los materiales y disminuyen las viscosidades respecto de las materias primas sin procesar o de aquellos materiales extrudidos a altas humedades y bajas temperaturas. Los valores de solubilidad en agua mostrados por las botanas control son bajos debido a que la ruptura de las cadenas de almidón fue menos severa que la presentada por las botanas con almidón fosfatado y almidón succinatado (Gráfica 15).



Gráfica 15. Valores comparativos de *ISA* de productos directamente expandidos.

Los valores para la *ISA* para la botana control se encontraron en un rango de 57.90 a 74.60% (Tabla 8). El modelo de predicción utilizado explicó el 80.33% de la variación total para los valores de *ISA*, sin embargo esto es para  $p=0.1283$ . El parámetro de *ISA*, para las botanas con almidón fosfatado mostró valores de 66.80 a 80.60% (Tabla 8).

Los coeficientes de regresión del modelo para el *ISA* (Tabla 9), muestran que solo la velocidad de tornillo presentó efecto significativo en sus términos lineal



( $b_1$ ) ( $p \leq 0.05$ ), y cúbico ( $b_{111}$ ) ( $p \leq 0.1$ ). Por otro lado, ninguno de los términos de interacción fue significativo. El modelo de predicción utilizado explicó el 83.62% ( $p \leq 0.1$ ) de la variación total para los valores de *ISA* y presentó falta de ajuste ( $< 0.0001$ ). La gráfica 16a) de superficie de respuesta muestra que a mayores temperaturas (170°C) y velocidad de tornillo (55Hz) el *ISA* aumenta. En el caso de las botanas con almidón succinatado se registraron valores de 64.70 a 84.70% (Tabla 8).

Los coeficientes de regresión del modelo para el *ISA* de las botanas con almidón resistente obtenido por succinación (Tabla 9), muestran que la velocidad de tornillo presentó efecto significativo solo en sus términos lineal ( $b_1$ ) ( $p \leq 0.01$ ) y cúbico ( $b_{111}$ ) ( $p \leq 0.01$ ), mientras que la temperatura de extrusión presentó efecto significativo en su forma lineal ( $b_2$ ) ( $p \leq 0.05$ ) y cúbica ( $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.1$ ). Además, el término de interacción de la temperatura con la velocidad de tornillo fue altamente significativa ( $b_{12}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). El modelo de predicción utilizado explicó el 95.03% de la variación total para los valores de *DA*. El gráfico de superficie de respuesta (Gráfica 17a) muestra que a menor temperatura (150°C) y velocidad de tornillo (45Hz) la densidad aparente es menor.

Lee y col., (1999) reportaron que a mayor temperatura de extrusión el *ISA* se incrementaba. Este comportamiento lo atribuyeron al grado de gelatinización del almidón y al incremento en el área de superficie del extrudido. Singh y col., (1998) estudiaron el efecto de las variables de proceso de extrusión sobre "grits" de maíz usando dos diferentes extrusores, señalando que el *ISA* disminuyó con el incremento de humedad. En este mismo estudio la temperatura no presentó efecto significativo sobre esta respuesta. Por otro lado los mismos autores reportan que el *IAA* se incrementó con el aumento en el contenido de humedad y el efecto de la temperatura sobre este parámetro, fue dependiente del contenido de humedad: a humedades altas el *IAA* disminuyó y a humedades bajas, este aumentó, lo cual explica los valores altos que se obtuvieron al determinar el *IAA* e *ISA* de las



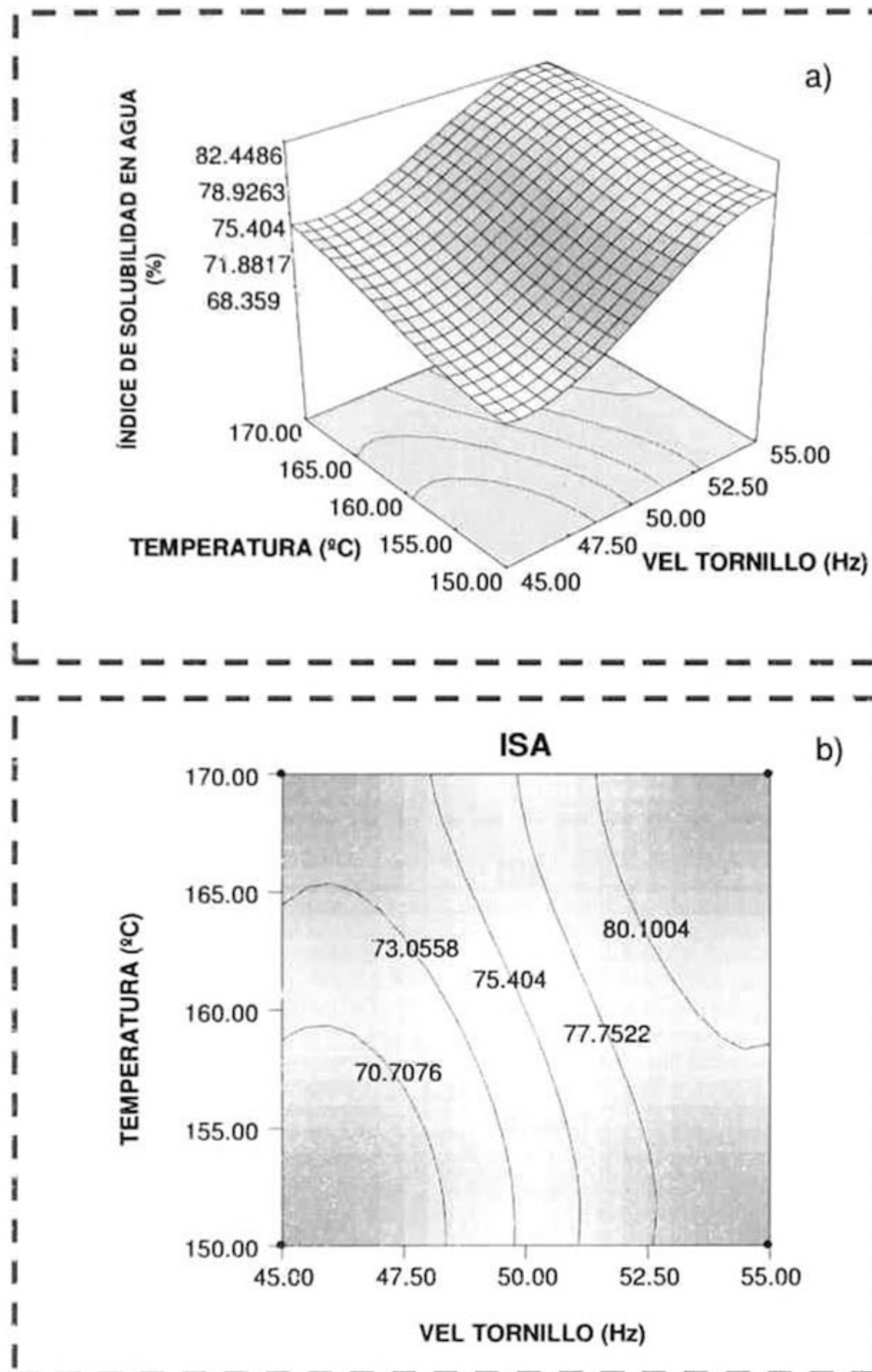
botanas directamente expandidas, ya que se procesaron con una humedad baja (16%).

Aparicio y col., (2003), encontraron que la modificación química por entrecruzamiento incrementó la solubilidad del almidón nativo de plátano desde un 3% a 60°C hasta un 20.22% a 90°C, esto posiblemente sea debido a que los reactivos usados como el tripolifosfato de sodio para llevar a cabo el entrecruzamiento incrementa la solubilidad, ya que las cargas que confieren este reactivo hacen a la molécula de almidón más hidrofílica y por lo tanto permite una mayor solubilización del *AR4* obtenidos por este proceso.

Los valores obtenidos para el *IAA* e *ISA* fueron superiores a los registrados por Menegassi y col., (2011), quienes obtuvieron extrudidos a base de harina amaranto. Los resultados muestran que las harinas extrudidas tienen *IAA* e *ISA* mas altos que las harinas sin procesar porque la solubilidad se relaciona con el grado de ruptura de la estructura granular por lo cual estos índices son indicadores directos del grado de cocción de los productos extrudidos. Los valores obtenidos fueron de 3.8 a 4.2 y de 54.1 a 57.6 % para los índices de absorción y solubilidad en agua respectivamente.

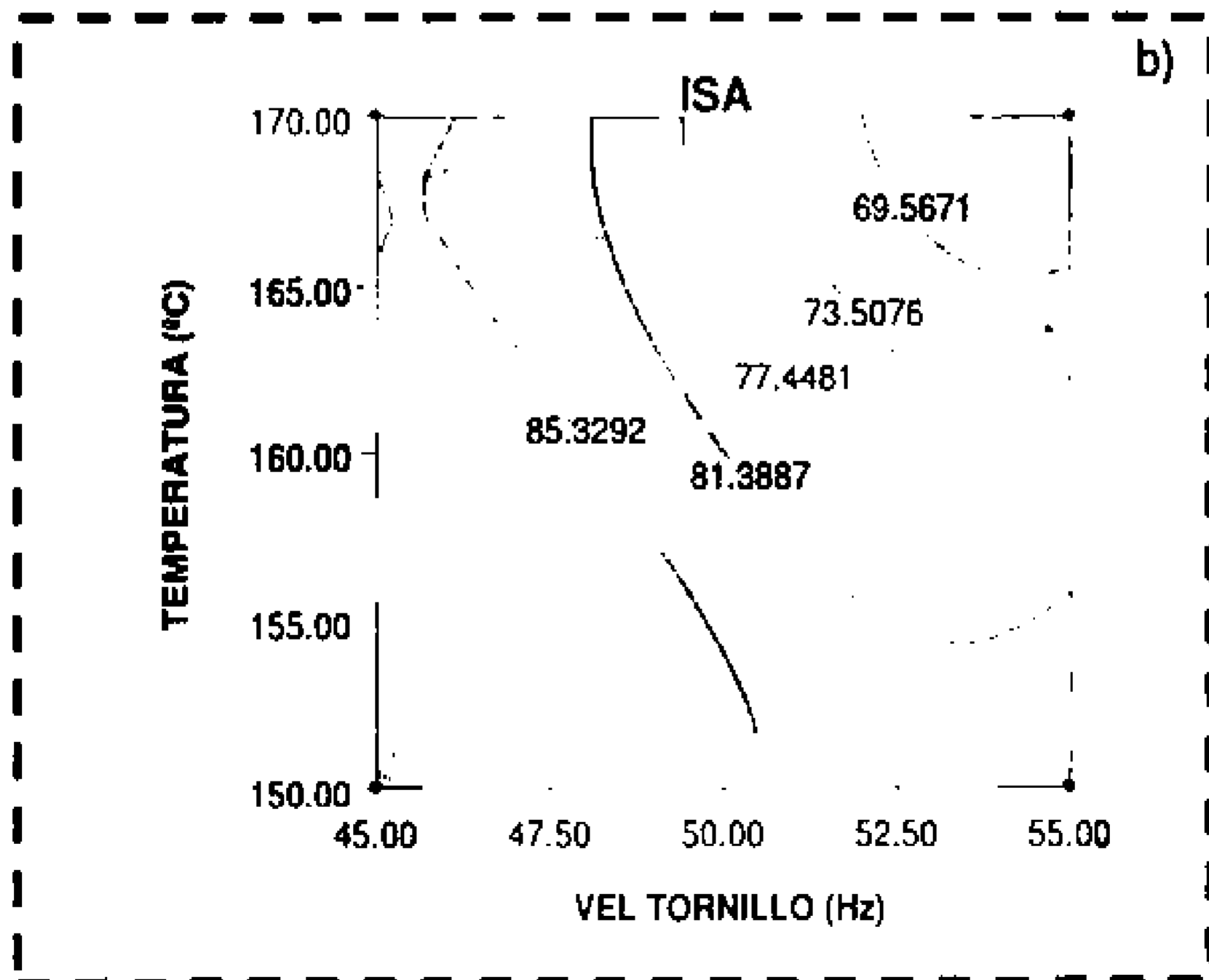
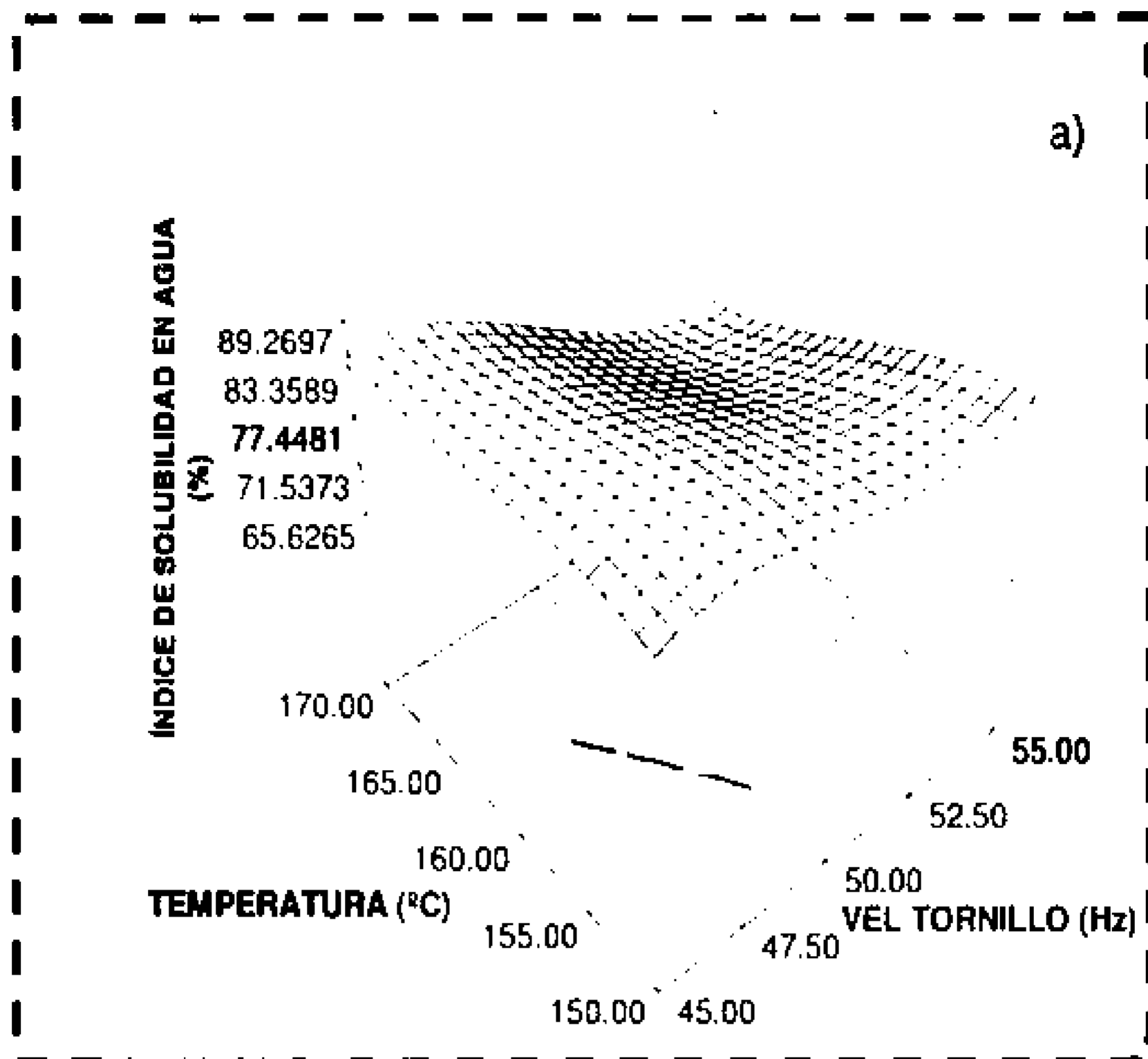
Sompong y col., (2011) procesaron cinco variedades de arroz blanco y de color con diferentes contenidos de amilosa pregelatinizados con un extrusor de doble tornillo a una temperatura de extrusión de 150°C y dos niveles de humedad (12 y el 16%). Se determinó la correlación de contenido de amilosa con el índice de absorción de agua (*IAA*), el índice de solubilidad en agua (*ISA*), la viscosidad de partida, la viscosidad en caliente y viscosidad final de los cinco extrudidos de arroz. Con alto contenido de amilosa en las variedades de arroz resultó en alto *IAA* y alta viscosidad final de extrudidos. Además, un mayor contenido de humedad del alimento (16%) incrementó el *IAA* pero disminuyó el *ISA*.





**Gráfica 16.** Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre el índice de solubilidad en agua (ISA) de productos fosfatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.



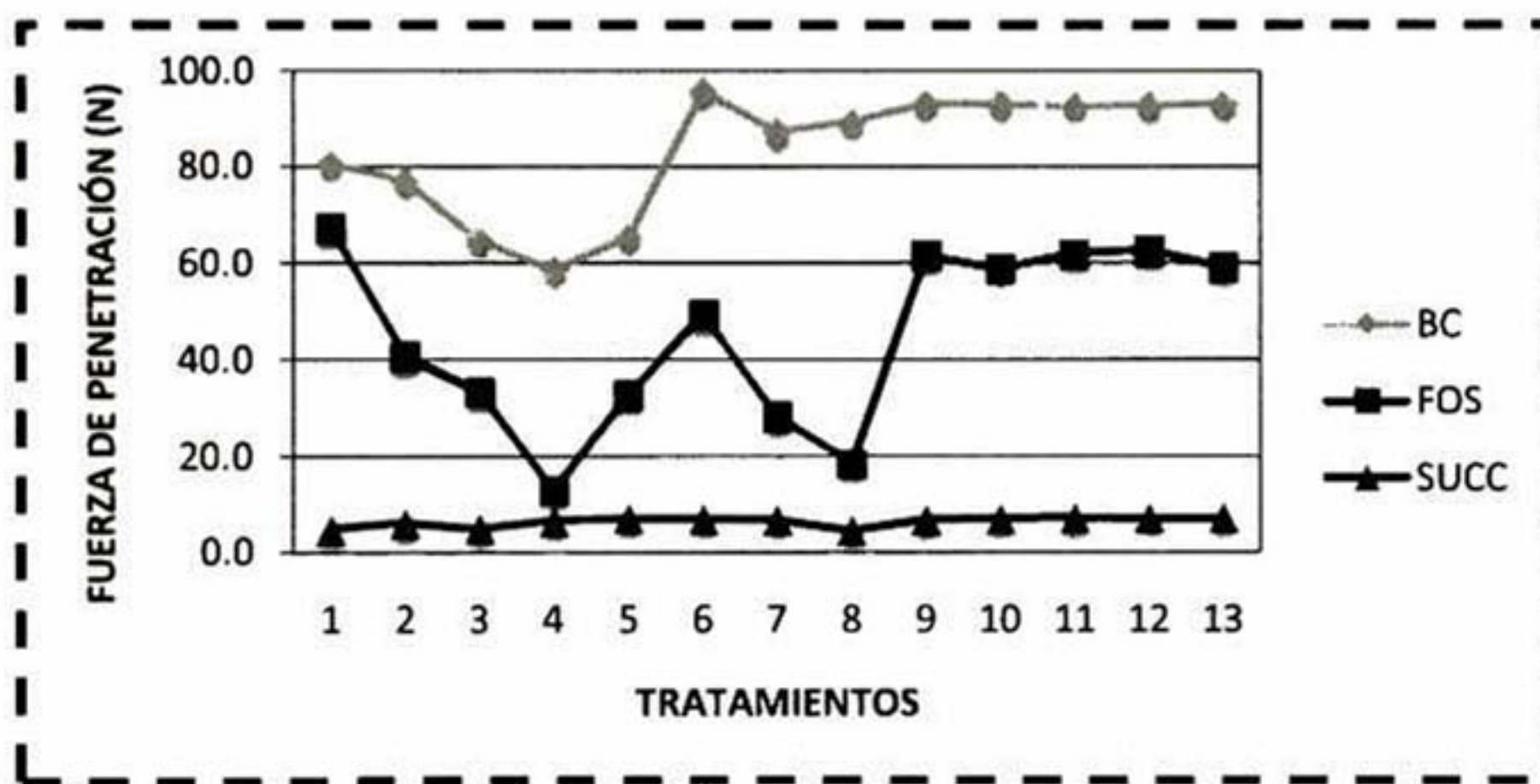


Gráfica 17. Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre el índice de solubilidad en agua (IAA) de productos succinatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.



### 6.1.1.5 Fuerza de penetración (FP)

La *FP* se determinó en newtons (N) mediante la medición de la fuerza máxima requerida para romper las muestras de extrusión, los valores son presentados en la tabla 8. De manera general se obtuvieron extrudidos con valores de fuerza de penetración altos para las botanas control, medios para las botanas con almidón fosfatado y muy bajos para las botanas con almidón succinatado, lo que las hace una botana crujiente y suave al masticar (Gráfica 18).



Gráfica 18. Valores comparativos de *FP* de productos directamente expandidos

Para las botanas control, la menor fuerza de penetración fue de 58.69N, correspondiente al tratamiento 4. El T<sub>4</sub> fue procesado a una temperatura de 170°C, una y una velocidad de tornillo de 55Hz. El valor máximo de *FP* fue de 95.68N y correspondió al tratamiento T<sub>6</sub>, el cual fue procesado a una temperatura de 160°C, con una velocidad de tornillo de 57.07Hz. Sin embargo es prudente decir que el modelo de predicción no fue significativo. En el caso de las botanas con almidón fosfatado, la menor fuerza de penetración fue de 12.97N, correspondiente al tratamiento 4. El T<sub>4</sub> fue procesado a una temperatura de 170°C y una velocidad de tornillo de 55Hz. El valor máximo de *FP* fue de 67.34N y correspondió al tratamiento T<sub>1</sub>, que fue procesado a una temperatura de 150°C, con una velocidad de tornillo de 45.07Hz, con lo cual se dice que a menor velocidad de tornillo y menor temperatura el producto se hace duro necesitando

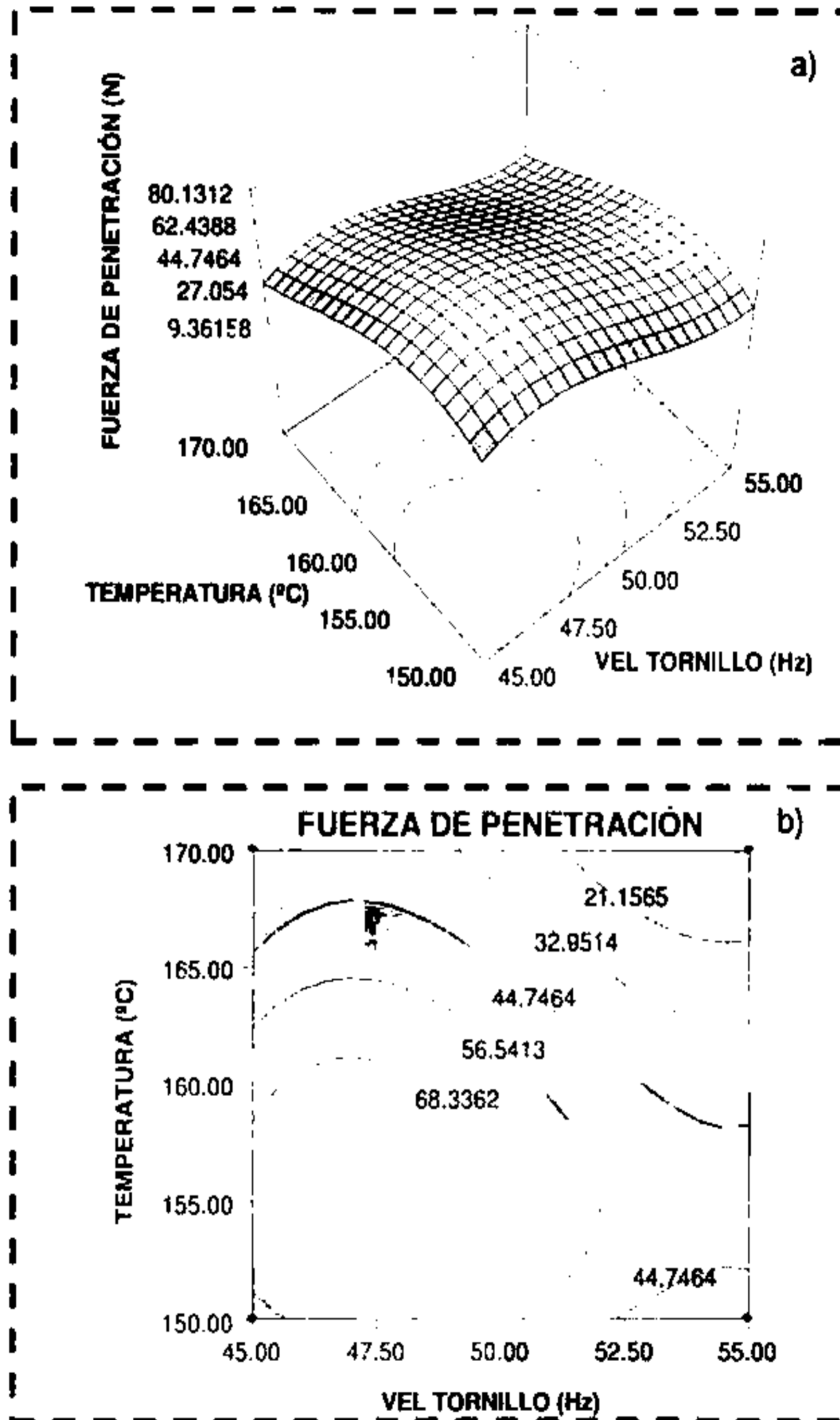


mayor fuerza para penetrar dicho producto. En la gráfica 19 a) se muestra que a temperaturas elevadas (170°C) y velocidades de tornillo altas (55Hz) los productos directamente expandidos tienden a ser menos duros, es decir mientras el proceso se hace más severo y con humedades bajas ≈16% el extrudido se expande correctamente. El modelo de regresión para las botanas con almidón fosfatado mostró un efecto altamente significativo ( $p < 0.01$ ) de la velocidad de tornillo en su término lineal ( $b_1$ ), cuadrático ( $b_{11}$ ) y cúbico ( $b_{111}$ ) sobre la fuerza de penetración. La temperatura presentó efecto significativo en sus términos lineal ( $b_2$ ) ( $p < 0.01$ ), cuadrático ( $b_{22}$ ) ( $p < 0.01$ ) y cúbico ( $b_{222}$ ) ( $p < 0.05$ ). Por otro lado ninguno de los términos de interacción presentó efecto sobre la fuerza de penetración.

Las botanas con almidón succinatado, presentaron como menor valor de fuerza de penetración 4.80N, correspondiente al tratamiento 1. El  $T_1$  fue procesado a una temperatura de 150°C y una velocidad de tornillo de 45Hz. El valor máximo de  $FP$  fue de 7.13N y correspondió al tratamiento  $T_{11}$ , que fue procesado a una temperatura de 160°C, con una velocidad de tornillo de 50Hz. La grafica 20 a) de superficie de respuesta muestra el comportamiento inverso que las botanas con almidón fosfatado, sin embargo el modelo de regresión para las botanas con almidón succinatado presentó falta de ajuste. Para las botanas con almidón succinatado el modelo de regresión mostró efecto de la velocidad de tornillo solo en sus términos lineal ( $b_1$ ) ( $p < 0.05$ ) y cúbico ( $b_{111}$ ) ( $p < 0.1$ ) sobre la fuerza de penetración. La temperatura presentó efecto significativo en sus términos cuadrático ( $b_{22}$ ) ( $p < 0.01$ ) y cúbico ( $b_{222}$ ) ( $p < 0.05$ ). Por otro lado ninguno de los términos de interacción presentó significancia. Resultados similares a los reportados en este trabajo obtuvieron Meng y col., (2010), quienes utilizaron la metodología de superficie de respuesta para evaluar los efectos del contenido de humedad (16 a 18%) velocidad de tornillo (250-320rpm) y temperatura de extrusión (150-170°C) sobre la fuerza máxima de penetración de productos expandidos a base de harina de garbanzo. Los resultados del análisis pusieron de manifiesto que la dureza mínima (184N) se predijo con una humedad de alimentación de 15%, velocidad del tornillo 299rpm y temperatura del barril de

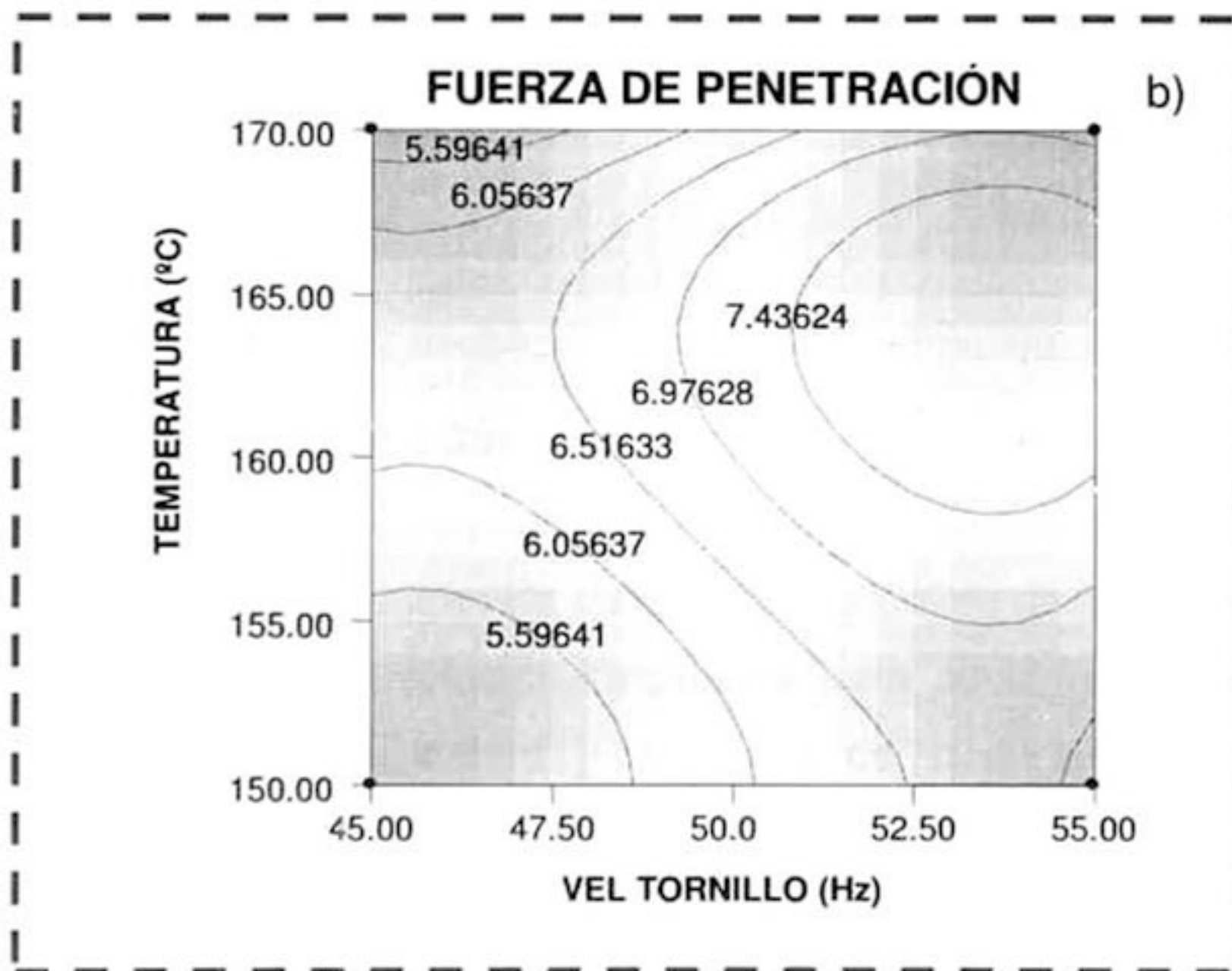
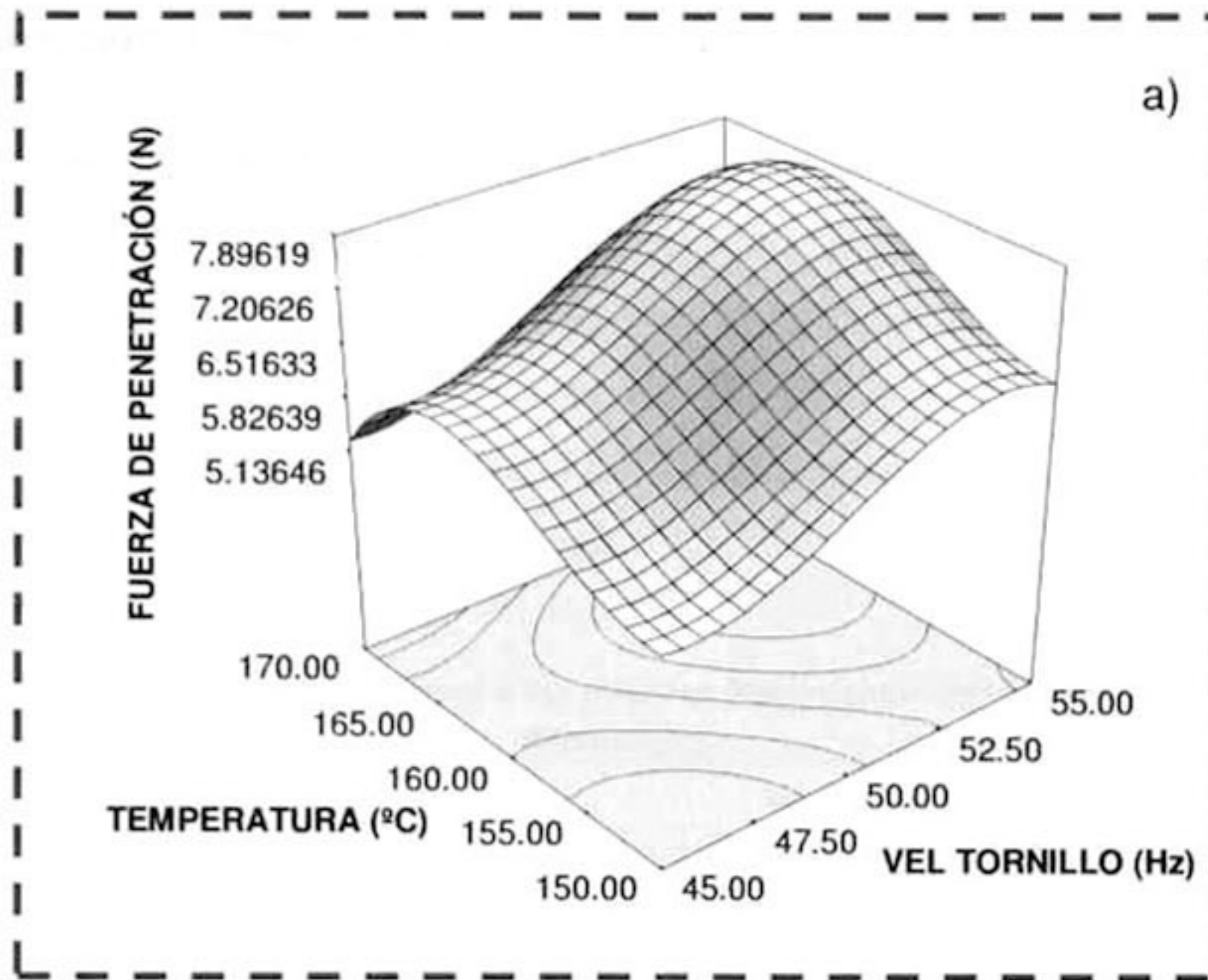


157°C. La dureza de extruidos se asocia con la expansión y la estructura celular del producto. Cuanto más alto sea el valor de la fuerza máxima requerida, mayor será la dureza de la muestra. Un producto de baja densidad, naturalmente, ofrece una dureza baja.



**Gráfica 19.** Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la fuerza de penetración (FP) de productos fosfatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.





**Gráfica 20.** Efecto de la temperatura y de la velocidad de tornillo sobre la fuerza de penetración (*FP*) de productos succinatados directamente expandidos por extrusión. a) superficie de respuesta y b) contornos.



### 6.1.1.6 Selección de los mejores tratamientos

La selección de los mejores tratamientos se llevó a cabo tomando en cuenta todas las propiedades evaluadas con anterioridad comparando los resultados obtenidos para cada tipo de botana extrudida, escogiendo los tratamientos con valores más estables de *IE*, *DA*, *L*, *IAA*, *ISA* y *FP*, de esta manera se tomaron los tratamientos  $T_4$  y  $T_7$  para la evaluación de *GS*, *AR*, y de sus propiedades estructurales y térmicas.

**Tabla 10.** Resultados correspondientes a los mejores tratamientos de las botanas directamente expandidas.

Tratamiento	Variables independientes		Variables dependientes						
	Vel. de tornillo	Temperatura	<i>IE</i>	<i>DA</i> (Kg/m <sup>3</sup> )	<i>IAA</i>	<i>ISA</i> (%)	<i>FP</i> (N)	<i>L</i>	
BC	4	55	170	2.37	512.11	9.91	74.60	58.69	89.18
	7	50	145.58	2.42	510.81	9.34	57.90	87.15	88.93
FOS	4	55	170	3.23	225.72	11.38	80.60	12.97	88.02
	7	50	145.58	2.92	328.37	8.92	76.20	28.28	87.19
SUC	4	55	170	3.55	125.13	10.55	64.70	6.47	90.25
	7	50	145.58	3.72	185.36	12.831	32.900	17.841	88.890

BC= Botana control

FOS= Botana con almidón fosfatado

SUC= Botana con almidón succinatado

### 6.1.1.7 Grado de sustitución (*GS*)

En la Tabla 11 se muestran los valores del contenido de fósforo obtenidos y los valores del grado de sustitución calculados para almidones fosfatados por extrusión. El contenido de fósforo y el grado de sustitución de almidones fosfatados concuerda con lo reportado por San Martín y col., (2004) que encontraron un grado de sustitución de 0.018 cuando utilizaron una proporción de TPS de 4.18%. Las diferencias en los valores reportados son probablemente debidas a las condiciones de extrusión, fuente de los materiales y métodos de análisis.



**Tabla 11. Grado de sustitución de almidones fosfatados de productos directamente expandidos.**

Muestra		% Fósforo	Grado de sustitución
T <sub>4</sub>	BC	0.0653	0.0034
	FOS	0.2148	0.0113
T <sub>7</sub>	BC	0.0673	0.0035
	FOS	0.2139	0.0113
Almidón nativo		0.0462	0.0024

BC= Botana control

FOS= Botana con almidón fosfatado

El grado de sustitución de almidones succinatados fue de 0.033 (Tabla 12). De acuerdo a lo reportado por Song y col., (2006), un valor similar de GS fue obtenido en almidón de arroz *Early Indica* usando concentraciones más elevadas de anhídrido n-octenil succínico (15%), comparado con la concentración del reactivo utilizado en este trabajo. Diferencias en la eficiencia de sustitución pudieron deberse a la fuente de almidón y los métodos de análisis empleados. Jeon y col., (1999) reportaron la preparación de almidón ceroso de maíz succinatado con un GS de 0.11, llevando a cabo la esterificación en condiciones para una modificación por método convencional, en una suspensión acuosa de almidón al 60% y una concentración de 15% de n-OSA (p/p con respecto al almidón). Bhosale y Singhal (2006) reportaron un GS de 0.021 en almidones de maíz ceroso tratados con 3% de n-OSA. Wang y col., (1997) succinataron almidón de maíz por extrusión reactiva encontrando grados de sustitución de 0.044 a 0.457 usando anhídrido succínico con concentraciones de 0.07 a 0.63 en fracción molar. En Estados Unidos de Norteamérica, la FDA ha aprobado el uso de este reactivo en un nivel máximo de 3%.

**Tabla 12. Grado de sustitución de almidones succinatados de productos directamente expandidos.**

Muestra		Grado de sustitución
T <sub>4</sub>	BC	0.01231645
	SUC	0.03348491
T <sub>7</sub>	BC	0.01646676
	SUC	0.0378472
Almidón nativo		0.00816615

BC= Botana control

SUC= Botana con almidón succinatado



### 6.1.1.8 Almidón resistente (AR)

El proceso de extrusión permite la cocción del almidón continuamente en ausencia de agua. La combinación de los efectos provocados por las altas temperaturas y presiones permite la transformación del material en una pasta que pasa a través del tornillo; como consecuencia, la estructura es altamente expandida y rota, e incluso, cuando las condiciones son drásticas, puede darse la degradación molecular. La disminución del contenido de almidón con la extrusión no es debida a la formación de AR, sino que se atribuye a la formación de fragmentos de almidón térmicamente modificados que no son biodisponibles para las enzimas, pero que presentan diferente naturaleza con respecto al almidón retrogradado.

Tabla 13. Contenido de almidón resistente en productos directamente expandidos.

Muestra		Almidón resistente(%)
T4	BC	43.86
	FOS	83.69
	SUC	78.25
T7	BC	47.79
	FOS	85.60
	SUC	76.42
Almidón Nativo		2.05

BC= Botana control

FOS= Botana con almidón fosfatado

SUC= Botana con almidón succinatado

El contenido de almidón resistente en el almidón nativo fue de 2.05% lo cual, es similar a lo reportado por Fuentes y col., (2011) quienes determinaron que es de 1.7%. Al procesarlo bajo condiciones controladas de temperatura y velocidad de tornillo, este contenido aumenta hasta un ≈45% ya que durante el procesamiento, se forma una mayor cantidad de AR; lo cual puede deberse a que, en el almidón nativo de papa se encuentra un alto contenido de fósforo como almidón ligado en forma de enlaces entrecruzados y como fósforo libre (en comparación con almidones de otras fuentes >0.10%) que es usado durante el



procesamiento para la formación de enlaces entrecruzados aunado a la formación de *AR* por retrogradación.

Hasjim y col., (2009) procesaron muestras a base de almidón de maíz y obtuvieron resultados similares, ya que el contenido de *AR* de los productos aumentó de 19 a 32.9% después del tratamiento hidrotérmico. Para lo correspondiente a las botanas con almidón fosfatado por extrusión, se presentaron valores de *AR* de 83.69 y 85.60% (Tabla 13); para las botanas con almidón resistente obtenido por succinatación el contenido porcentual de *AR* es de 78.25 y 76.42% (Tabla 13); con lo cual se puede ver que la introducción de enlaces entrecruzados si genera el aumento de *AR* en las botanas de segunda generación o productos directamente expandidos.

Zhang y col., (2011), evaluaron el efecto de la succinatación por el método convencional de almidón de maíz con alto contenido de amilosa sobre el contenido de almidón resistente. La succinatación disminuyó el contenido de almidón de digestión lenta de bajo grado de sustitución después de la cocción, mientras que aumentó el almidón resistente (*AR*) en el almidón crudo. Se encontró que para el almidón succinatado con grado de sustitución de 0.04 se tiene 86.3% de almidón resistente, el contenido de *AR* se redujo a 7.5% después de la cocción.

## **6.1.2 Propiedades estructurales y térmicas**

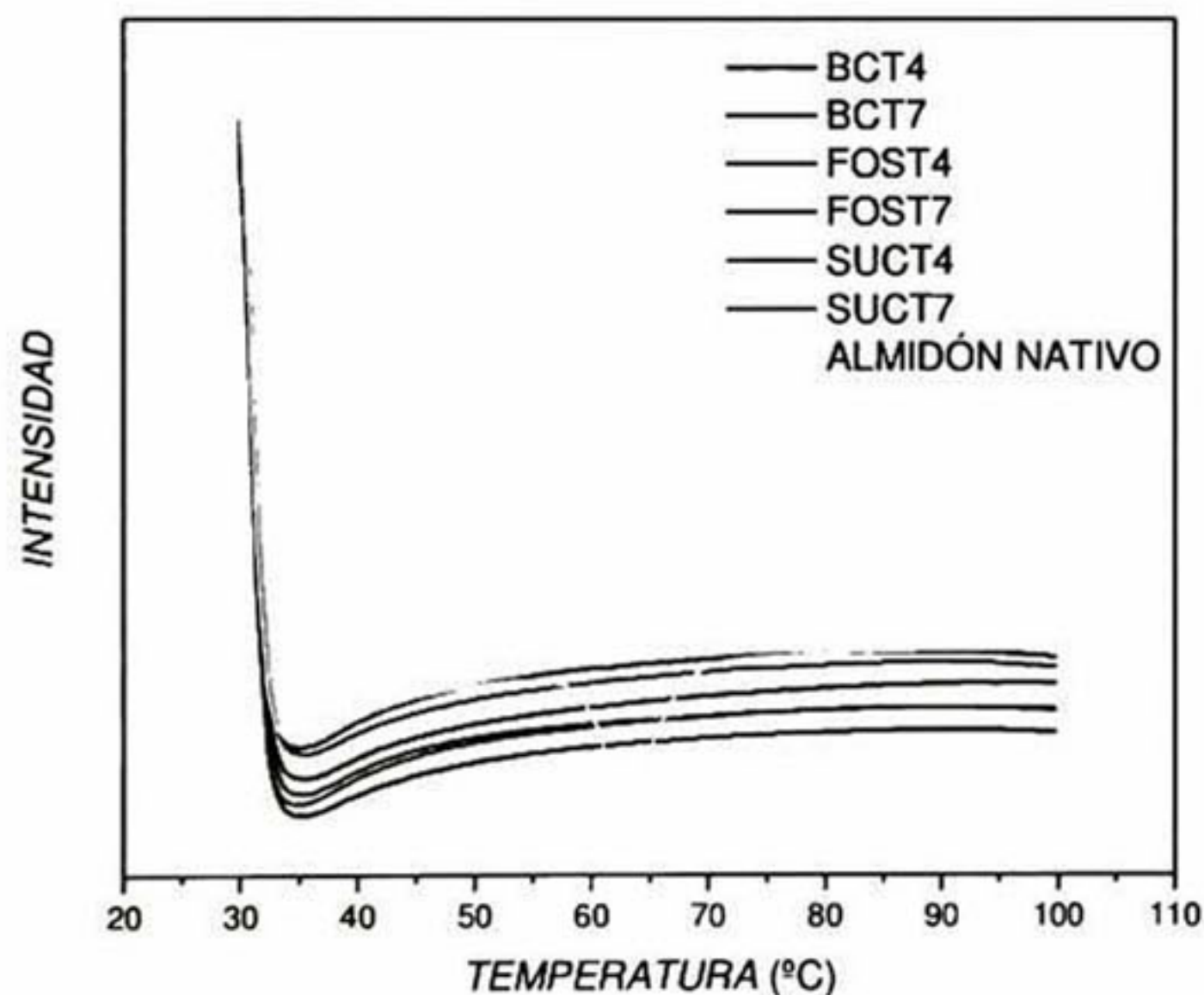
### **6.1.2.1 Calorimetría diferencial de Barrido (*DSC*)**

La temperatura a la cual un material polimérico pasa de un estado vítreo a un estado gomoso es llamada temperatura de transición vítrea (*Tg*). La *Tg* es un fenómeno dependiente del tiempo y generalmente se manifiesta como un rango limitado de temperaturas que marcan esta transición física. La transición vítrea de un material es un fenómeno de pseudo-segundo orden.



La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) está acompañada de cambios en la capacidad calorífica y el coeficiente de expansión térmica del sistema. La capacidad calorífica es la cantidad de calor requerida para elevar o disminuir la temperatura de un material. Sin embargo no se observó ningún tipo de cambio de transición, lo cual puede deberse al agresivo procesamiento de las botanas transformando totalmente el material inicial.

Chinnaswamy y col., (1989) reportaron que el almidón nativo una vez extrudido no presenta pico de gelatinización. Sin embargo Lee y col., (1999) reportaron que el grado de gelatinización del almidón extrudido a condiciones supercríticas fue mayor conforme se disminuía la temperatura de extrusión, encontrando que los productos extrudidos a 80°C mostraron un pequeño pico de gelatinización, mientras que a 90 y 100°C no mostraron ningún pico endotérmico, siendo similar a lo encontrado en el presente trabajo.



**Gráfica 21.** Termogramas de tratamientos  $T_4$  y  $T_7$  de botanas control (BC), botanas con almidón fosfatado (FOS), botanas con almidón succinatado (SUC) y almidón nativo de productos directamente expandidos.



Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Zhang y col., (2011), quienes evaluaron los efectos de la succinatación por el método convencional de almidón de maíz con alto contenido de amilosa sobre algunas propiedades estructurales y térmicas. El análisis de *DSC* reveló un amplio pico endotérmico de gelatinización que osciló entre 72,5°C a 96,4°C para el almidón nativo, y una tendencia a la baja para los productos de mayor grado de sustitución (*GS*). O'Brien y col., (2009) determinaron el efecto de la introducción de grupos fosfato en la estructura del almidón de maíz ceroso y de papa, determinaron que la mayoría de la estructura ordenada en todos los tipos de almidón analizados fue interrumpido por extrusión como lo demuestra su endotermas disminuidas. No se observaron endotermas para el almidón de maíz ceroso, lo que indica que su estructura ordenada se vio interrumpido por completo. Todos los almidones de maíz restantes exhibieron dos endotermas, mientras que el almidón de papa exhibió sólo una.

#### **6.1.2.2 Difractometría de rayos X**

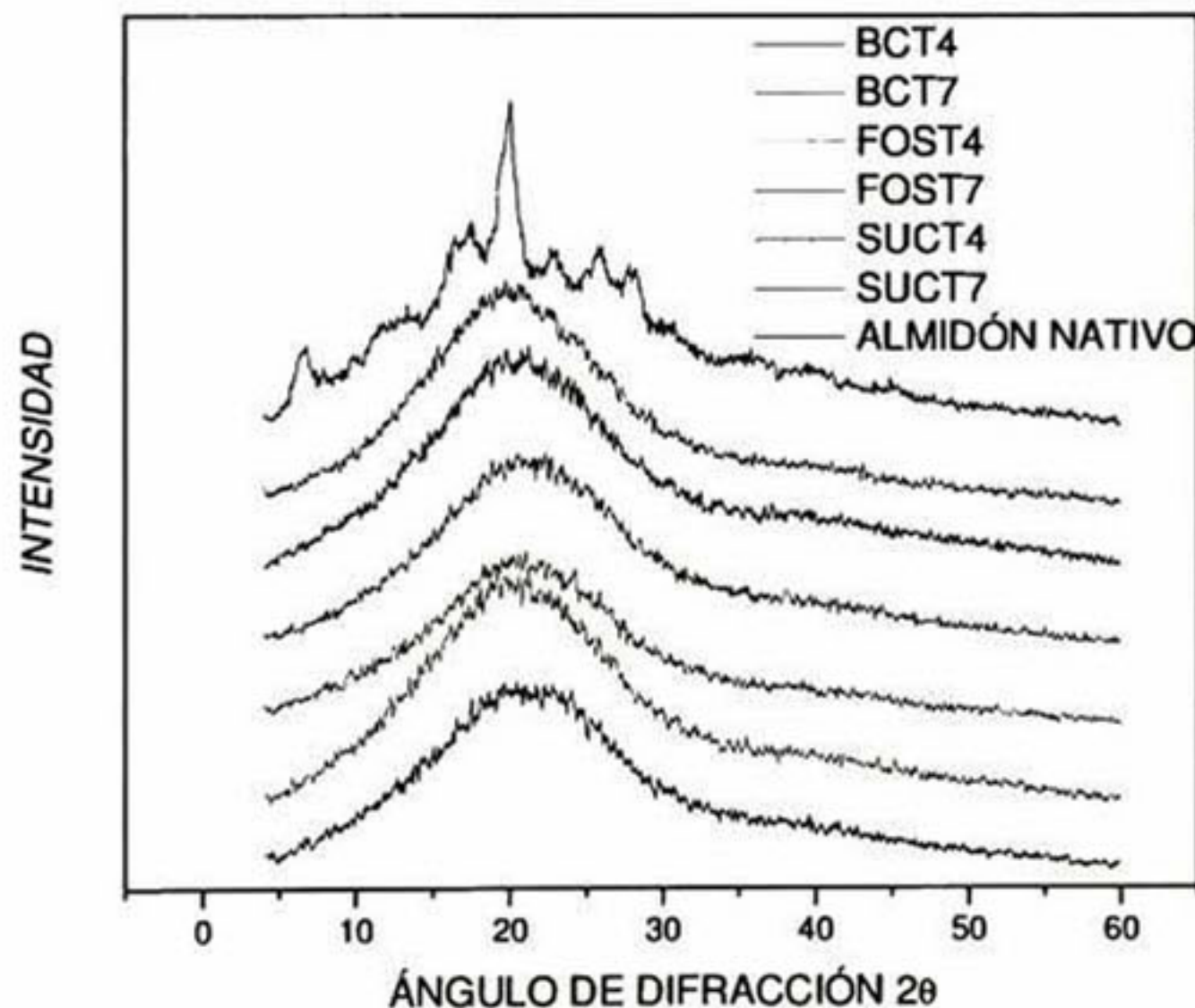
El análisis de rayos X a bajo ángulo muestra que el gránulo de almidón está formado de regiones amorfas y regiones cristalinas. La parte amorfa del gránulo del almidón está formada esencialmente por la amilosa, mientras que la región cristalina está formada por cúmulos paralelos de cadenas cortas (59-60 °Å) de la amilopectina esta última presenta regiones amorfas y regiones altamente cristalinas.

En la gráfica 22 se muestra todos los picos característicos del almidón de papa en el difractograma se desvanecieron en todos los tratamientos procesados, dando como resultado un valor de cristalinidad relativa (*CR*) mínimo  $\approx 5\%$ , con lo que se demuestra que la %*CR* (el grado de ordenamiento de las moléculas de amilopectina) se perdió durante el procesamiento, algunos autores la han asociado al contenido de *AR* indicando un mayor contenido de *AR* a menor cristalinidad relativa lo que indica que el grado de cristalinidad del almidón disminuye cuando se incrementa el contenido de amilosa (Sandhu y Lim, 2008). El



procesamiento por extrusión destruye la estructura cristalina de los almidones, ya sea parcial o totalmente, dependiendo de la relación de amilosa-amilopectina y de las condiciones de extrusión como contenido de humedad, esfuerzo de corte, temperatura, entre otros. A temperaturas elevadas, la estructura es completamente destruida, conduciendo a la formación de un difractograma de rayos X típico de un estado amorfo o puede ser inducida la formación de una nueva estructura (Colonna y col., 1989).

He y col., (2006) evaluaron el efecto del contenido de amilosa en el almidón esterificado por succinatación en almidón de arroz con siete diferentes contenidos de amilosa. Dichos almidones fueron modificados con anhídrido octenil succínico (OSA) en sistemas de suspensión acuosa. Se mostró una correlación negativa entre la cristalinidad y el GS. Cuando aumentó el GS de 0.024 a 0.030, la cristalinidad correspondiente se redujo de 28.6 a 15.0%.



**Gráfica 22.** Patrones de difracción de rayos X de productos directamente expandidos.

O'Brien y col., (2009) determinaron el efecto de la introducción de grupos fosfato en la estructura del almidón de maíz ceroso y de papa, encontrando



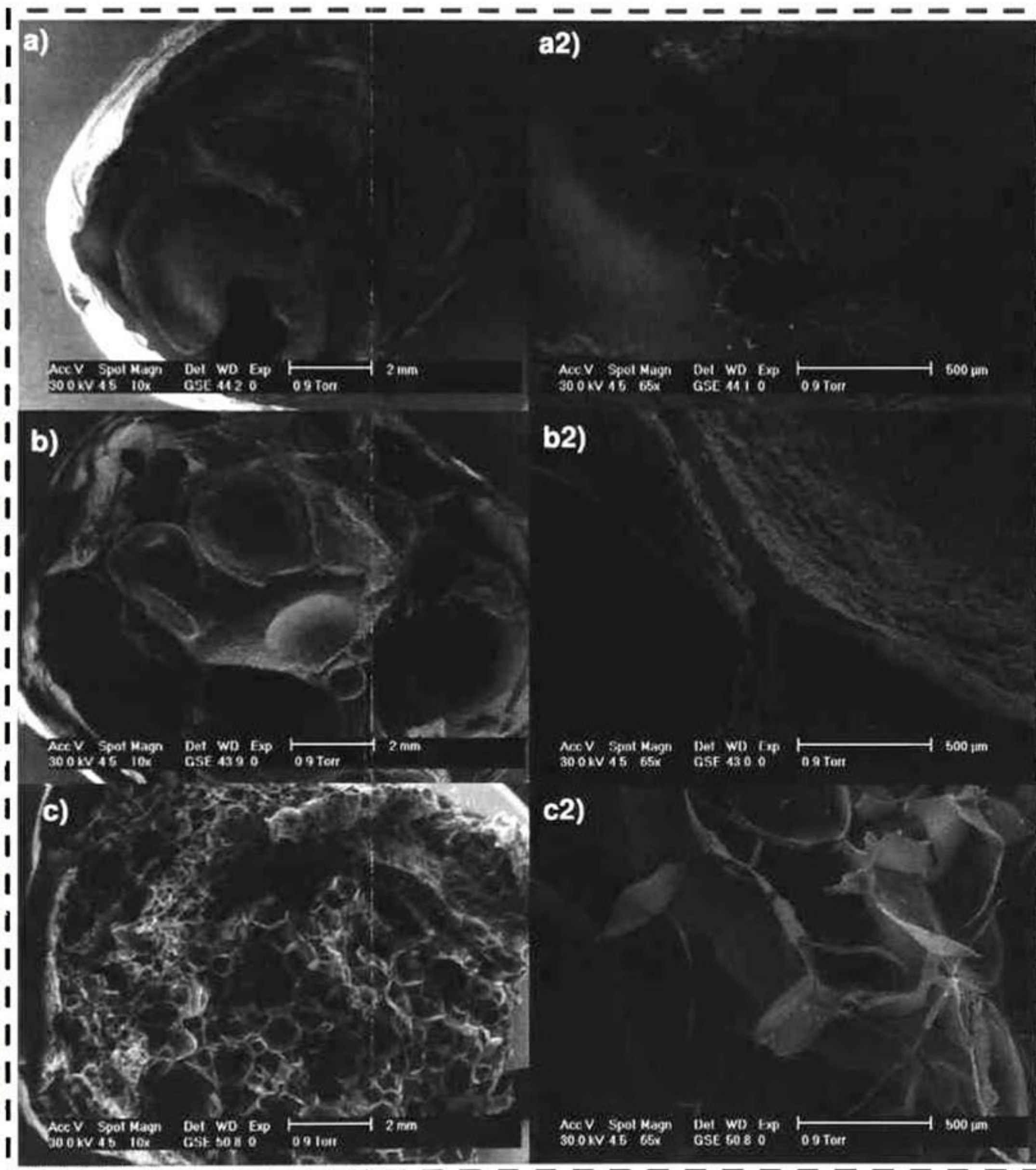
durante su análisis que los difractogramas de rayos X de las muestras no mostraron picos de difracción después de la extrusión. Estos resultados mostraron que la fosfatación reduce la intensidad de los picos en el almidón, lo que indica que la incorporación de los fosfatos debilitó la estructura cristalina.

### **6.1.2.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

Se tomaron microfotografías de las botanas directamente expandidas (Figura 13) (Figura 14) realizando una toma a 10x y a 65x para poder observar la morfología de las botanas y el tamaño de burbuja formada durante la expansión.

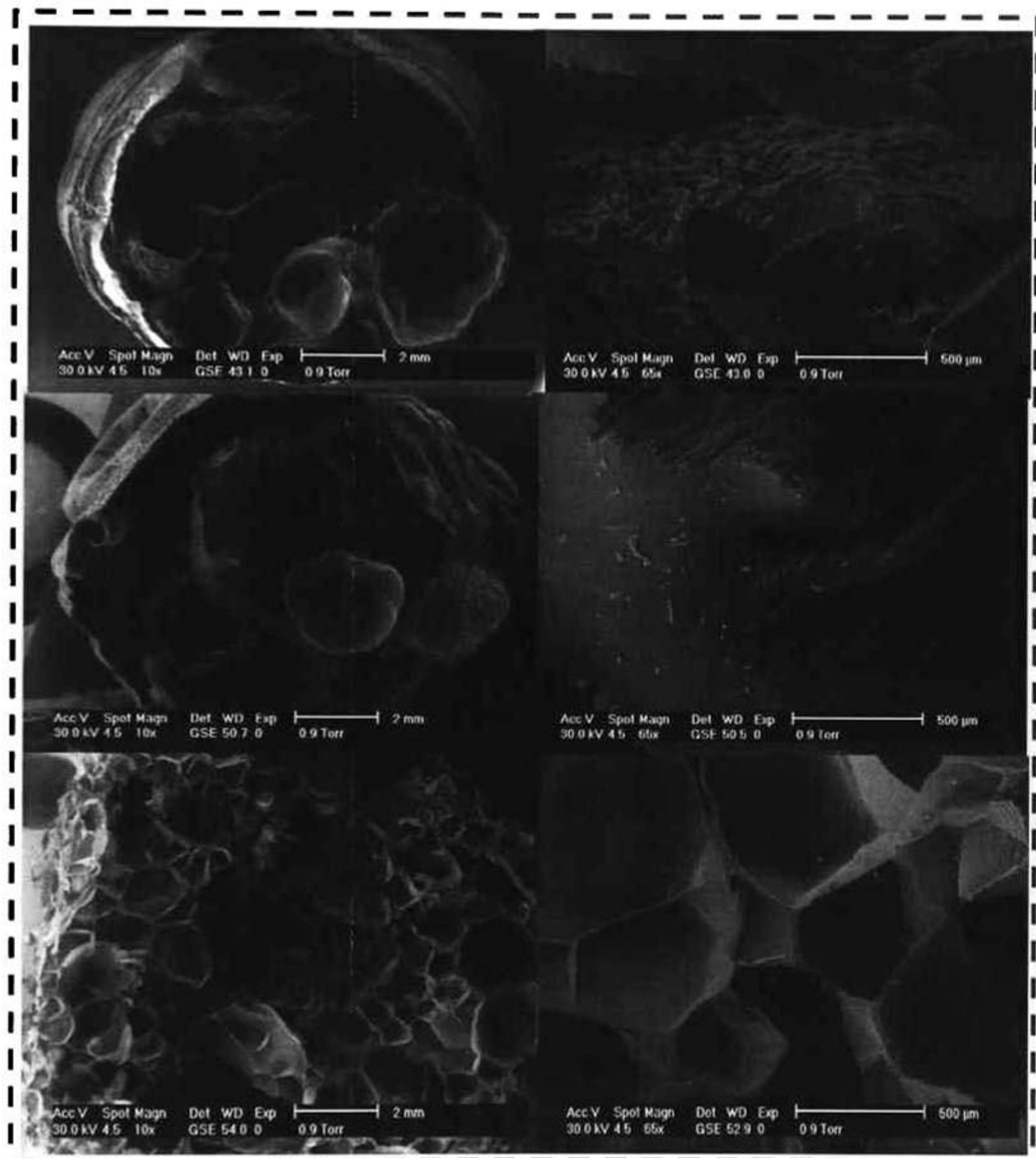
Se observó en la figura 13 que para el tratamiento 4 de la botana control la expansión fue muy baja mostrando una botana casi sólida sin células de aire, esto se debe a que es una botana que contiene únicamente almidón de papa, sin aditivos ni reactivos químicos para modificar su estructura, sin embargo, se puede observar que el proceso resultó efectivo para la obtención de una botana con almidón gelatinizado por completo. En la figura 13 b) se observa el tratamiento 4 de la botana con almidón resistente obtenido por fosfatación la cual muestra un tamaño de burbuja menor que el obtenido por la botana control. Para las botanas con almidón succinatado se observa que el tamaño de célula es notablemente pequeño. Se puede decir que la botana con almidón succinatado presenta células de aire de menor tamaño además de que las paredes de estas son de menor espesor que las correspondientes a la botana control y a la botana con almidón fosfatado; esto mejora la textura de la botana ya que se necesita menor fuerza para penetrar la botana. En la figura 14 se muestran las microfotografías correspondientes al tratamiento 7 de las botanas control, botanas con almidón fosfatado y botanas con almidón succinatado que muestran el mismo comportamiento que para el tratamiento 4 en las que las células pequeñas para la botana con almidón succinatado le confieren mejores características de expansión y textura con relación a las botanas con almidón fosfatado y que la botana control.





**Figura 13.** Microfotografías del tratamiento T4 de productos directamente expandidos a) botana control a 10x, a2) botana control 65x, b) botana con almidón fosfatado 10x, b2) botana con almidón fosfatado 65x, c) botana con almidón succinatado 10x, c2) botana con almidón succinatado 65x.



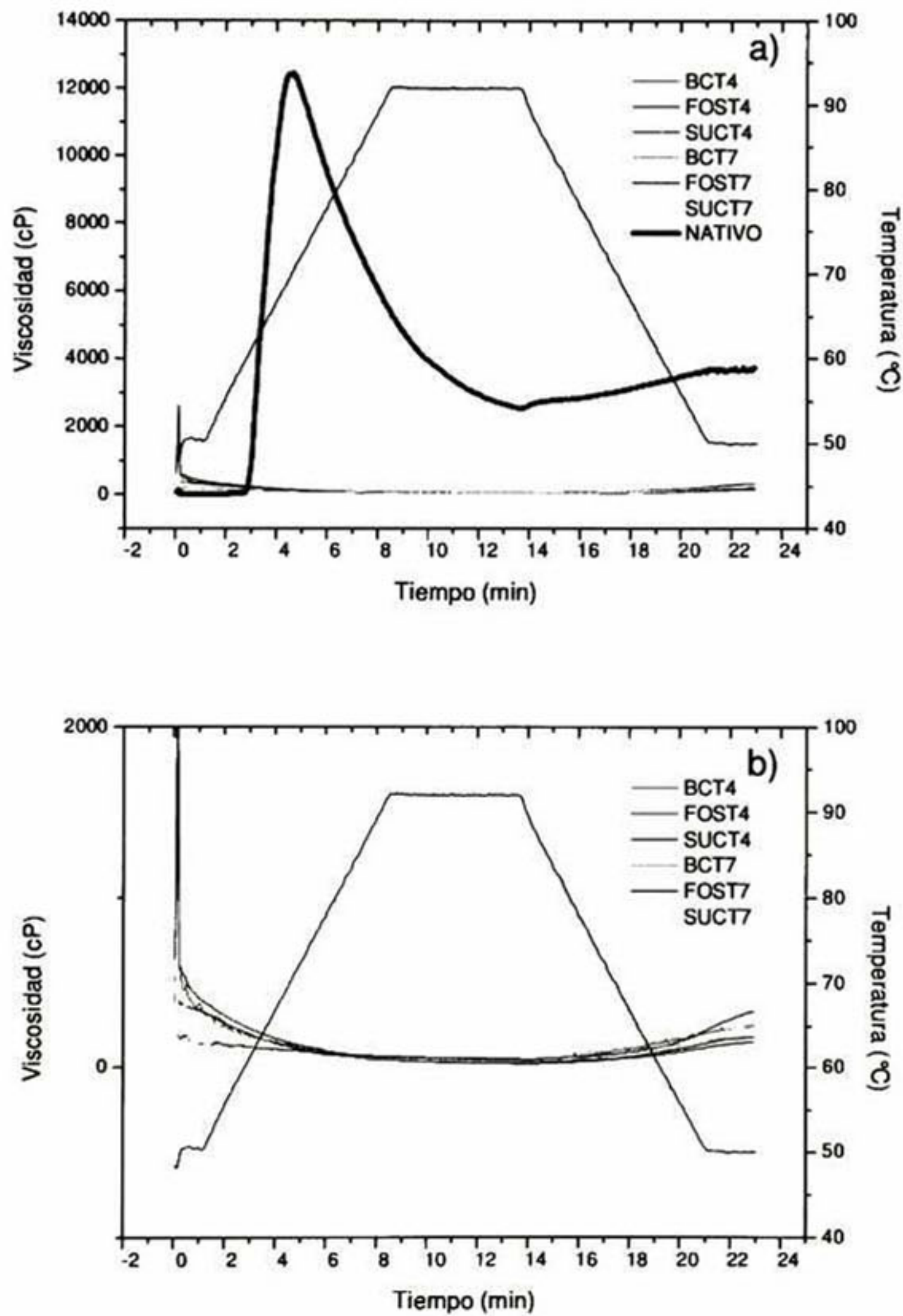


**Figura 14.** Microfotografías del tratamiento T7 de productos directamente expandidos a) botana control a 10x, a2) botana control 65x, b) botana con almidón fosfatado 10x, b2) botana con almidón fosfatado 65x, c) botana con almidón succinatado 10x c2) botana con almidón succinatado 65x.



#### 6.1.2.4 Perfiles de viscosidad (RVA)

Debido a las condiciones de extrusión y a las modificaciones químicas que se realizaron a algunos productos directamente expandidos, ninguno de los almidones desarrolló viscosidad. En la gráfica 23a) se muestran los perfiles de viscosidad del almidón nativo y las muestras extrudidas.



**Gráfica 23.** Perfiles de viscosidad de los tratamientos T<sub>4</sub> y T<sub>7</sub> de botanas control (BC), botanas con almidón fosfatado (FOS) y botanas con almidón succinatado (SUC) a) con almidón nativo, b) sin almidón nativo de productos directamente expandidos.



Woo y Seib (2002) reportaron que sus análisis de RVA en las muestras de almidones fosfatados de trigo, maíz, papa y arroz no mostraron curvas de viscosidad características de sus almidones nativos, posiblemente a degradación térmica y formación de enlaces entrecruzados consecuencia de la fosfatación.

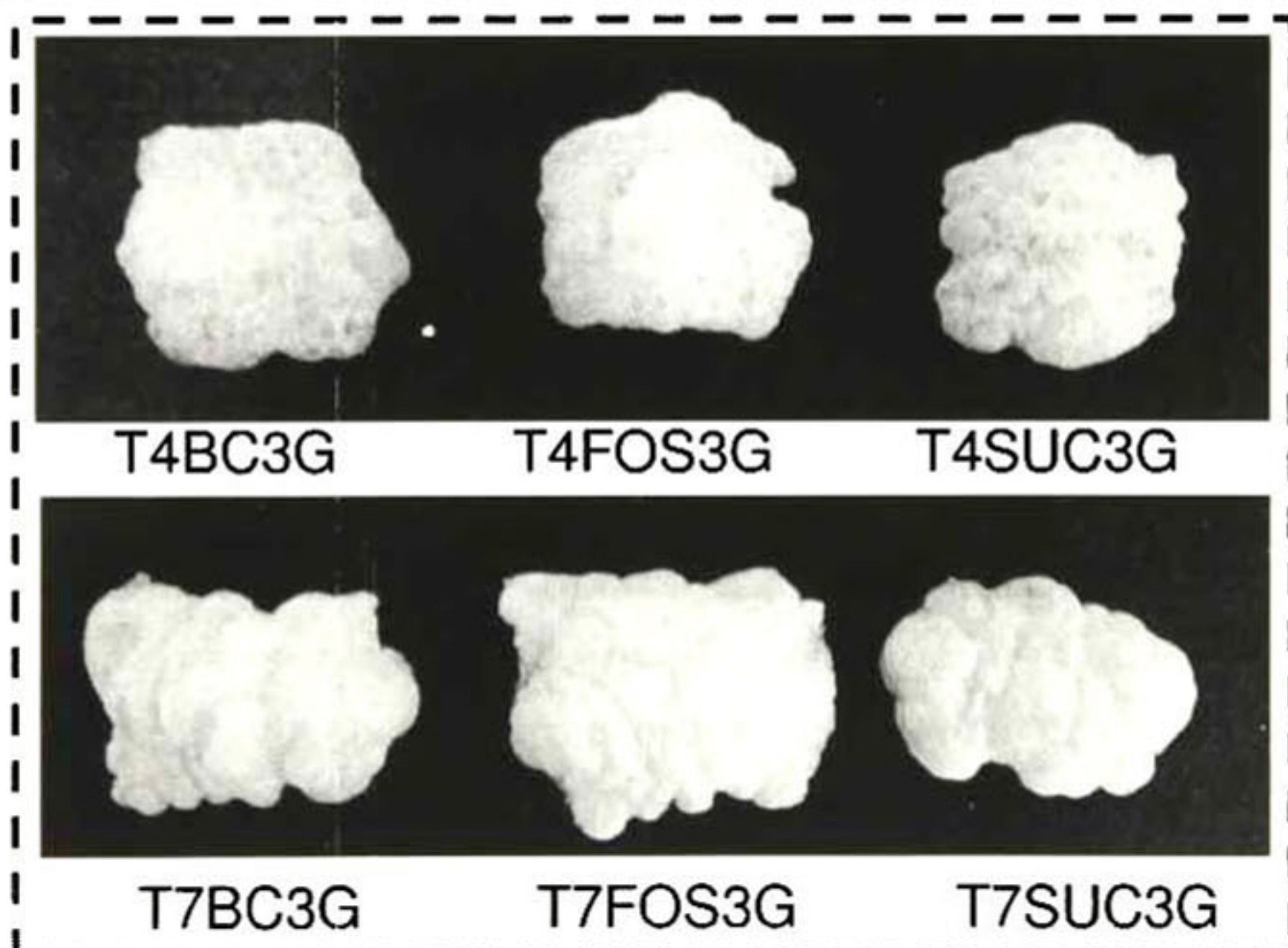
Murúa y col., (2009) elaboraron almidones acetilados, succinatados y fosforilados de almidón de maíz ceroso que fueron preparados por extrusión reactiva en una extrusora de un solo tornillo. Los almidones se hidrolizan con ácido clorhídrico (3.4% en base seca, a 50 ° C durante 6 horas) antes de ser esterificados. Los almidones succinatados y acetilados se modificaron de manera convencional. El fosfato de almidón fue preparado por un método convencional, en una suspensión y por extrusión. Los almidones fosfatados modificados por el método convencional mostraron una mayor viscosidad que el almidón de maíz ceroso. Los almidones fosfatados modificados por el proceso de extrusión que se hidrolizaron con ácido antes de su procesamiento no desarrollaron viscosidad. Los almidones que no se hidrolizaron mostraron una mayor viscosidad que los hidrolizados antes de la extrusión, aunque no se desarrolló un pico de viscosidad. Por otro lado el almidón fosfatado preparado por extrusión presentó el perfil más bajo de viscosidad. Por lo general, los almidones modificados por extrusión presentan perfiles de viscosidad menores en comparación con los almidones que han sido modificados por los procesos convencionales. Esto se puede atribuir a la desintegración de la estructura del almidón por el alto cizallamiento y alta presión, además de temperaturas altas durante la extrusión (Chang y Lii, 1992).

## **6.2 Botanas de 3ª generación**

La extrusión de las botanas 3ª generación se llevó a cabo con temperaturas mayores a 85°C y velocidad de tornillo de 45 Hz con una humedad de 25 a 35%. Para determinar el tiempo óptimo de expansión en horno de microondas que fue de 30 segundos, se realizó una cinética de expansión a 15, 20, 25, 30 y 35 segundos (Apéndice 3). A tiempos <30s se observó que la botana no expandía completamente, dejando partes del pellet duras y no masticables, a 35s la botana



comenzaba a mostrar quemaduras ocasionadas por el calentamiento excesivo; de aquí se determinó que el mejor tiempo de expansión en el horno de microondas fue de 30s que corresponde con lo reportado por Aguilar (2004). En la figura 15 se muestra la apariencia de los tratamientos 4 y 7 de botanas de 3ª generación con almidón resistente obtenido por fosfatación, succinatación y una botana control que es libre de aditivos y reactivos químicos; se puede observar que en los dos tratamientos mostrados la botana con almidón fosfatado presentaron una mejor apariencia comparada con la botana control y la botana con almidón succinatado. Los resultados obtenidos son semejantes a los reportados por Arimi y col., (2008); quienes encontraron, para productos de imitación de queso conteniendo *AR* expandidos por microondas, que el volumen del producto era mejor con tiempos de calentamiento >30s expandido ya que si el producto se mantenía mayor tiempo en calentamiento la estructura colapsaba. En general, independientemente de su formulación, se observó que un sobrecalentamiento de las muestras en tiempos >30 s la expansión disminuía. Se cree que el aumento de la pérdida de humedad que ocurre en el tiempo de calentamiento mayor a 30s provoca la disminución de la expansión.



**Figura 15.** Apariencia de tratamientos 4 y 7 de botanas de 3ª generación (T=tratamiento, BC=botana control, FOS=botanas con almidón fosfatado, SUC=botanas con almidón succinatado, 3G= tercera generación).



## **6.2.1 Propiedades fisicoquímicas y de textura**

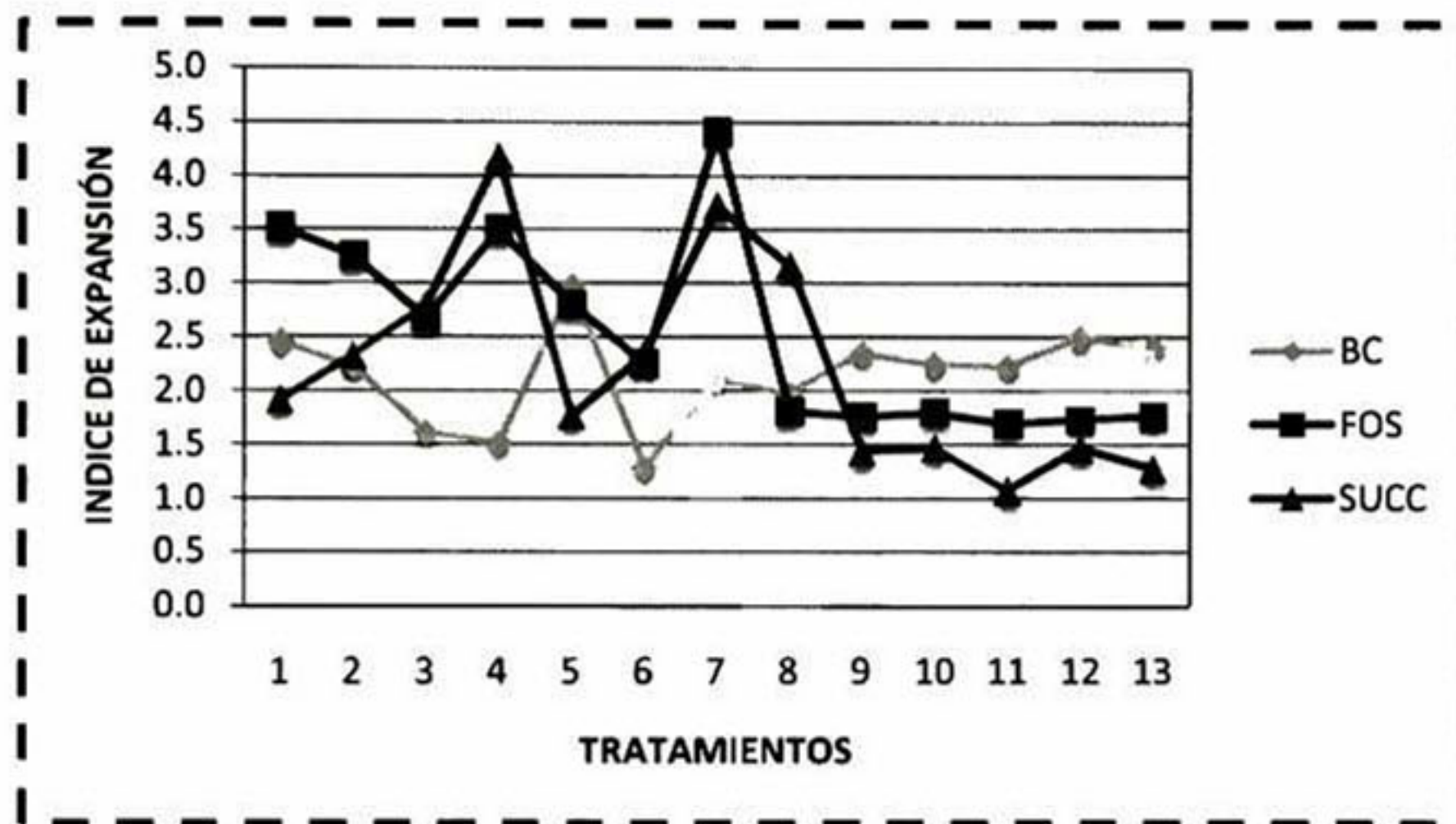
### **6.2.1.1 Índice de expansión (IE)**

Moraru y Kokini (2003) reportaron que la expansión de productos de extrusión es un fenómeno complejo que por lo general se produce a temperaturas altas y humedades de alimentación bajas, esto se debe a acontecimientos tales como las transformaciones estructurales de los biopolímeros, las transiciones y las transformaciones de fases que conducen a la formación de burbujas de aire. Lee y col., (2000) encontraron que los productos expandidos por microondas a partir de almidón de maíz mostraron una importante expansión en temperaturas de extrusión más altas (90 o 110°C). Estos autores atribuyen los índices de alta expansión a un mayor grado de gelatinización y encontraron que a un porcentaje de gelatinización de 52.7%, los granos mostraron una mayor expansión. Aguilar y col., (2004) encontraron un comportamiento similar en el pellets expandidos por microondas a partir de almidón de papa, maíz, proteína de suero de leche, y harina de soya. Estos cambios se atribuyeron a un aumento de la gelatinización del almidón causada por un aumento en la temperatura del barril, lo que permitió que más agua quedara atrapada en el producto, dando una mayor expansión.

Tras el calentamiento por microondas, cuando la temperatura supera el punto de ebullición del agua, el agua contenida en los pellets se transforma en vapor sobrecalentado. Los vapores se acumulan en los núcleos en la matriz vítrea, creando una presión alta a nivel local. Como la matriz de cereales se somete a una fase de transición vítrea durante el calentamiento, empieza a ceder bajo la presión del vapor sobrecalentado y la expansión tiene lugar. Ya que la humedad se pierde en la matriz, o con posterioridad al cese de calentamiento por microondas, la matriz vuelve al estado vítreo, donde la resistencia mecánica es lo suficientemente alta para mantener la forma de las celdas formadas. Si la matriz es demasiado suave, como es el caso de las muestras de alta humedad, colapsan (Eun y col., 2000). En la gráfica 24 se puede observar el comportamiento del IE



de las botanas de tercera generación expandidas por microondas en sus tres presentaciones, botanas control, botanas con almidón fosfatado y botanas con almidón succinatado. Los valores observados van de 1 a 4. Obteniendo los menores valores para las botanas con almidón resistente obtenido por succinatación,



Gráfica 24. Valores comparativos de *IE* de botanas de tercera generación.

Los valores de *IE* de la botana control variaron de 1.29 a 2.50. Para los productos directamente expandidos conteniendo *AR* obtenido por fosfatación, este parámetro varió de 1.70 a 3.52 y para las botanas con *AR* obtenido por succinatación se encuentran en el rango de 1.07 a 3.72 (Tabla 15). Los coeficientes de regresión del modelo (Tabla 14) para la botana control, muestran que la temperatura presentó efecto significativo en sus términos lineal ( $b_1$ ), cuadrático ( $b_{11}$ ) ( $p \leq 0.05$ ) y cúbico ( $b_{111}$ ) ( $p \leq 0.01$ ), mientras que la humedad presentó efecto significativo sobre los términos lineal ( $b_2$ ) ( $p \leq 0.01$ ), cuadrático ( $b_{22}$ ) ( $p \leq 0.05$ ) y cúbico ( $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). La interacción de la humedad y de la temperatura no tuvo efecto significativo. En la gráfica 25a) de superficie de respuesta se puede observar que a humedades altas (35%), se incrementó el *IE* de las mezclas mientras que a temperaturas  $\approx 118^\circ\text{C}$  se incrementó también, el *IE* de los productos fosfatados directamente expandidos por extrusión.



**Tabla 14. Análisis de varianza para el índice de expansión (IE), Densidad aparente (DA), Índice de absorción de agua (IAA), Índice de solubilidad en agua (ISA), Fuerza de penetración (FP) y Luminosidad (L) de botanas de tercera generación.**

<b>Respuesta</b>	<b>Botana</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Coefficiente de variación (%)</b>	<b>Valor de F</b>	<b>P de F (modelo)</b>	<b>Falta de ajuste</b>
<b>IE</b>	BC	0.9671	5.93	20.99	0.0020	0.1727
	FOS	0.9635	10.50	18.87	0.0026	<0.0001
	SUC	0.9896	6.98	67.64	0.0001	0.6772
<b>DA</b>	BC	0.9156	13.30	15.18	0.0012	0.0440
	FOS	0.8892	20.53	5.73	0.0362	<0.0001
	SUC	0.9341	16.13	19.93	0.0005	0.3203
<b>IAA</b>	BC	0.7988	11.22	5.56	0.0220	0.0003
	FOS	0.4561	19.86	1.17	0.4077	<0.0001
	SUC	0.9823	2.21	39.66	0.0004	0.0658
<b>ISA</b>	BC	0.9527	11.05	14.39	0.0049	0.0015
	FOS	0.7630	32.25	4.51	0.0371	0.0004
	SUC	0.9944	4.36	125.98	<0.0001	0.8054
<b>FP</b>	BC	0.9742	11.11	26.95	0.0011	0.0127
	FOS	0.9946	4.99	131.97	<0.0001	0.2236
	SUC	0.8769	14.29	9.97	0.0044	0.0215
<b>L</b>	BC	0.7219	0.34	3.63	0.0612	0.0020
	FOS	0.9551	0.18	29.81	0.0399	0.0001
	SUC	0.5510	0.75	1.72	0.2484	0.0006

BC= botana control, FOS= botanas con almidón resistente obtenido por fosfatación, SUC=botanas con almidón resistente obtenido por succinatación.



**Tabla 15.** Diseño experimental utilizado y variables de respuesta: índice de expansión (IE), densidad aparente (DA), índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), fuerza de penetración (FP) y luminosidad (L) para botanas de 3ª generación.

<b>BOTANA CONTROL</b>								
Tratamiento	Variables independientes		Variables dependientes					
	$X_1$	$X_2$	IE	DA(Kg/m <sup>3</sup> )	IAA	ISA(%)	FP(N)	L
1	85.00	25.00	2.46	285.64	12.083	28.400	19.070	89.593
2	130.00	25.00	2.25	580.98	8.905	40.200	26.047	90.233
3	85.00	35.00	1.62	556.57	11.608	16.600	20.483	90.057
4	130.00	35.00	1.52	637.00	6.844	46.400	42.136	88.953
5	75.68	30.00	2.97	293.71	13.223	21.100	24.031	89.400
6	139.32	30.00	1.29	818.13	7.738	42.200	16.900	89.847
7	107.50	22.93	2.10	411.55	13.403	34.600	20.174	89.040
8	107.50	37.07	1.98	507.99	13.671	10.800	64.574	88.630
9	107.50	30.00	2.35	335.40	11.044	38.900	26.666	89.573
10	107.50	30.00	2.25	386.52	10.613	40.700	25.086	89.537
11	107.50	30.00	2.24	399.84	10.907	39.800	25.211	89.483
12	107.50	30.00	2.50	333.19	10.675	41.300	28.674	89.557
13	107.50	30.00	2.41	340.30	10.695	39.000	27.065	89.680
<b>BOTANA CON ALMIDÓN RESISTENTE OBTENIDO POR FOSFATACION</b>								
Tratamiento	Variables independientes		Variables dependientes					
	$X_1$	$X_2$	IE	DA(Kg/m <sup>3</sup> )	IAA	ISA(%)	FP(N)	L
1	85.00	25.00	3.52	212.16	7.138	63.100	8.653	90.987
2	130.00	25.00	3.26	242.55	8.582	75.800	6.515	89.380
3	85.00	35.00	2.67	335.06	6.582	21.600	11.359	91.060
4	130.00	35.00	3.50	195.33	9.393	75.300	16.714	89.830
5	75.68	30.00	2.80	340.79	10.146	16.200	9.168	91.423
6	139.32	30.00	2.26	627.33	7.600	56.700	8.136	89.743
7	107.50	22.93	4.41	182.71	11.956	51.900	9.071	90.103
8	107.50	37.07	1.81	346.91	14.023	12.600	15.273	90.853
9	107.50	30.00	1.76	531.39	10.530	34.800	5.186	90.303
10	107.50	30.00	1.80	526.12	10.469	32.600	5.526	90.250
11	107.50	30.00	1.70	536.16	10.307	36.800	5.665	90.140
12	107.50	30.00	1.73	528.33	10.700	31.900	4.990	90.100
13	107.50	30.00	1.76	533.65	10.640	31.980	5.980	90.167
<b>BOTANA CON ALMIDÓN RESISTENTE OBTENIDO POR SUCCINATACION</b>								
Tratamiento	Variables independientes		Variables dependientes					
	$X_1$	$X_2$	IE	DA(Kg/m <sup>3</sup> )	IAA	ISA(%)	FP(N)	L
1	85.00	25.00	1.92	437.67	10.713	36.100	20.049	90.421
2	130.00	25.00	2.33	340.22	12.521	41.300	11.473	91.087
3	85.00	35.00	2.80	311.90	10.093	14.700	10.719	91.453
4	130.00	35.00	4.17	173.13	13.267	41.900	6.911	90.040
5	75.68	30.00	1.77	664.14	9.049	19.100	19.500	89.907
6	139.32	30.00	2.34	490.98	12.951	59.300	11.081	89.193
7	107.50	22.93	3.72	185.36	12.831	32.900	17.841	88.890
8	107.50	37.07	3.17	218.10	10.516	21.600	12.110	90.940
9	107.50	30.00	1.44	680.92	11.138	27.500	11.567	91.007
10	107.50	30.00	1.47	738.61	11.525	28.100	10.256	90.960
11	107.50	30.00	1.07	740.63	11.167	24.800	11.365	90.943
12	107.50	30.00	1.46	703.28	11.300	28.700	11.683	90.797
13	107.50	30.00	1.29	742.13	11.090	27.680	9.986	90.730

$X_1$ = temperatura en la zona de alta presión del extrusor (°C),  $X_2$ =humedad (%)



**Tabla 16.** Coeficientes de regresión del modelo y nivel de significancia para las variables de respuesta: índice de expansión (*IE*), densidad aparente (*DA*), índice de absorción de agua (*IAA*), índice de solubilidad en agua (*ISA*), fuerza de penetración (*FP*) y luminosidad (*L*) de botanas de tercera generación.

Respuesta	Coeficientes											
	Intercepto	Lineales			Cuadráticos			Cúbicos			Interacciones	
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{111}$	$b_{222}$	$b_{112}$	$b_{122}$	$b_{12}$		
<i>IE</i>	BC	2.35	0.43**	-0.74***	-0.14**	-0.19**	-0.51***	0.35**	0.030 NS			
	FOS	1.75	0.48 NS	0.62*	0.49***	0.79***	-0.34 NS	-0.77*	0.27***			
	SUC	1.35	0.69**	1.56***	0.37***	1.06***	-0.24*	-0.88***	0.24**			
<i>DA</i>	BC	359.05	139.67***	57.92**	100.24***	52.16*	-	-	-53.73 NS			
	FOS	531.13	-155.97 NS	-20.21 NS	-55.57 NS	-165.20***	128.64*	39.13 NS	-42.53 NS			
	SUC	746.54	-60.14*	-30.82 NS	-102.97**	-290.88***	-	-	-10.33 NS			
<i>IAA</i>	BC	10.79	-1.96***	-0.27 NS	-0.69 NS	0.84 NS	-	-	-0.40 NS			
	FOS	10.53	0.082 NS	0.40 NS	-1.58*	0.48 NS	-	-	0.34 NS			
	SUC	11.24	1.11**	0.88**	-0.044 NS	0.29**	0.13 NS	-0.85***	0.34**			
<i>ISA</i>	BC	39.94	13.34**	5.61 NS	-2.71 NS	-7.19***	-2.94 NS	-7.01**	4.50*			
	FOS	33.62	15.46**	-12.20**	7.57 NS	5.47 NS	-	-	10.25 NS			
	SUC	27.36	1.99 NS	-6.40***	5.99***	0.016 NS	6.11***	1.20 NS	5.50***			
<i>FP</i>	BC	26.54	16.84***	-6.95 NS	-4.16**	6.80***	-9.68***	11.32***	3.67*			
	FOS	5.47	1.97***	4.26***	1.69***	3.45***	-1.17**	-1.03**	1.87***			
	SUC	10.97	-3.04***	-2.75***	1.45*	1.29 NS	-	-	1.19 NS			
<i>L</i>	BC	89.57	0.021 NS	-0.17 NS	0.15 NS	-0.25*	-	-	-0.44**			
	FOS	90.19	-0.65***	0.20**	0.14*	0.089 NS	-	-	0.094 NS			
	SUC	9.89	-0.22 NS	0.30 NS	-0.41 NS	-0.23 NS	-	-	-0.52 NS			

\* =  $p \leq 0.1$

\*\* =  $p \leq 0.05$

\*\*\* =  $p \leq 0.01$

NS = No es significativo

BC = Botana control

FOS= Botana con almidón resistente obtenido por fosfatación

SUCC= Botana con almidón resistente obtenido por succinización

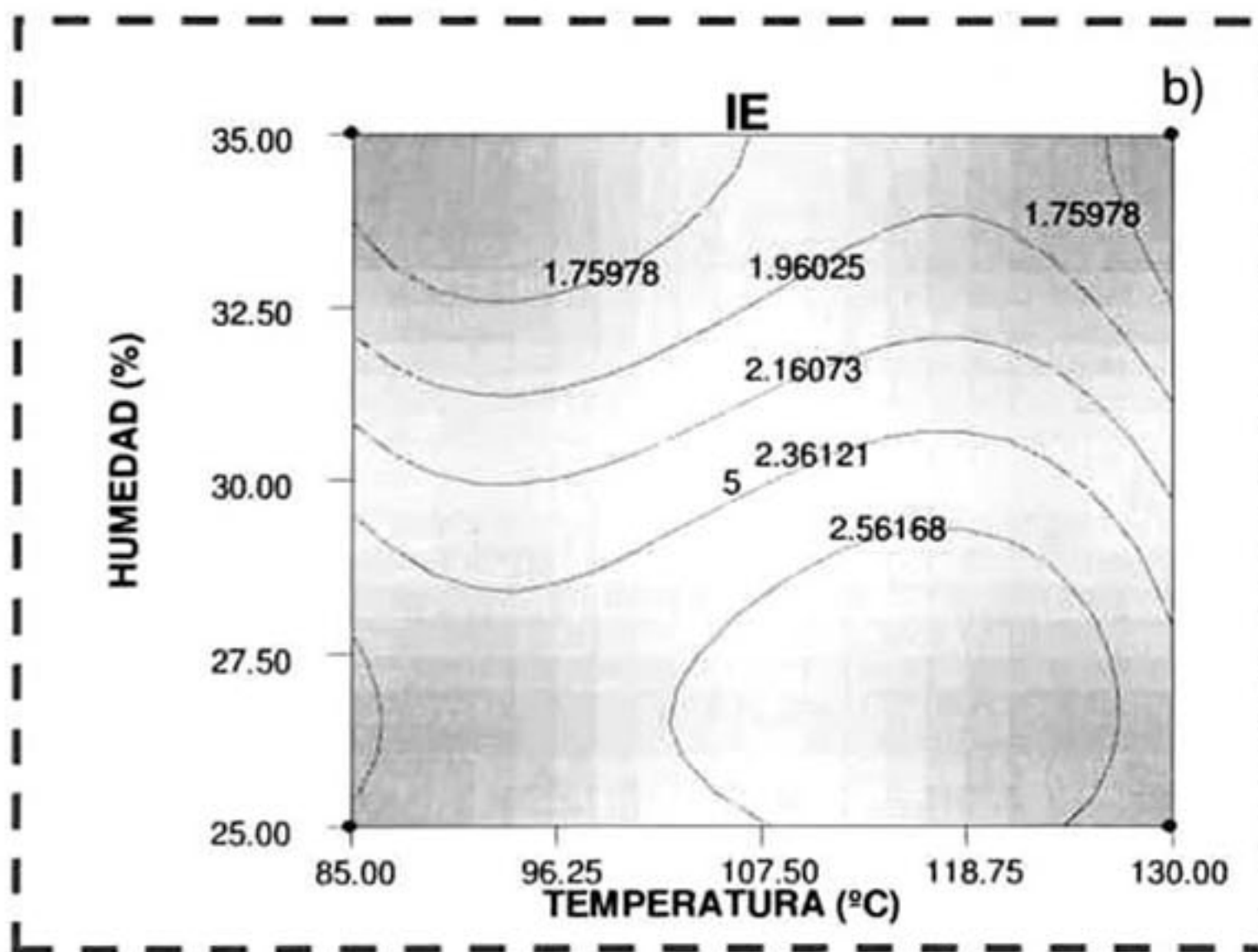
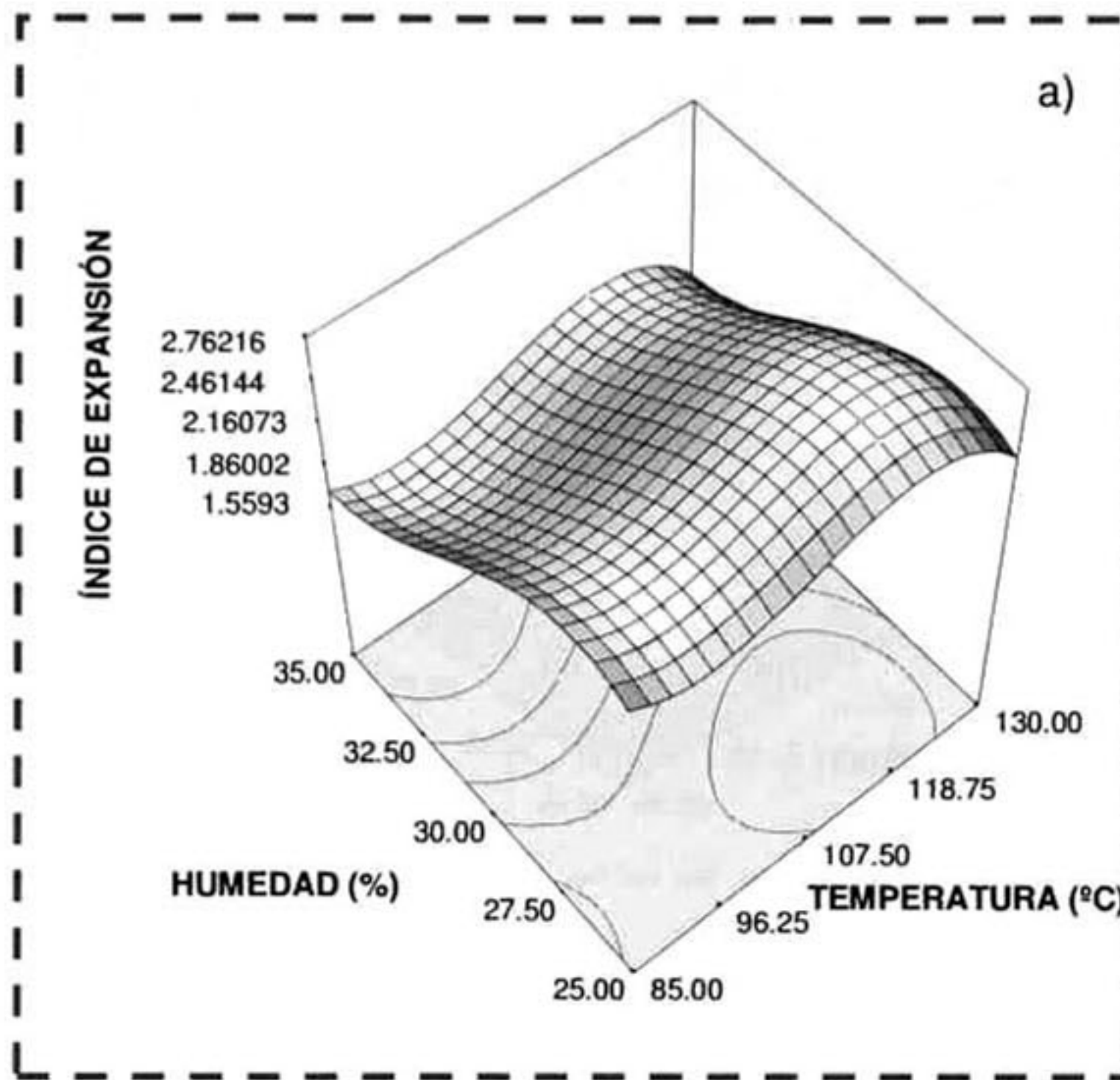
El subíndice 1 corresponde a la temperatura en la zona intermedia del cañón del extrusor y el subíndice 2 corresponde.



Para las botanas con almidón resistente obtenido por fosfatación, los coeficientes de regresión del modelo para el *IE* (Tabla 16), muestran que la temperatura sólo presentó efecto en su término cuadrático ( $b_{11}$ ) ( $p \leq 0.01$ ) y la humedad presentó efecto significativo en su forma lineal ( $b_2$ ) ( $p \leq 0.1$ ), cuadrática ( $b_{22}$ ) ( $p \leq 0.01$ ) y cúbica ( $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.1$ ). Por otro lado la interacción presentó efecto altamente significativo ( $b_{12}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). En la gráfica 26a) de superficie de respuesta se puede observar los menores valores de *IE* de obtienen para muestras procesadas con humedades  $\approx 30\%$  mientras que el procesamiento con 35% de humedad y  $130^\circ\text{C}$  favorece el incremento del *IE*.

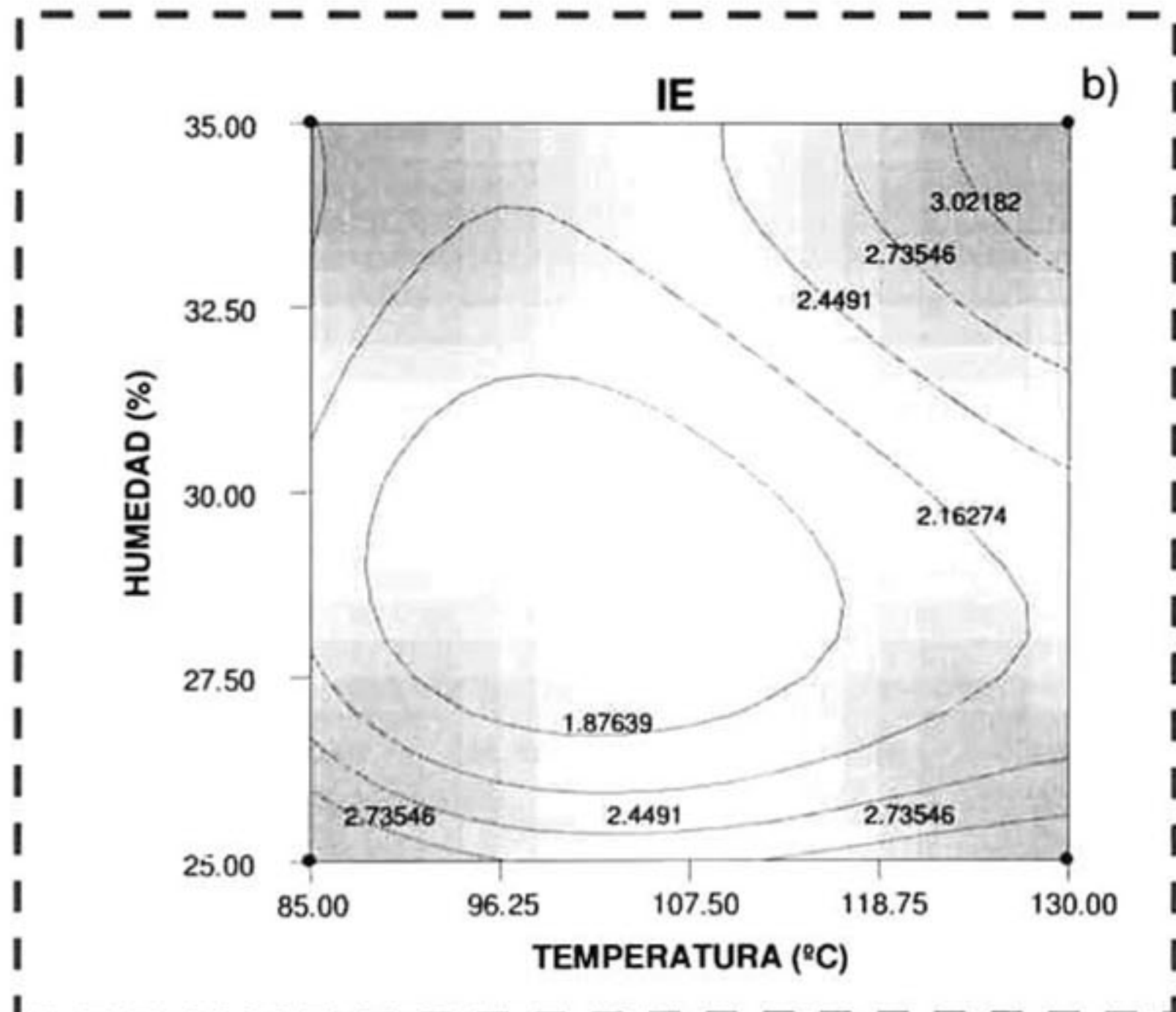
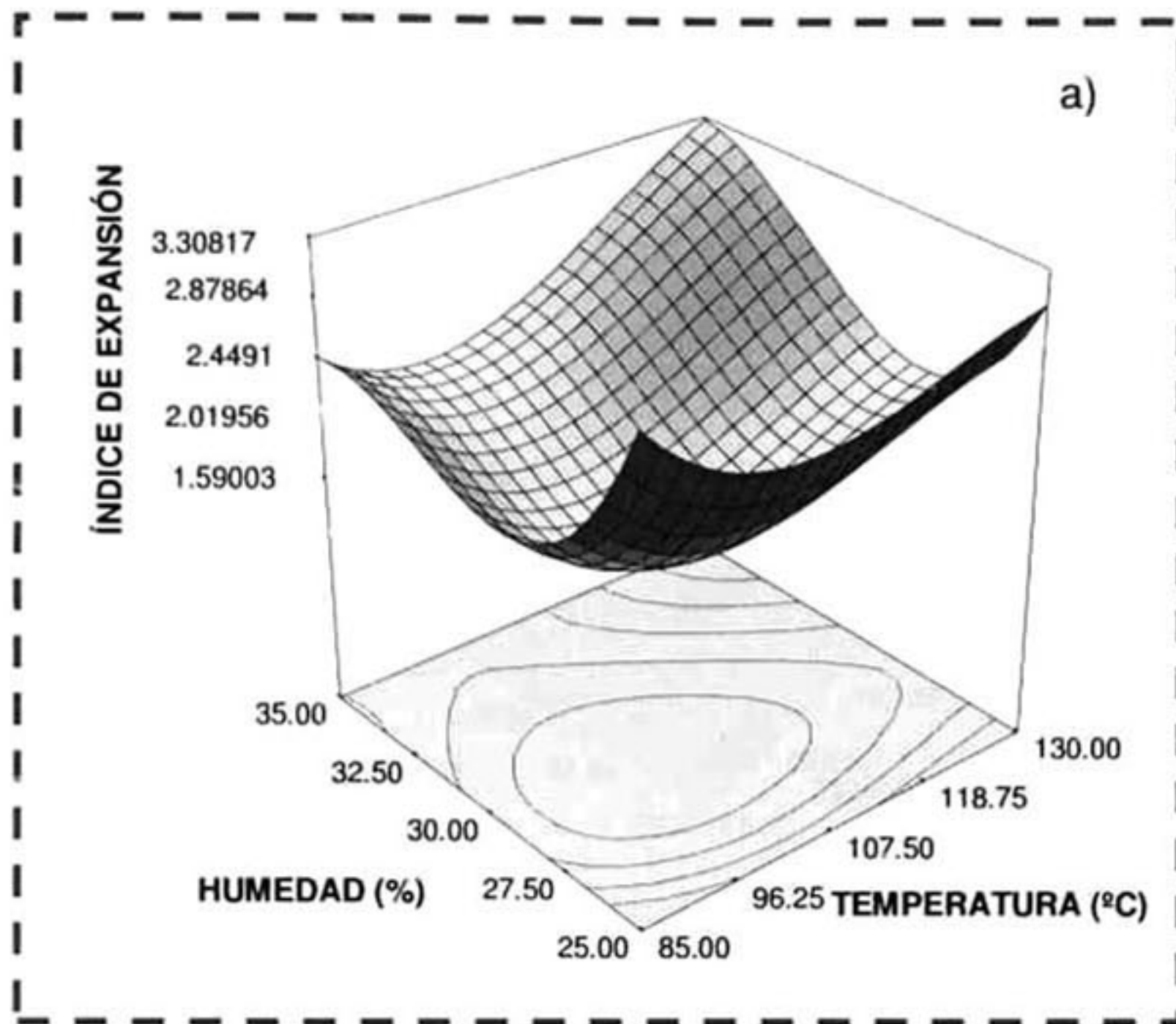
En el caso de los coeficientes de regresión del modelo para el *IE* de las botanas con almidón resistente obtenido por succinatación (Tabla 16), muestran que la temperatura presentó efecto significativo en sus términos lineal ( $b_1$ ) ( $p \leq 0.05$ ), cuadrático ( $b_{22}$ ) ( $p \leq 0.01$ ) y cúbico ( $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.1$ ), mientras que la humedad presentó un efecto altamente significativo en su forma lineal ( $b_2$ ), cuadrática ( $b_{22}$ ) y cúbica ( $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). El coeficiente de regresión  $b_{12}$  muestra que la interacción entre la temperatura y el contenido de humedad tiene un efecto significativo. Además, al procesar muestra a 35% de humedad y a  $130^\circ\text{C}$  en la zona intermedia del cañón del extrusor el *IE* se incrementa de manera significativa como se muestra en la gráfica 27a) de superficie de respuesta. Los resultados obtenidos pueden ser comparados con los resultados reportados por Bastos y col., (2007). Estos autores encontraron *IE* altos (5.8) al procesar muestras de harina de papa con concentraciones altas de almidón de maíz (40%) y temperatura de extrusión bajas ( $90^\circ\text{C}$ ), mientras que, el *IE* más bajo (4.1) se produjo con concentraciones bajas de almidón de maíz (0-10%) y altas temperaturas de extrusión ( $130^\circ\text{C}$ ). El efecto de la humedad en la expansión puede estar relacionado con las propiedades mecánicas de la matriz: un pellet se expande más fácil si su resistencia mecánica es baja, como es el caso con alto contenido de humedad. Con altas humedades la matriz de máxima expansión se destruye ya que no tienen suficiente resistencia mecánica para soportar la presión del vapor sobrecalentado (Chen y Yeh 2000).





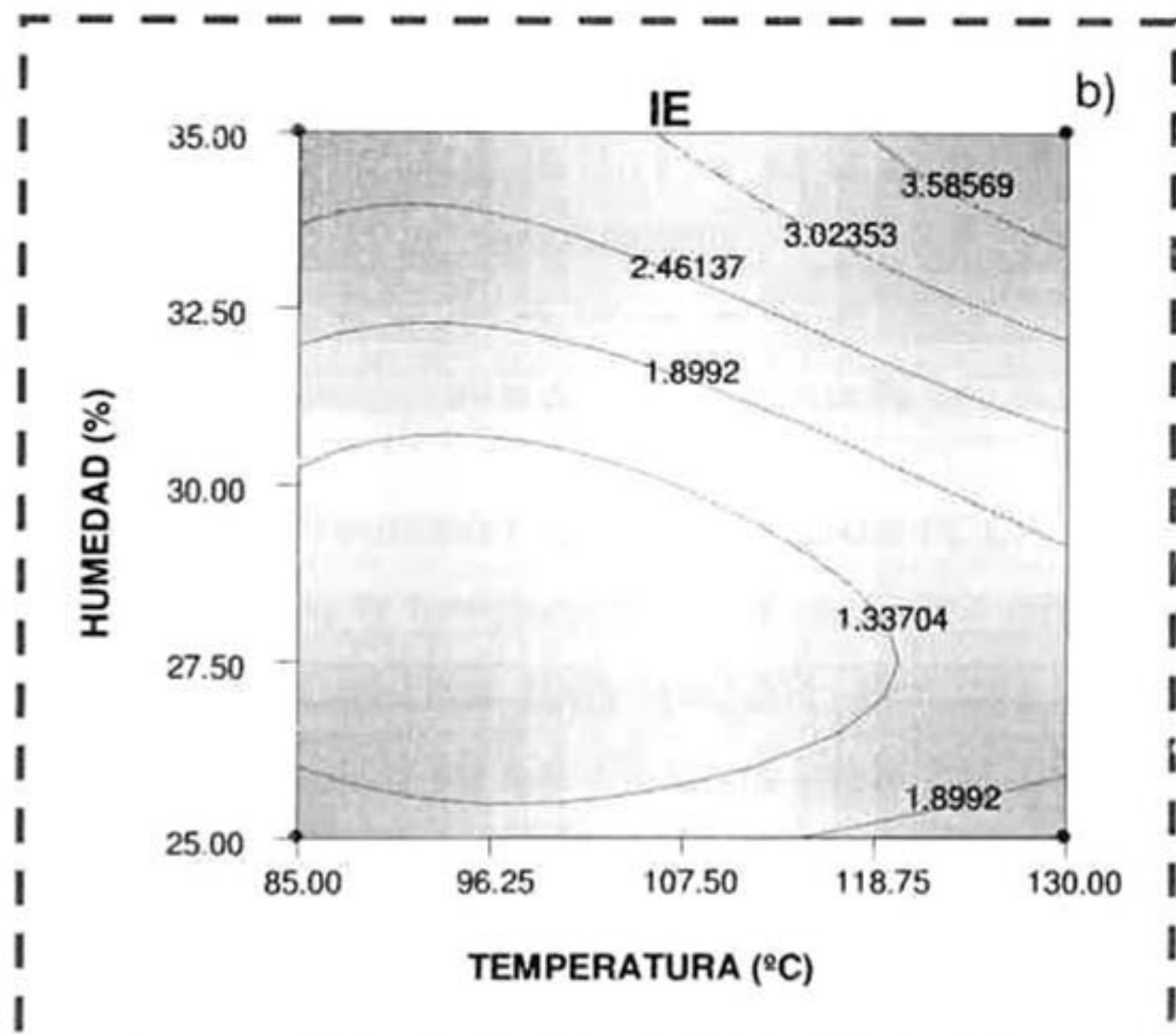
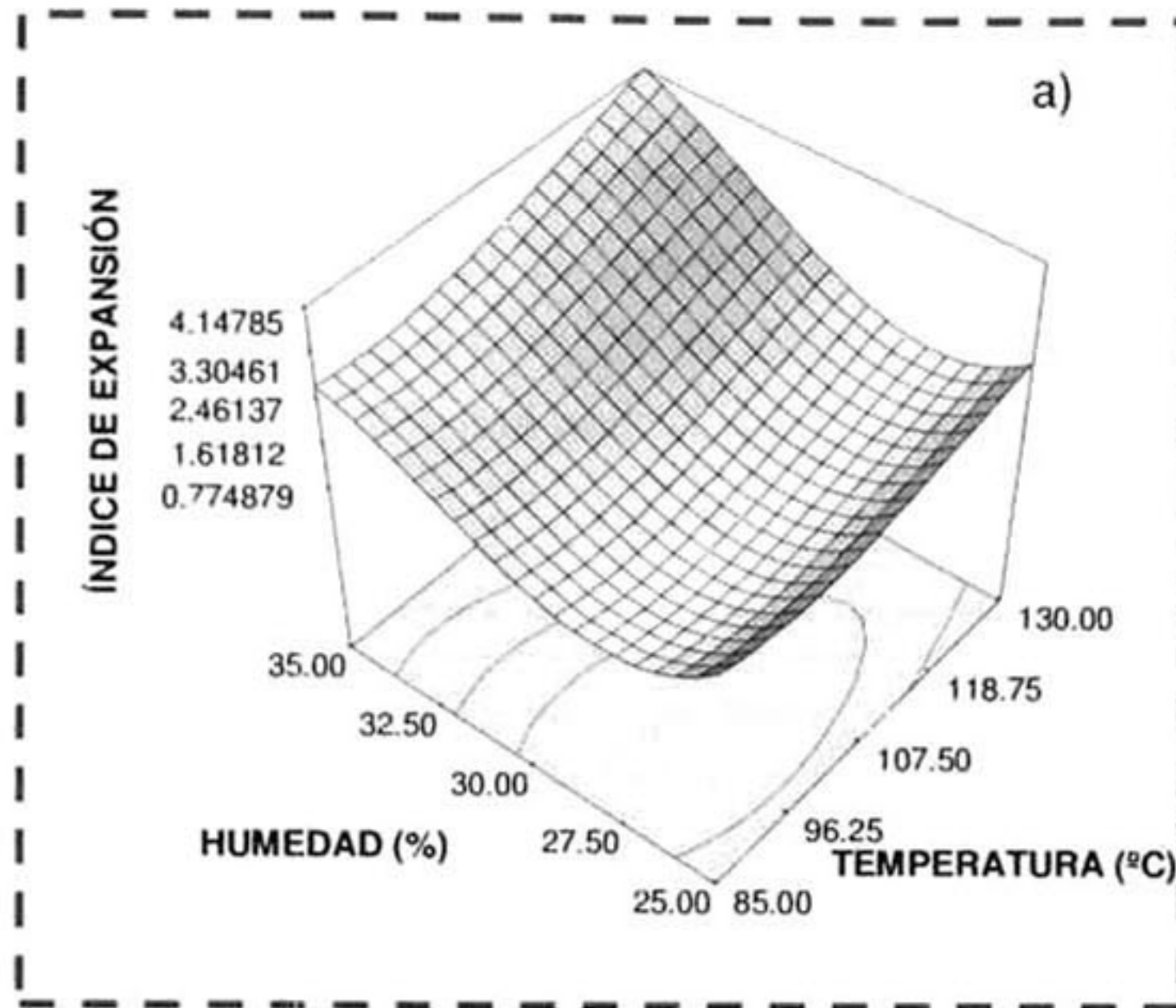
**Gráfica 25.** Efecto de la humedad y de la temperatura sobre el índice de expansión de botana control de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.





**Gráfica 26.** Efecto de la humedad y de la temperatura sobre el índice de expansión de botana con almidón fosfatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.



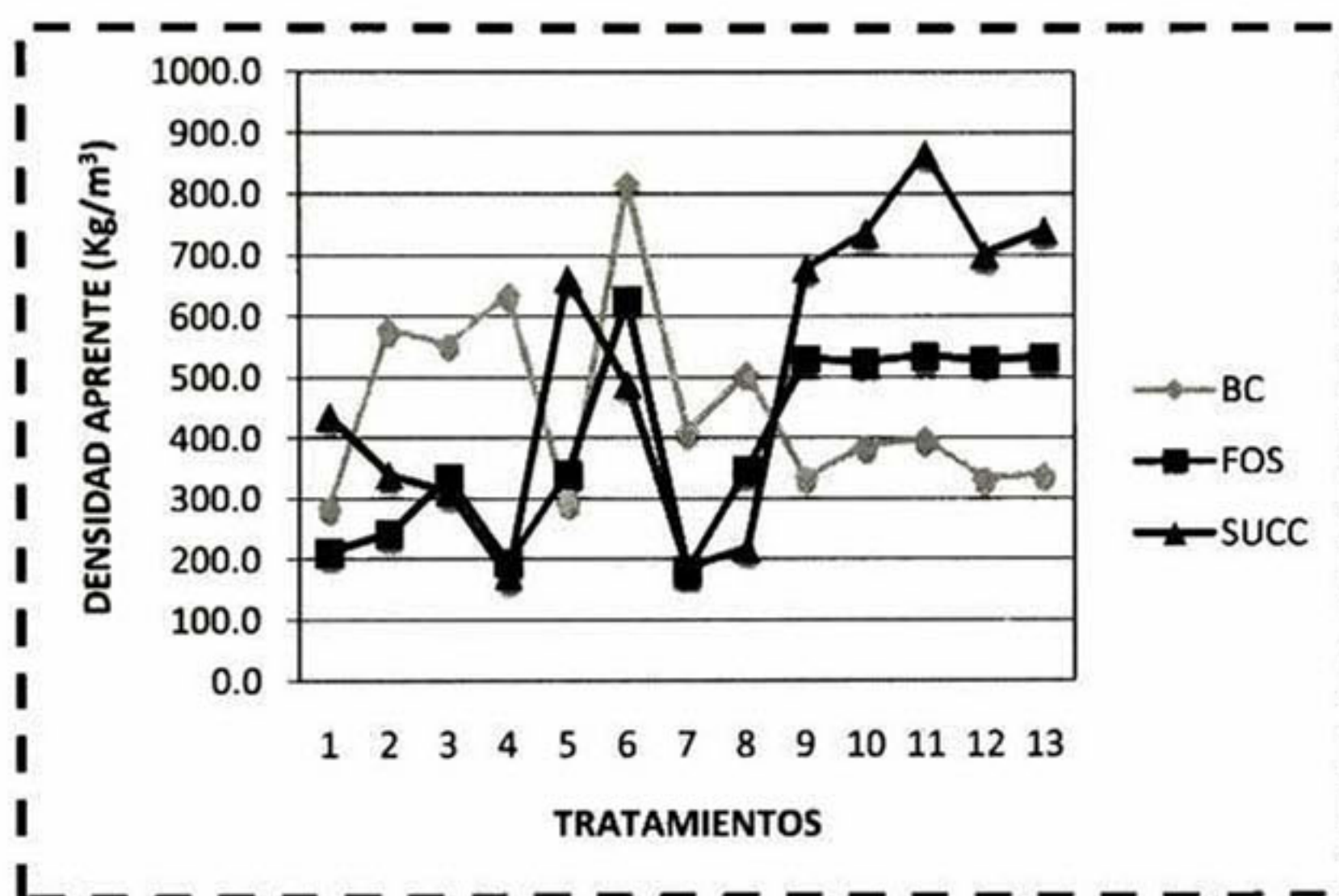


Gráfica 27. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre el índice de expansión de botana con almidón succinatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.



### 6.2.1.2 Densidad aparente (*DA*)

En general, las densidades más bajas se encontraron en las muestras que presentaron los valores más altos de expansión. En la gráfica 28 se puede observar que los menores valores de *DA* se obtuvieron para las botanas con almidón fosfatado y para las botanas control, las cuales presentaron los *IE* más altos.



Gráfica 28. Valores comparativos de *DA* de botanas de tercera generación.

Los coeficientes de regresión del modelo para la *DA* (Tabla 16) para la botana control muestran que la temperatura tuvo un efecto altamente significativo en su forma lineal ( $b_1$ ), cuadrática ( $b_{11}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). Por otra parte, la humedad también tuvo efecto significativo en sus términos lineal ( $b_2$ ) ( $p \leq 0.05$ ) y cuadrático ( $b_{22}$ ) ( $p \leq 0.1$ ). Los valores para la *DA* para la botana control se encontraron en un rango de 486.35 a 564.71  $\text{Kg/m}^3$  (Tabla 15).

Los tratamientos que presentaron valores mayores de *DA* son el  $T_4$  y  $T_6$ , los cuales fueron procesados con humedad de 30 y 35% y temperatura en la zona de transición de  $<130^\circ\text{C}$ . Las interacciones entre las variables estudiadas no tuvieron efecto significativo. El modelo de predicción utilizado explicó el 91.56% de la



variación total para los valores de *DA*. El gráfico de superficie de respuesta (Gráfica 29a) muestra que a mayor Temperatura (130°C) la densidad aparente aumenta y a bajas humedades (25%) la densidad aparente disminuye.

Los resultado para *DA* de las botanas con almidón fosfatado variaron de 306.19 a 479.00 Kg/m<sup>3</sup> (Tabla 15). Los tratamientos que presentaron valores mayores de *DA* fueron procesados con temperatura de 107.5°C y humedad de 30%. Para las botanas con almidón resistente obtenido por fosfatación, los coeficientes de regresión del modelo para el *DA* (Tabla 16), muestran que la temperatura únicamente presentó efecto significativo en su término cúbico ( $b_{111}$ ) ( $p \leq 0.1$ ). La humedad presentó efecto altamente significativo en su término cuadrático ( $b_{22}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). Por otro lado, ninguno de los términos de interacción fue significativo. El modelo de predicción utilizado explicó el 88.92% de la variación total para los valores de *DA*. El gráfico de superficie de respuesta (Gráfica 30a) muestra que a mayores humedades (35%) la densidad aparente disminuyó.

Para las botanas con almidón succinatado se registraron valores de 173.13 a 738.61 Kg/m<sup>3</sup> (Tabla 15). Los tratamientos que presentaron mayores valores de *DA* fueron los procesados con temperatura de 107.5°C y humedad de 30%. Los coeficientes de regresión del modelo para el *DA* de las botanas con almidón resistente obtenido por succinatación (Tabla 16), muestran que la temperatura presentó efecto significativo en su término lineal ( $b_1$ ) ( $p \leq 0.1$ ) y cuadrática ( $b_{11}$ ) ( $p \leq 0.05$ ) mientras que la humedad tuvo efecto significativo en su términos cuadrático ( $b_{22}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). Las interacciones entre las variables estudiadas no tuvieron efecto significativo. El modelo de predicción utilizado explicó el 91.56% de la variación total para los valores de *DA*. El gráfico de superficie de respuesta (Gráfica 31a) muestra que la densidad aparente aumenta a Temperatura  $\approx 90^\circ\text{C}$ .

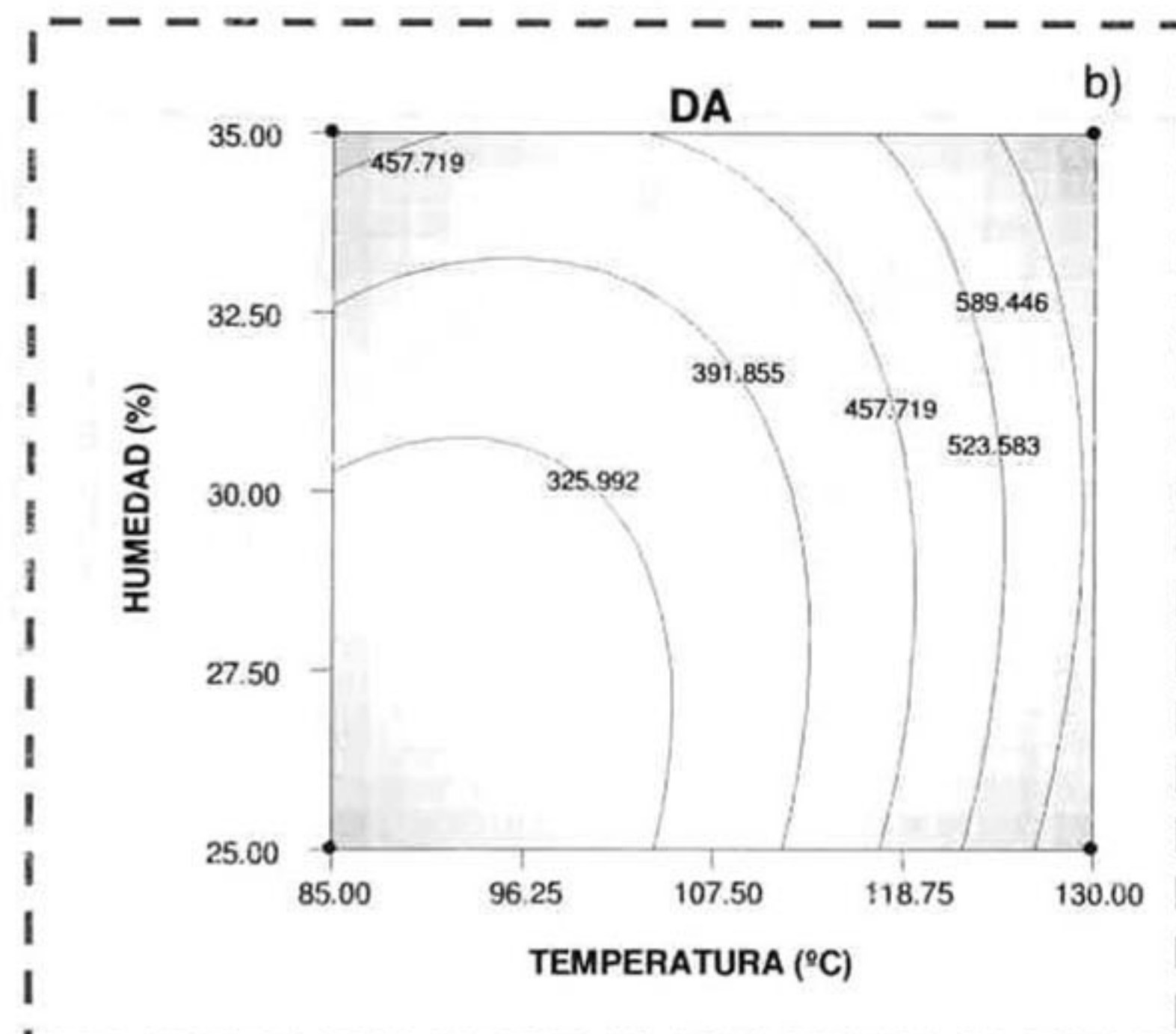
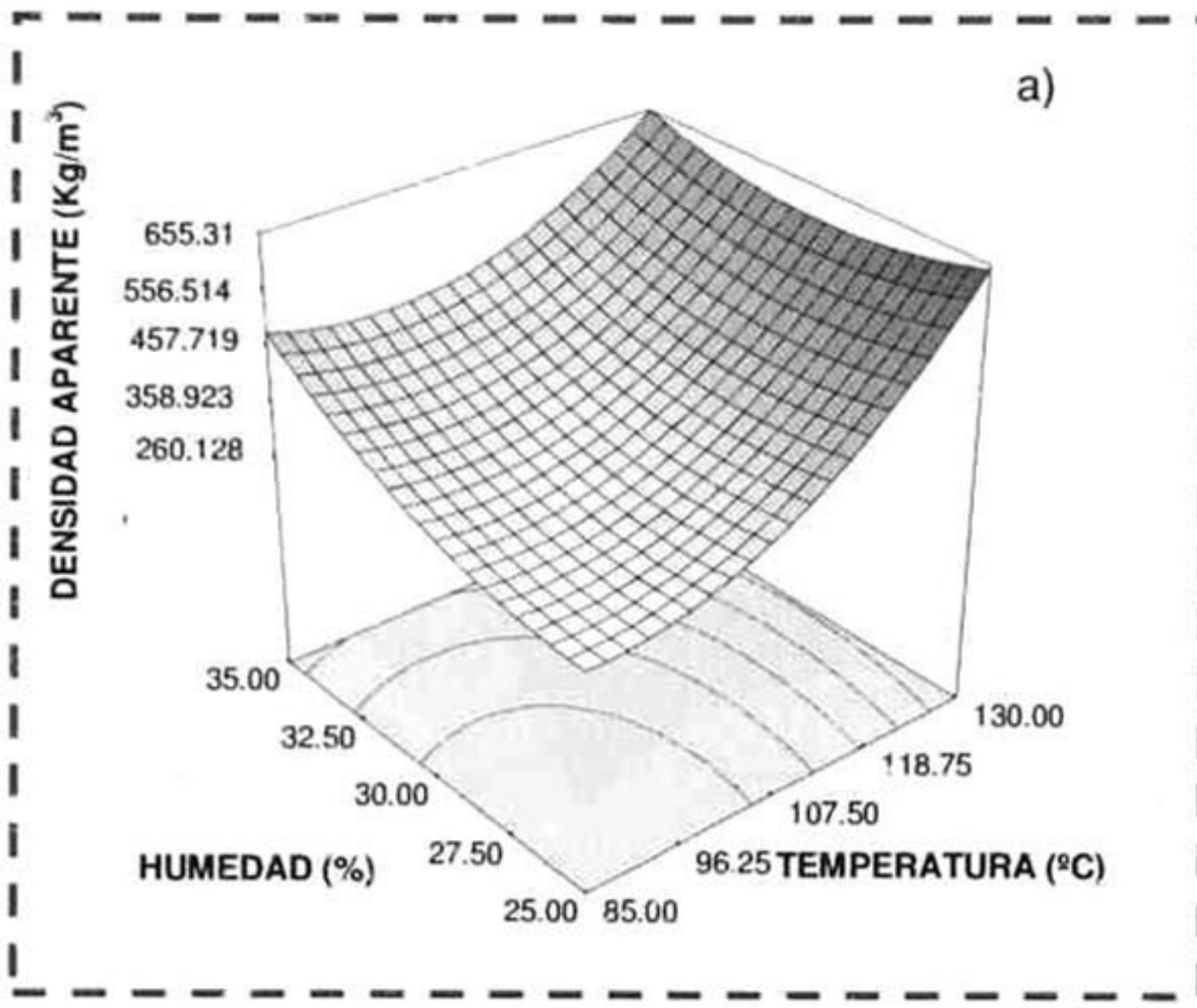


De acuerdo con Ascheri y col., (1995) la densidad aparente de encuentra inversamente relacionada con el grado de expansión y consecuentemente con el grado de gelatinización de los productos de tercera generación. Es decir los menores valores de densidad aparente corresponden a los valores de índice de expansión.

Delgado y col., (2011) elaboraron botanas de tercera generación enriquecidas con harina de calabaza y maíz amarillo y reportaron valores de densidad aparente de 140-560 Kg/m<sup>3</sup>. Esto está de acuerdo con los resultados de Moraru y Kokini (2003) quienes informaron que la expansión de productos de extrusión es un fenómeno complejo que por lo general se produce a temperaturas altas y humedades de alimentación bajas, esto se debe a acontecimientos tales como las transformaciones estructurales de los biopolímeros, las transiciones y las transformaciones de fases que conducen a la formación de células de aire.

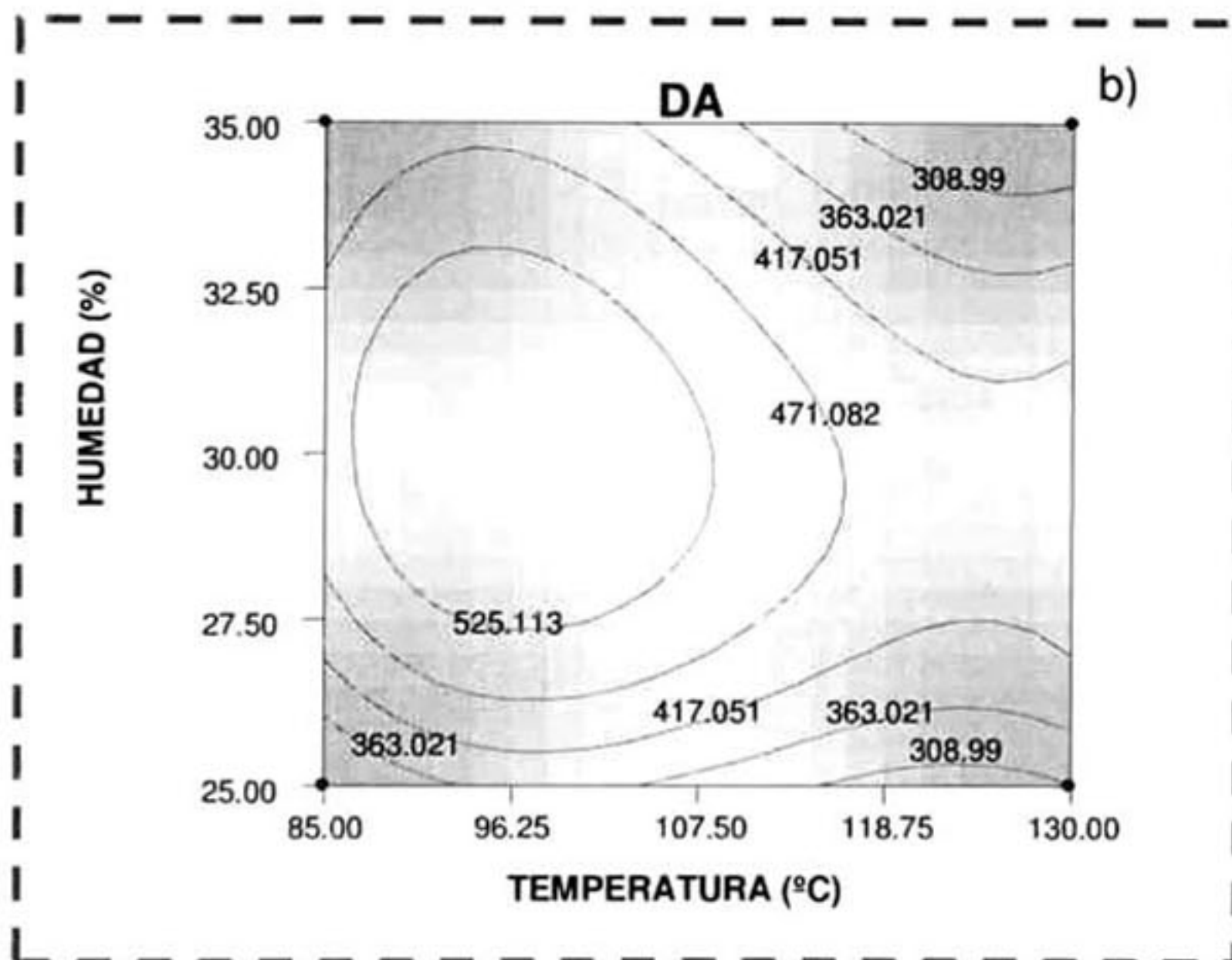
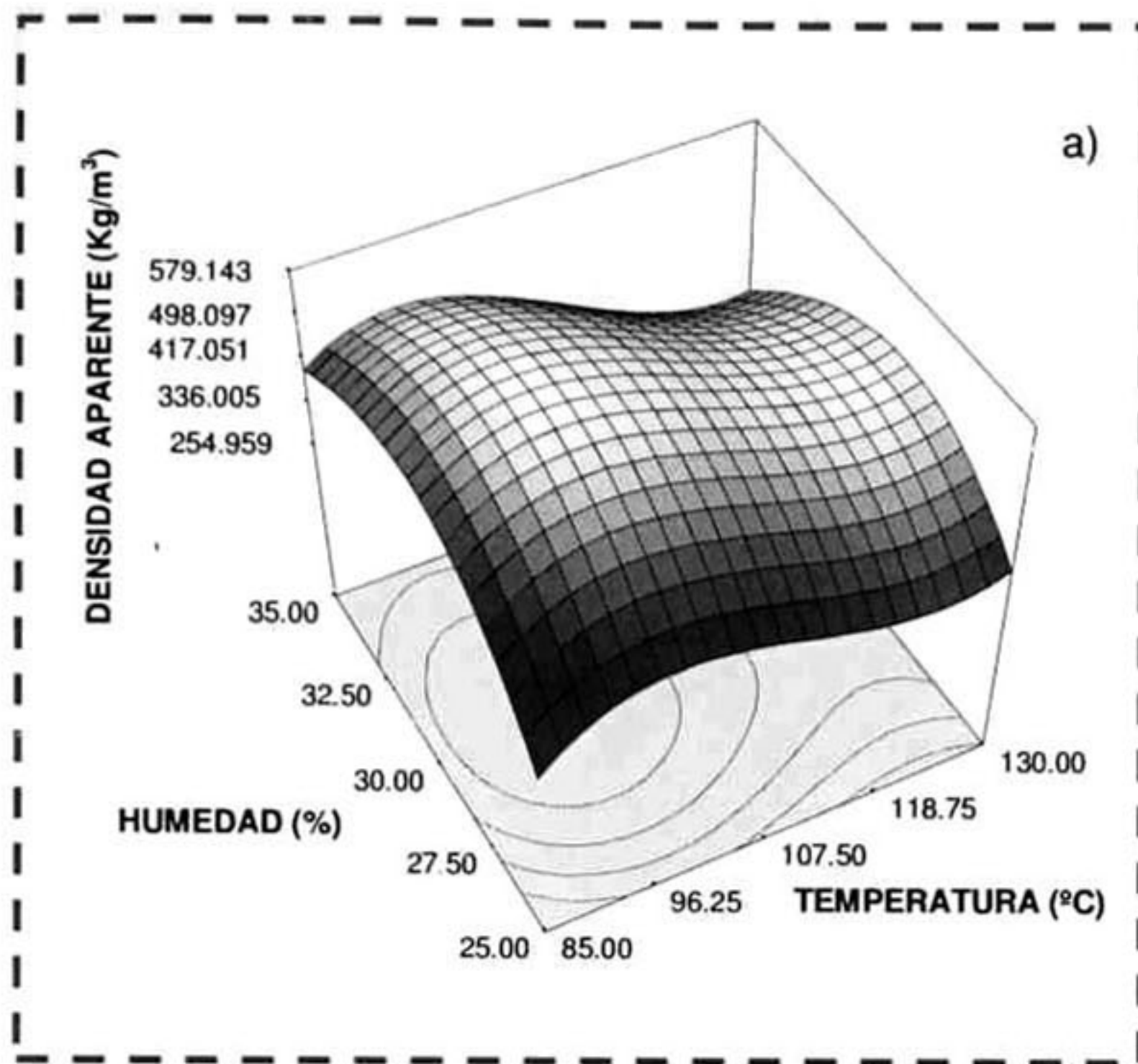
Resultados similares a los reportados en el presente trabajo fueron los obtenidos por Aguilar y col., (2006) quienes desarrollaron botanas de tercera generación con alta calidad protéica obteniendo densidades aparentes de 57 a 371 Kg/m<sup>3</sup>, el valor mas alto de expansión se produjo a temperatura barril cerca de más alto (128°C) y humedad del alimento estudiado (28%). Además, el efecto de la interacción entre la humedad y la temperatura de extrusión mostró que el *IE* disminuyó y *BD* aumentó en las temperaturas barril bajas y humedades de alimentación altas, Estos autores atribuyeron los altos valores de *IE* y los valores más bajos de *BD* a la creciente de la temperatura del barril, aunque el efecto de la humedad de alimentación no fue significativa, Del mismo modo, Lee y col., (2000) informaron que la menor densidad de pellets expandidos a partir de almidón de maíz, se produjo con una temperatura del extrusión de 90°C,





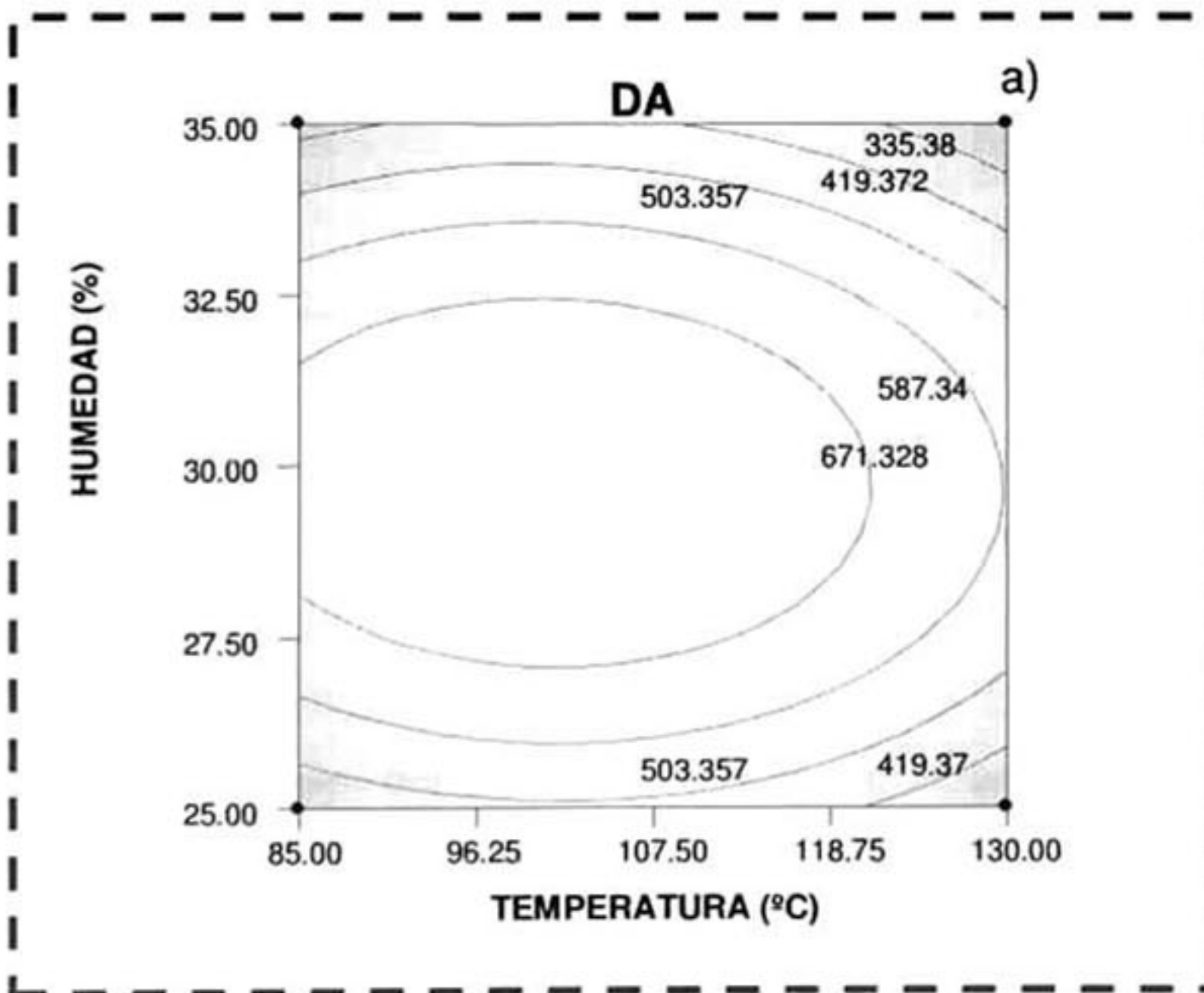
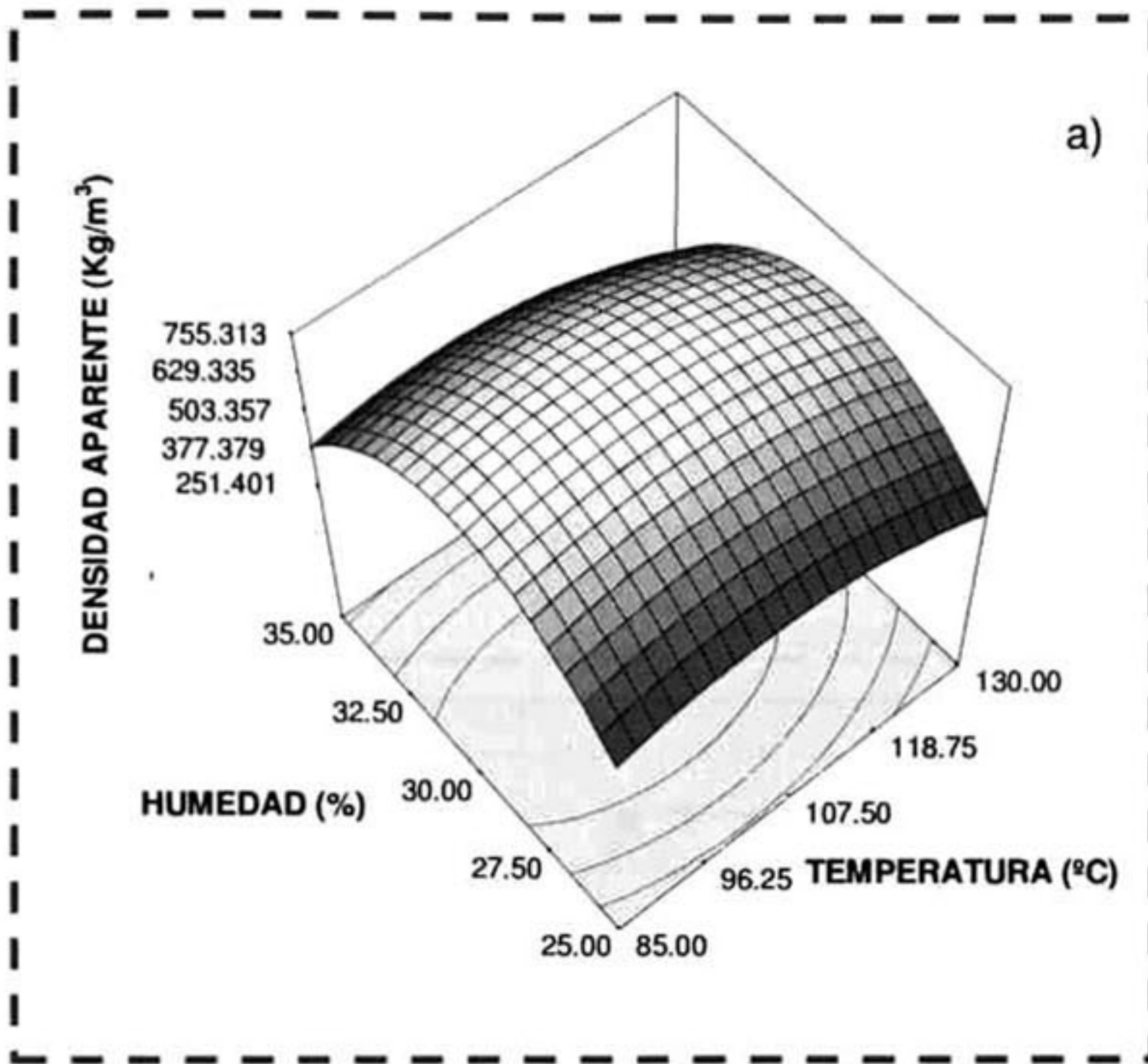
Gráfica 29. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre la densidad aparente de botanas control de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.





**Gráfica 30.** Efecto de la humedad y de la temperatura sobre la densidad aparente de botanas con almidón fosfatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.



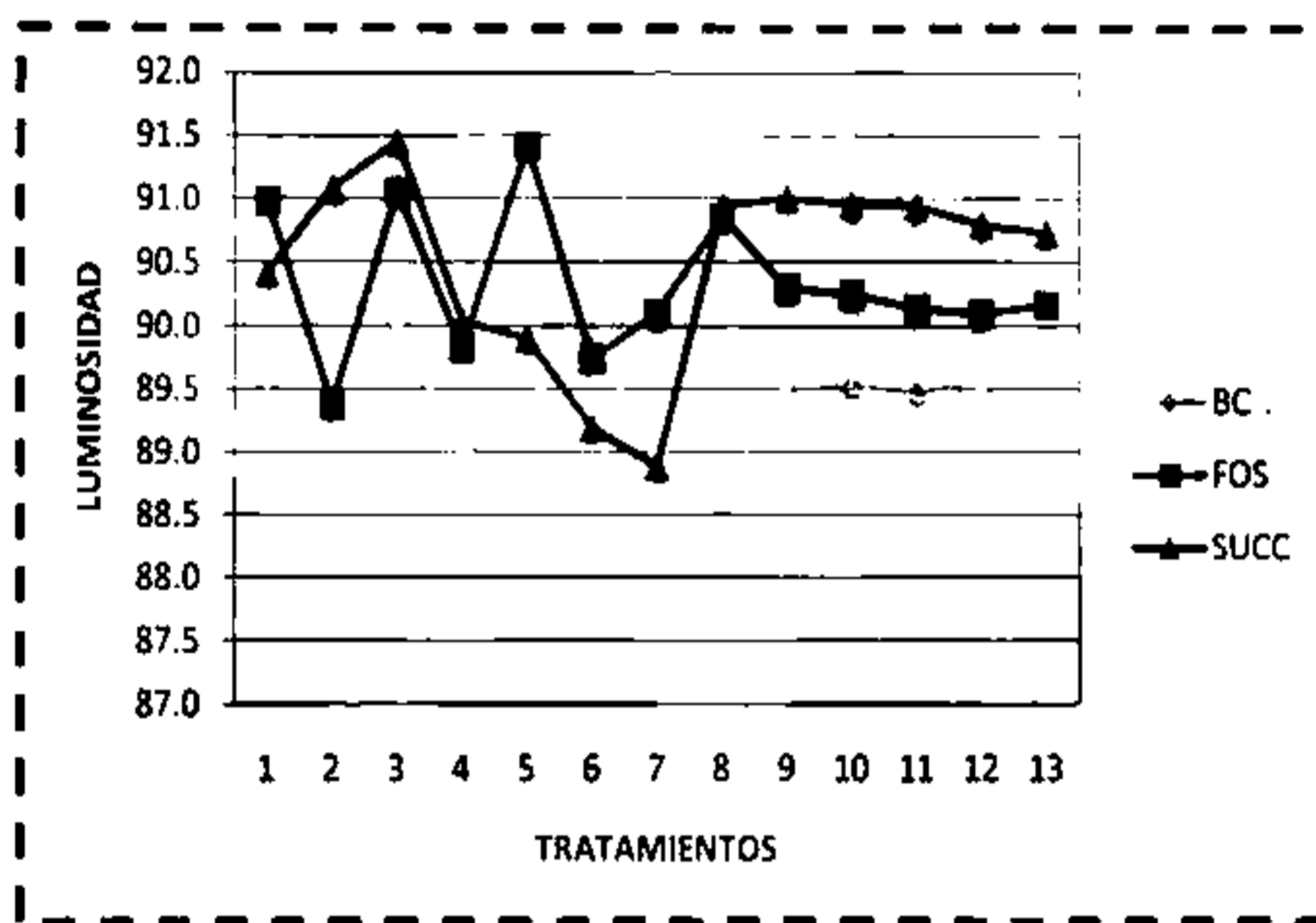


**Gráfica 31.** Efecto de la humedad y de la temperatura sobre la densidad aparente de botanas con almidón succinatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.



### 6.2.1.3 Luminosidad (L)

Las botanas control de tercera generación conteniendo *AR* obtenido por fosfatación mostraron valores de luminosidad (L) de 89.040 a 90.233. Este parámetro varió de 89.380 a 90.987 y para las botanas con *AR* obtenido por succinatación se encuentran en el rango de 88.890 a 91.453 (Tabla 15) (Gráfica 32). Los valores más bajos de L pertenecen a las botanas control y las botanas con almidón succinatado mostraron mayores valores de L.



Gráfica 32. Valores comparativos de L de botanas de tercera generación.

El cambio de color de las botanas extruidas de tercera generación (3G) está representado principalmente por las reacciones de Maillard. Las reacciones que en realidad podrían afectar el color son conocidas porque promueven la condensación de grupos amino con azúcares reductores (reacción de Maillard), producido por la hidrólisis del almidón, lo que conduce a la formación de compuestos coloreados y una disminución de lisina disponible. Así, los cambios en el color de los productos extruidos que contienen almidón se puede utilizar como indicadores de procesamiento de intensidad en los cambios químicos o pérdida de valor nutritivo de los alimentos (Bastos, 2000). Como en la mayoría de los alimentos, la calidad visual es muy importante en productos de extrusión.



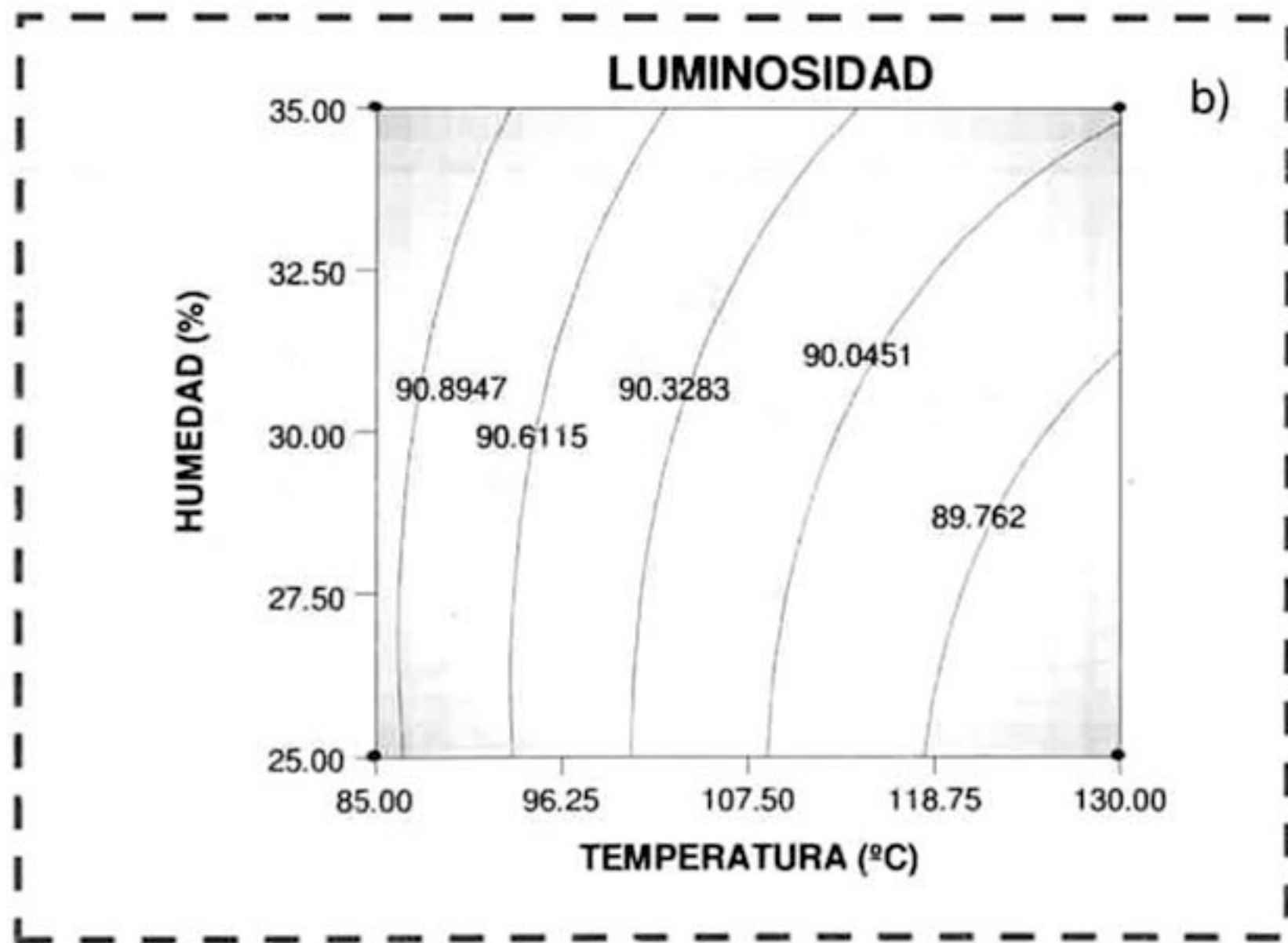
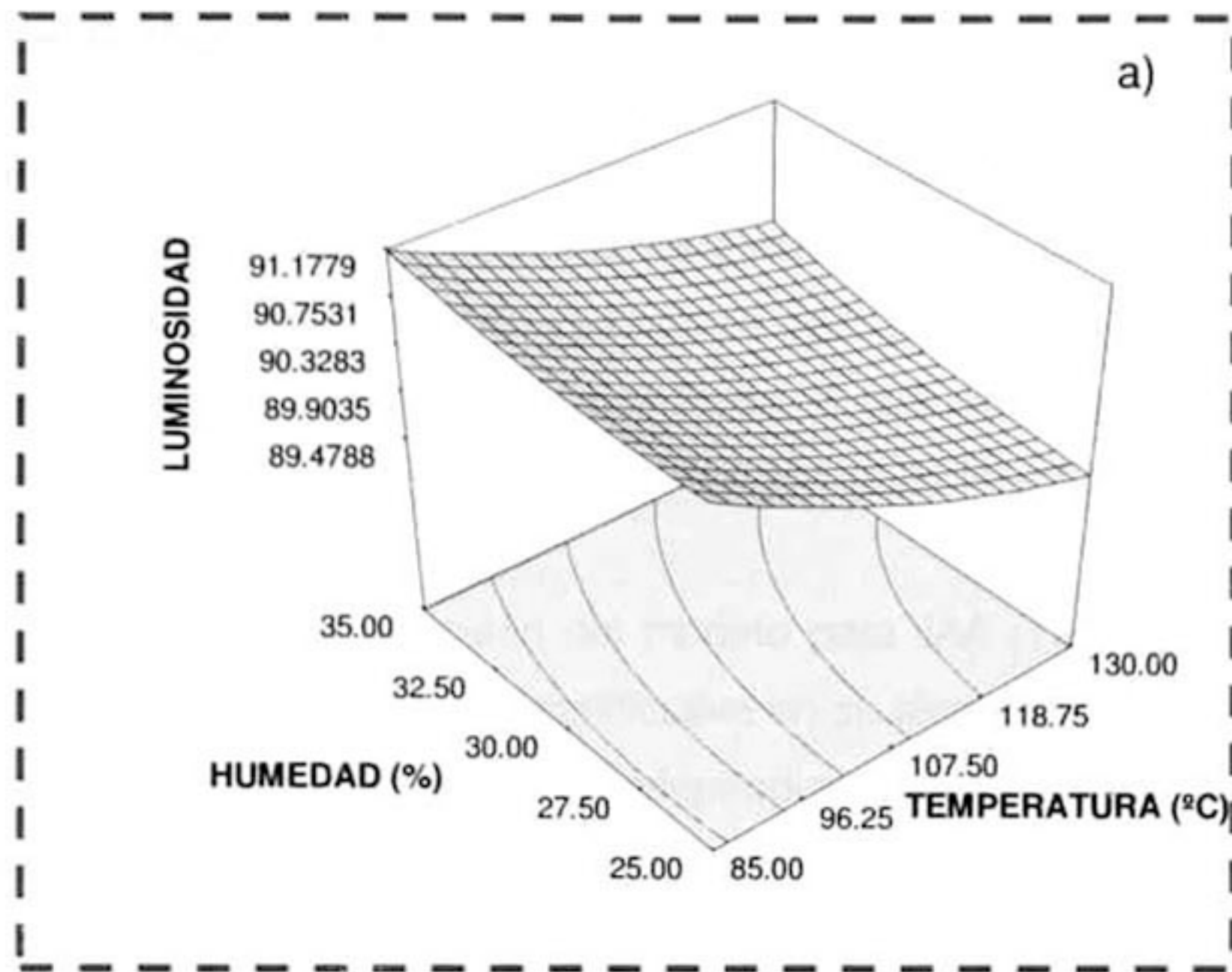
En la tabla 14 se puede observar que modelo correspondiente a las botanas con almidón fosfatado predice los valores del 95.51% de los datos para  $L$  ( $\alpha \leq 0.05$ ). Los coeficientes de regresión del modelo (Tabla 16) para la botana control, muestran que la temperatura presentó efecto significativo en sus términos lineal ( $b_1$ ) ( $p \leq 0.01$ ) y cuadrático ( $b_{11}$ ) ( $p \leq 0.1$ ). El contenido de humedad presentó efecto significativo sólo en su término lineal ( $b_2$ ) ( $p \leq 0.05$ ). Por otro lado, el término de interacción entre la temperatura de extrusión y la humedad, no presentó efecto significativo.

En la gráfica 33a) de superficie de respuesta se puede observar que el mayor valor de  $L$  se obtiene al procesar la muestra a una velocidad de tornillo de  $\approx 47.5$ Hz mientras que a altas velocidades de tornillo se obtienen valores bajos de  $L$ .

El modelo de predicción de  $L$  para las botanas control únicamente representa el 72.19% de los datos para  $\alpha = 0.06212$ . Por otro lado las botanas con almidón resistente obtenido por succinatación representa el 55.51% de los datos obtenidos durante la caracterización para  $\alpha = 0.2484$ .

Bastos y col., (2007) encontraron valores altos de  $L$  ( $> 80$ ) para muestras procesadas por extrusión con contenidos altos de almidón de maíz en mezclas con harina de papa ( $> 30\%$ ) y humedad de 27%. La mezclas con contenidos de almidón de maíz y contenidos de humedad bajos mostraron valores de  $L = 71$ ; Sin embargo los valores obtenidos en este proyecto fueron superiores ya que solo se proceso el almidón de papa modificado y no con harina de papa.





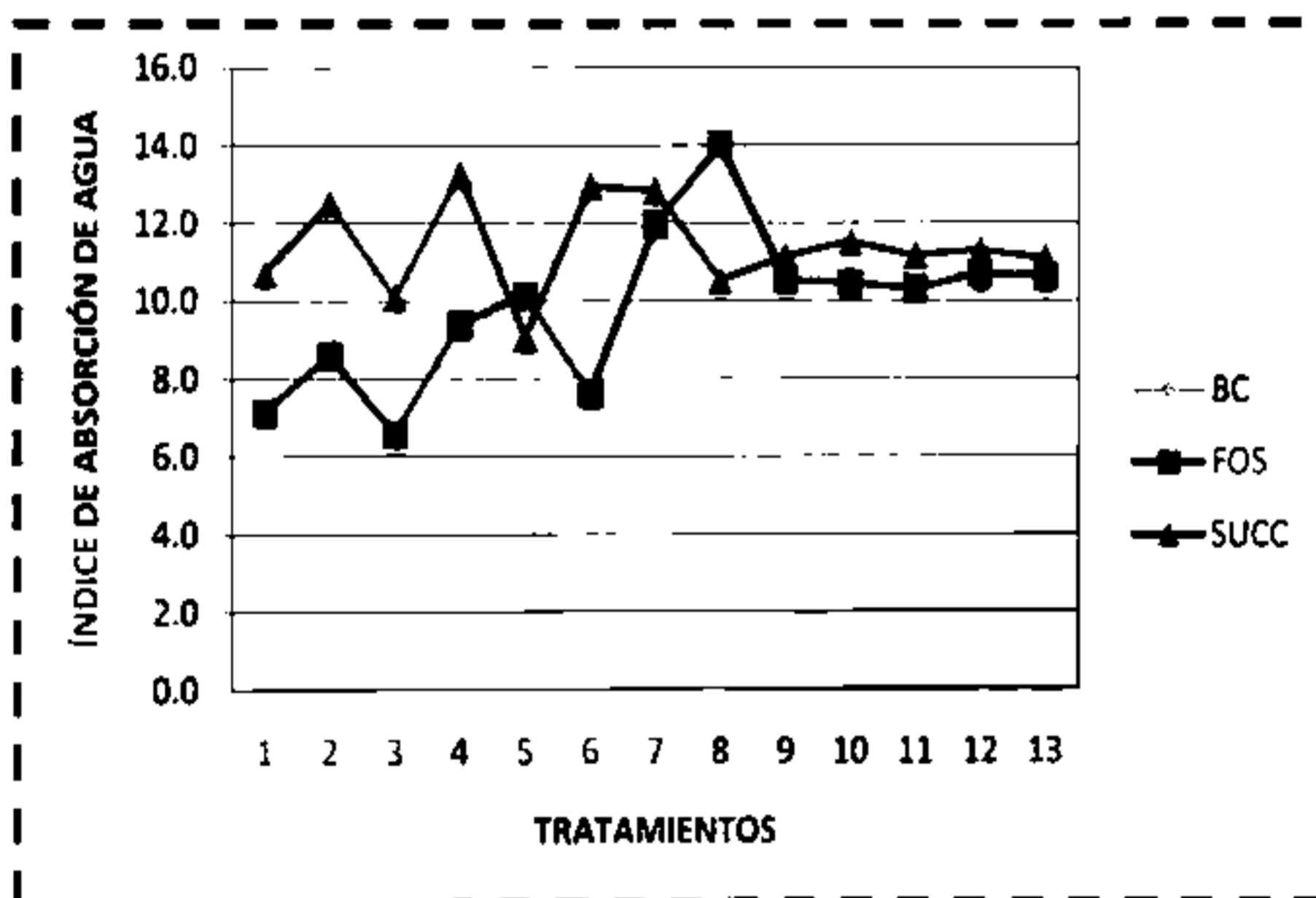
**Gráfica 33.** Efecto de la humedad y de la temperatura sobre *L* de botanas con almidón fosfatado de tercera generación. a), superficie de respuesta y b) contornos.



#### 6.2.1.4 Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA)

En la gráfica 34 se pueden observar los resultados obtenidos para el índice de absorción de agua para las tres botanas elaboradas. Se puede decir que los resultados son muy similares entre las botanas control, las botanas con almidón fosfatado y las botanas con almidón succinatado, lo que indica que el proceso de extrusión fue más determinante que la modificación química sobre el IAA.

Los coeficientes de regresión del modelo para IAA (Tabla 16), muestran que la temperatura presentó efecto significativo en su término lineal ( $b_1$ ) ( $p \leq 0.01$ ). Las interacciones entre las variables independientes no mostraron un efecto significativo sobre el IAA. En la gráfica de superficie de respuesta (Gráfica 35a), se observa el efecto de la temperatura sobre el índice de absorción de agua de las botanas con almidón fosfatado. Los valores más altos de IAA se encuentran a menores temperaturas de barril ( $85^\circ\text{C}$ ).



Gráfica 34. Valores comparativos de IAA de botanas de tercera generación.

El modelo de predicción de las botanas con almidón fosfatado, únicamente representa el 45.61% de la variación de IAA con  $\alpha=0.4077$ .

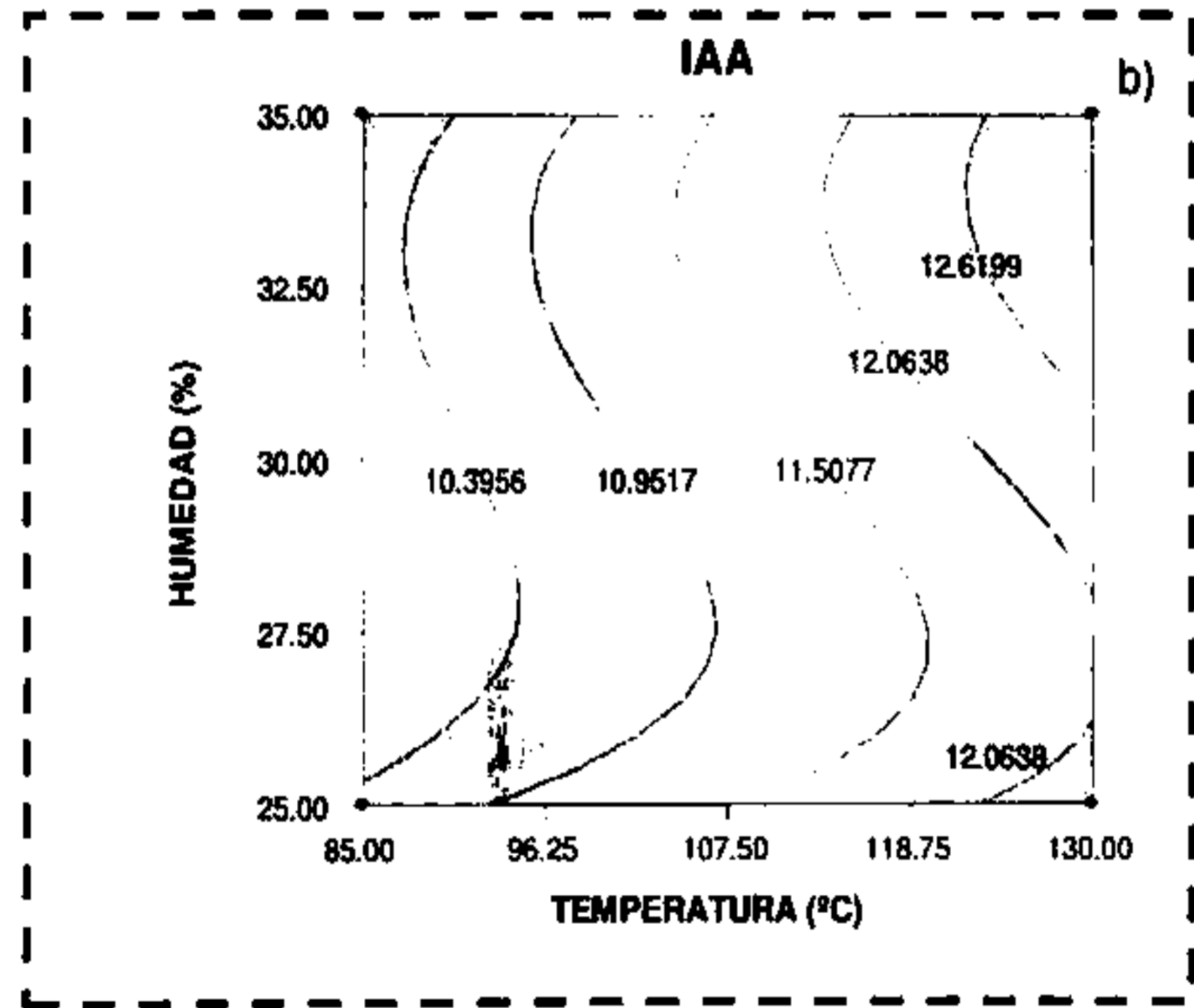
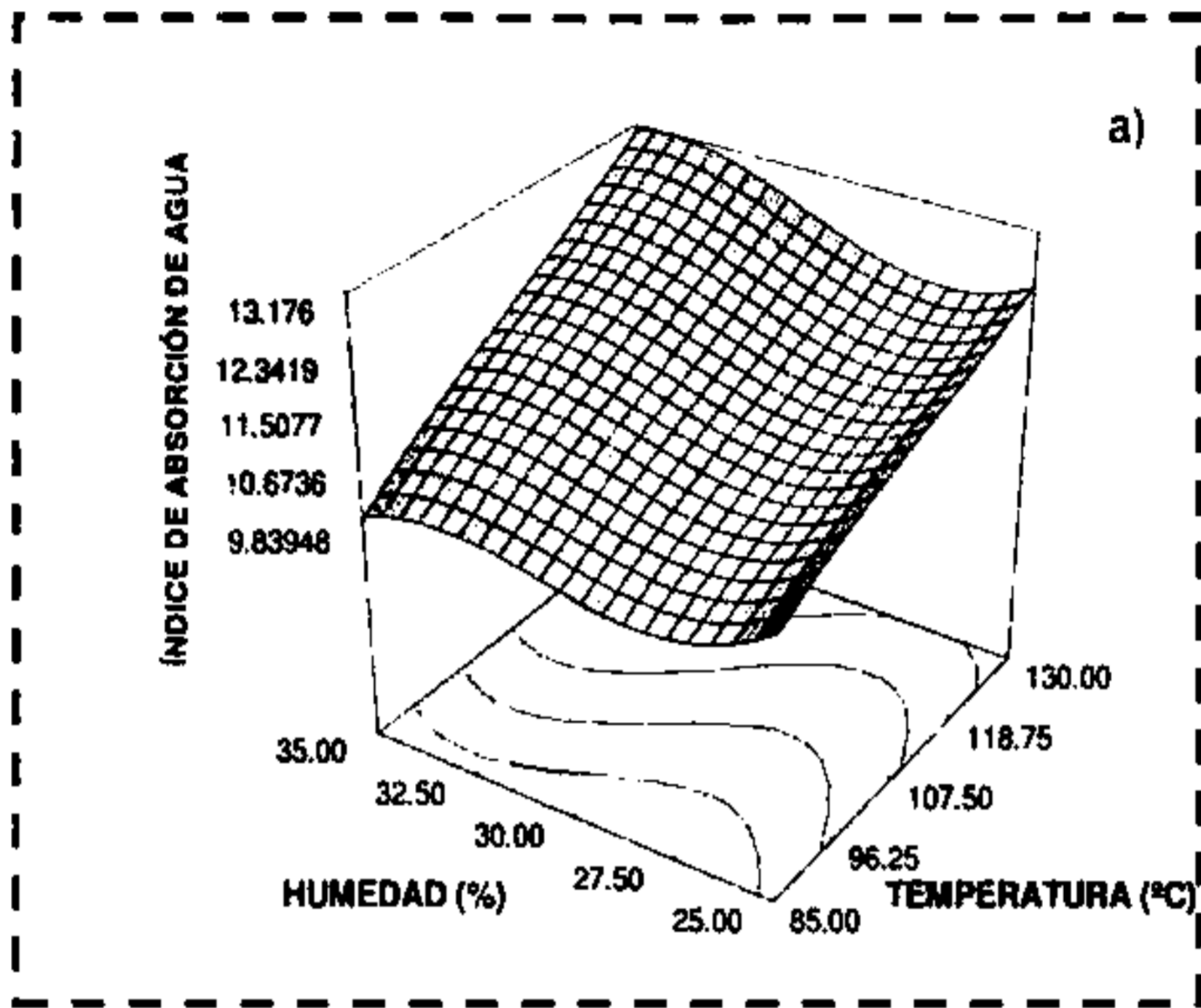


En el caso de los coeficientes de regresión del modelo para el *IAA* de las botanas con almidón resistente obtenido por succinatación (Tabla 16), muestran que la temperatura presentó efecto significativo en su término lineal ( $b_1$ ) ( $p \leq 0.05$ ), mientras que la humedad presentó efecto significativo en su forma lineal ( $b_2$ ) y cuadrática ( $b_{22}$ ) ( $p \leq 0.05$ ). Además, el término de interacción  $b_{12}$  fue significativo ( $p \leq 0.05$ ). El efecto de la temperatura y la humedad de botanas de tercera generación con almidón succinatado se muestran en la gráfica 35a) de superficie de respuesta, se observa que los valores más altos de *IAA* se encuentran temperaturas de extrusión altas, es decir próximas a 130°C.

Comparando los valores de *IAA* para el almidón nativo de papa (5.38g de agua absorbida/g muestra) se observa que aumenta notoriamente en los almidones modificados. Los efectos de la extrusión sobre la solubilidad en agua, absorción de agua y viscosidad del almidón se han estudiado por varios autores (Anderson y col., 1969; Colonna y Mercier, 1983) quienes indicaron que a bajos contenidos de humedad y altas temperaturas de extrusión incrementan la solubilidad en agua de los materiales y disminuyen las viscosidades respecto de las materias primas sin procesar o de aquellos materiales extrudidos a altas humedades y bajas temperaturas.

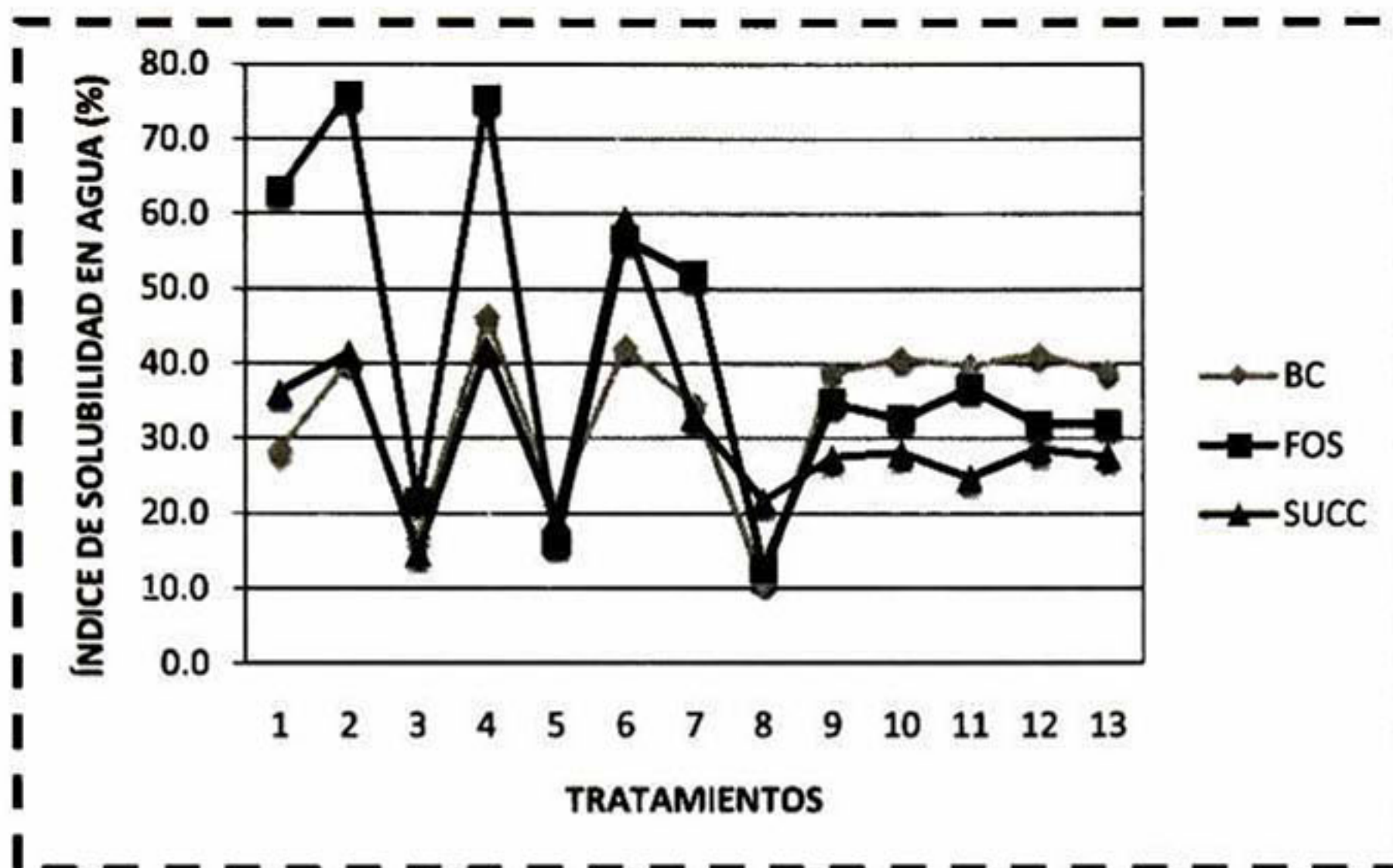
Para el *ISA* de la botana control se encontraron valores en un rango de 19.100 a 41.3% (Tabla 15) (Gráfica 36). El modelo de predicción utilizado explicó el 95.27% de la variación total para los valores de *ISA*. Los coeficientes de regresión del modelo para el *ISA* (Tabla 16), muestran que la temperatura presentó efecto significativo en su término lineal ( $b_1$ ) ( $p \leq 0.05$ ); el efecto de la humedad sólo se tiene para los coeficientes cuadrático ( $b_2$ ) ( $p \leq 0.01$ ) y cúbico ( $b_{222}$ ) ( $p \leq 0.05$ ). Por otro lado, el término de interacción  $b_{12}$  tuvo efecto significativo sobre el *ISA* ( $p \leq 0.1$ ). El modelo de predicción utilizado explicó el 95.27% de la variación total para los valores de *ISA* y presentó falta de ajuste (0.0015). La gráfica 37a de superficie de respuesta muestra que a mayores temperaturas (170°C) y velocidad de tornillo (55Hz) el *ISA* aumenta.





Gráfica 35. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre IAA de botanas con almidón succinatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.





Gráfica 36. Valores comparativos de *ISA* de botanas de tercera generación.

El parámetro de *ISA*, para las botanas con almidón fosfatado mostró valores de 16.2 a 75.8% (Tabla 15). Los coeficientes de regresión del modelo para el *ISA* (Tabla 16), muestran que únicamente la temperatura presentó efecto significativo en su término lineal ( $b_1$ ) ( $p \leq 0.05$ ). Por otro lado, ninguno de los términos de interacción fue significativo. El modelo de predicción utilizado explicó el 76.30% ( $p \leq 0.05$ ) de la variación total para los valores de *ISA* y presentó falta de ajuste (0.0004).

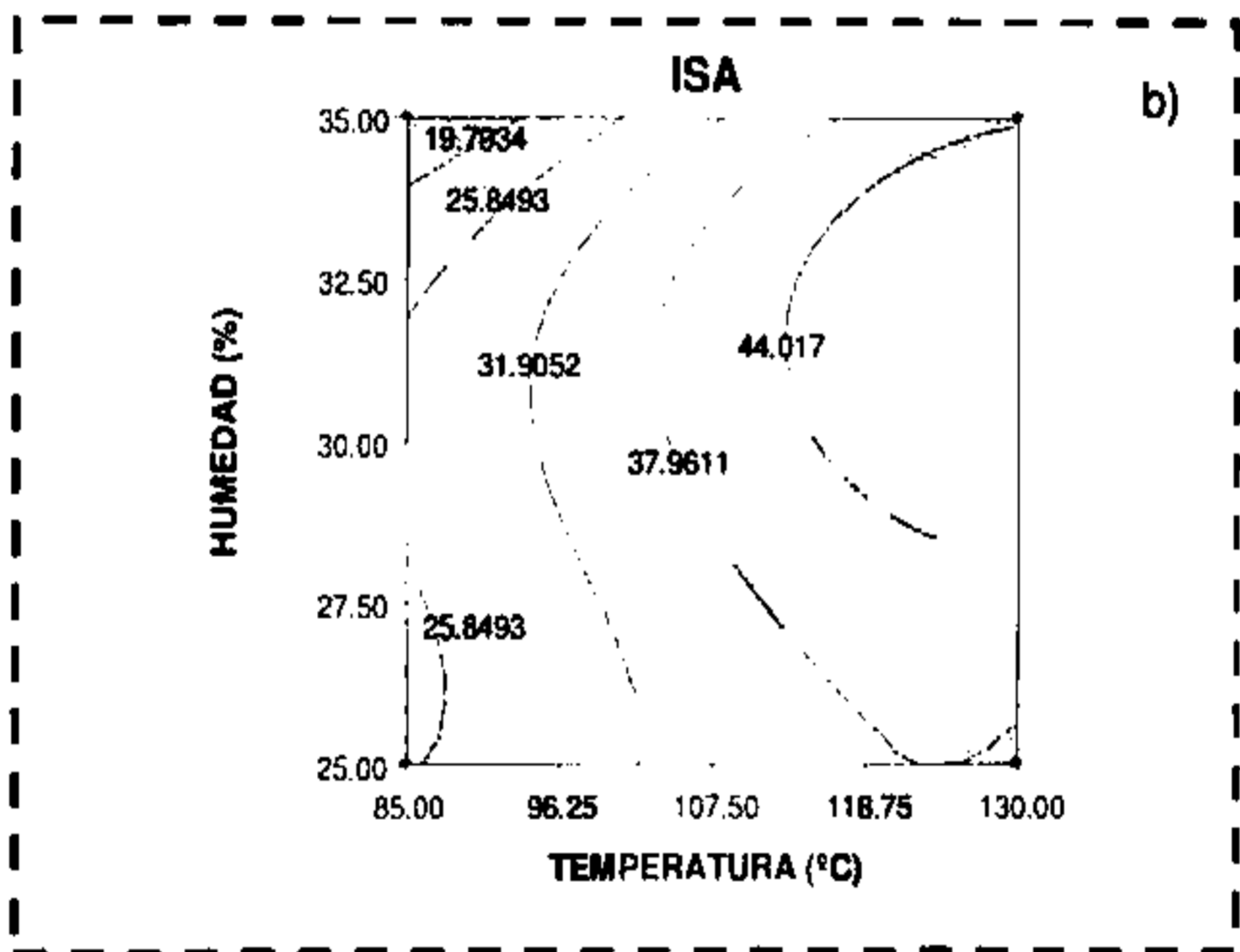
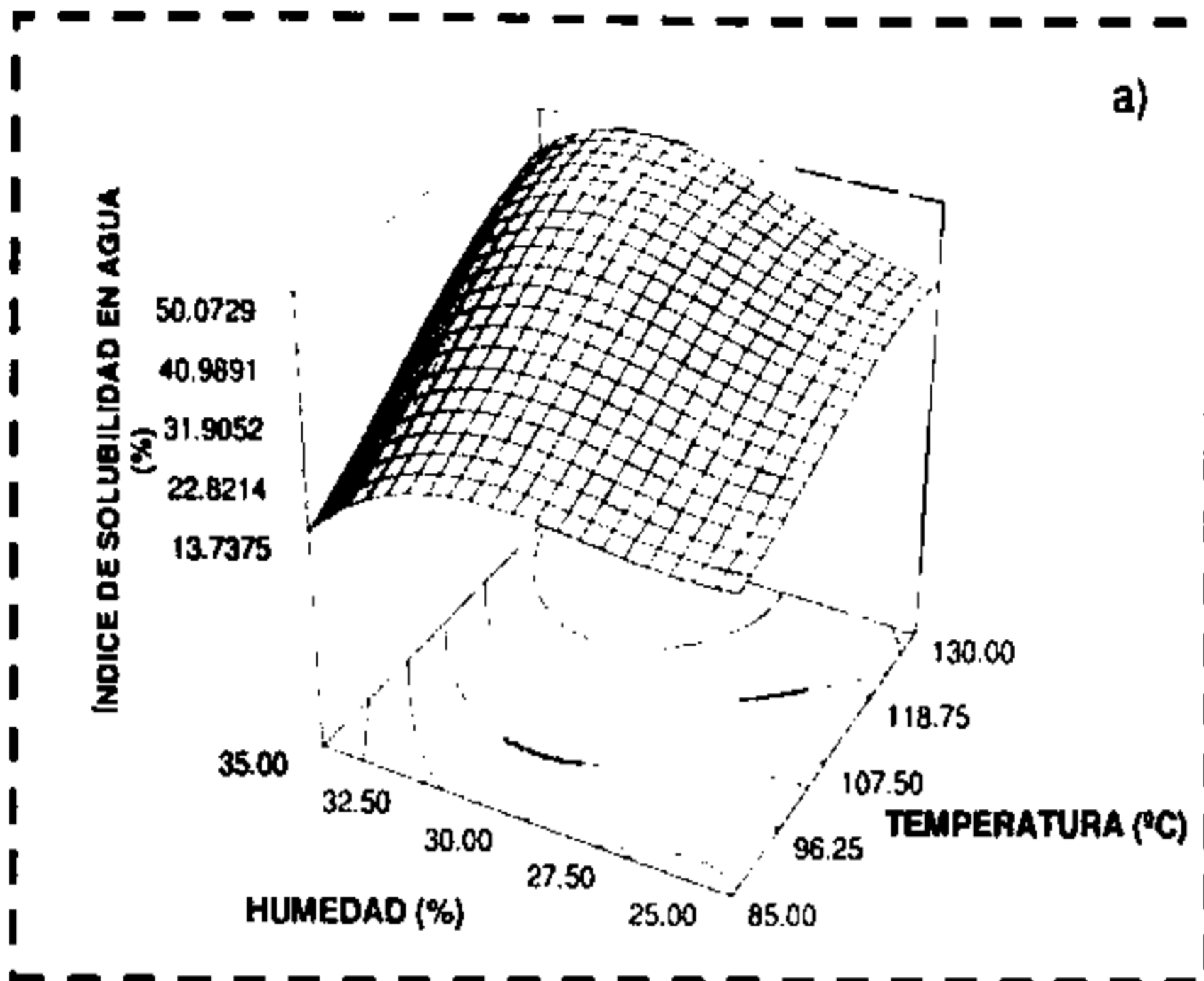
En el caso de las botanas con almidón succinatado se registraron valores de 19.100 a 41.300% (Tabla 15). Los coeficientes de regresión del modelo para el *ISA* de las botanas con almidón resistente obtenido por succinación (Tabla 16), muestran que la temperatura presentó efecto altamente significativo solo en sus términos cuadrático ( $b_{11}$ ) y cúbico ( $b_{111}$ ) ( $p \leq 0.01$ ), mientras que la humedad presentó efecto significativo en su forma lineal ( $b_2$ ) ( $p \leq 0.01$ ). Además, el término de interacción de la temperatura con la humedad fue altamente significativo ( $b_{12}$ ) ( $p \leq 0.01$ ). El modelo de predicción utilizado explicó el 99.44% de la variación total para los valores de *ISA*. La gráfica 38a de superficie de respuesta muestra que a humedades de 30% el *ISA* aumenta.



Lee y col., (1999) reportaron que a mayor temperatura de extrusión el *ISA* se incrementaba. Este comportamiento lo atribuyeron al grado de gelatinización del almidón y al incremento en el área de superficie del extrudido. Carvalho y col., (2002) estudiaron el efecto de las variables de extrusión como temperatura humedad y formulación en las características de viscosidad a 25, 50 y 95°C e *IAA* e *ISA*. De alimentos tipo botana de tercera generación obtenidos de mezclas de harinas de arroz y trigo y plátano manteniendo constantes la velocidad de tornillo (100 rpm) y el flujo de alimentación (148 g/min) utilizando un dado de salida plano de 1mm de espesor. Utilizaron la metodología de superficie de respuesta del tipo central compuesto. Resultó que la humedad es la variable con mayor efecto sobre las características estudiadas. El *IAA* no varió en gran medida entre tratamientos, el contenido de humedad. El *ISA* fue afectado por tres variables, teniendo mayor efecto el contenido de humedad. Una combinación de bajo contenido de humedad y alta temperatura aumentó el *ISA*, De igual modo lo afectó una combinación de bajo contenido de humedad y porcentaje de harina de plátano.

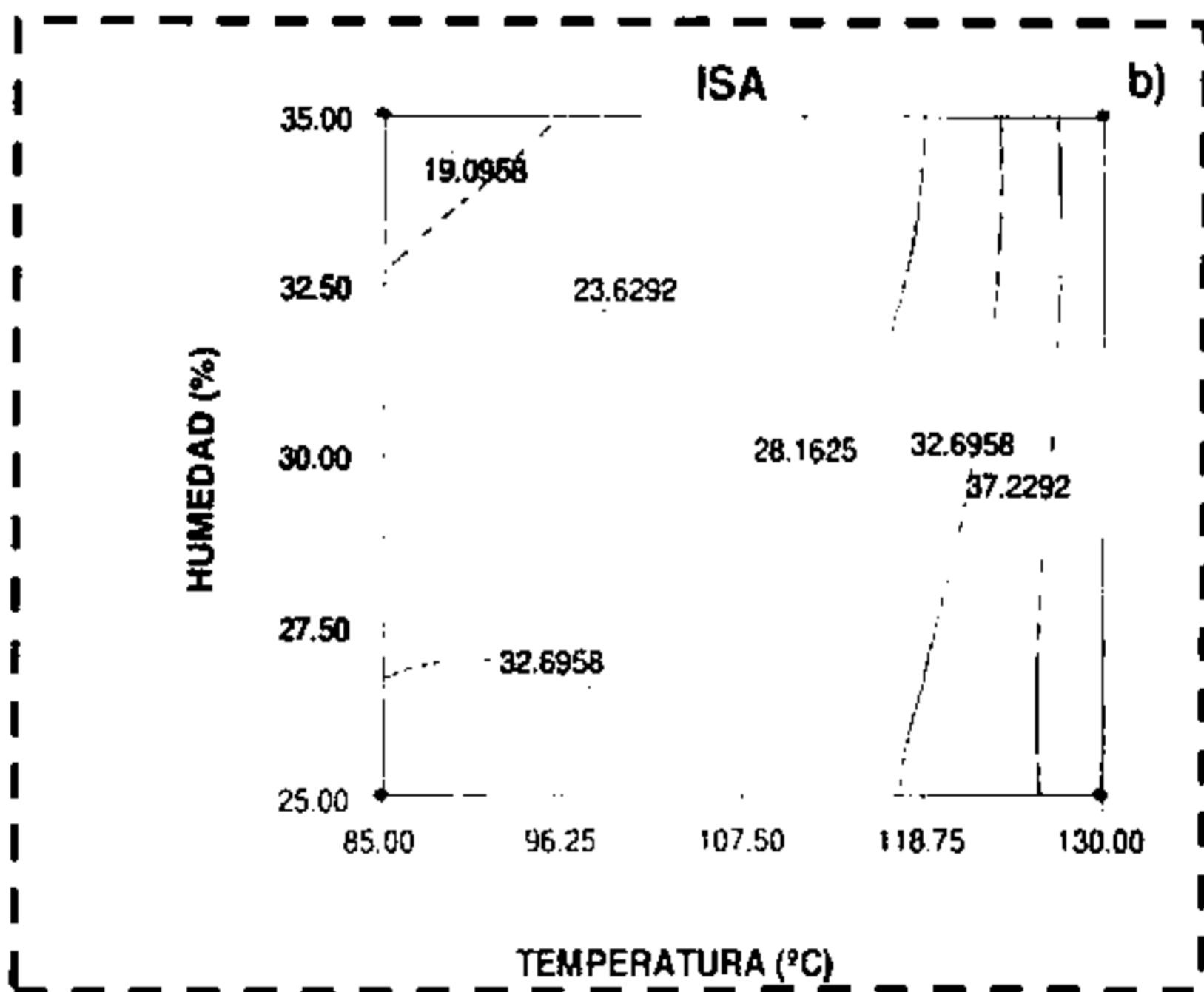
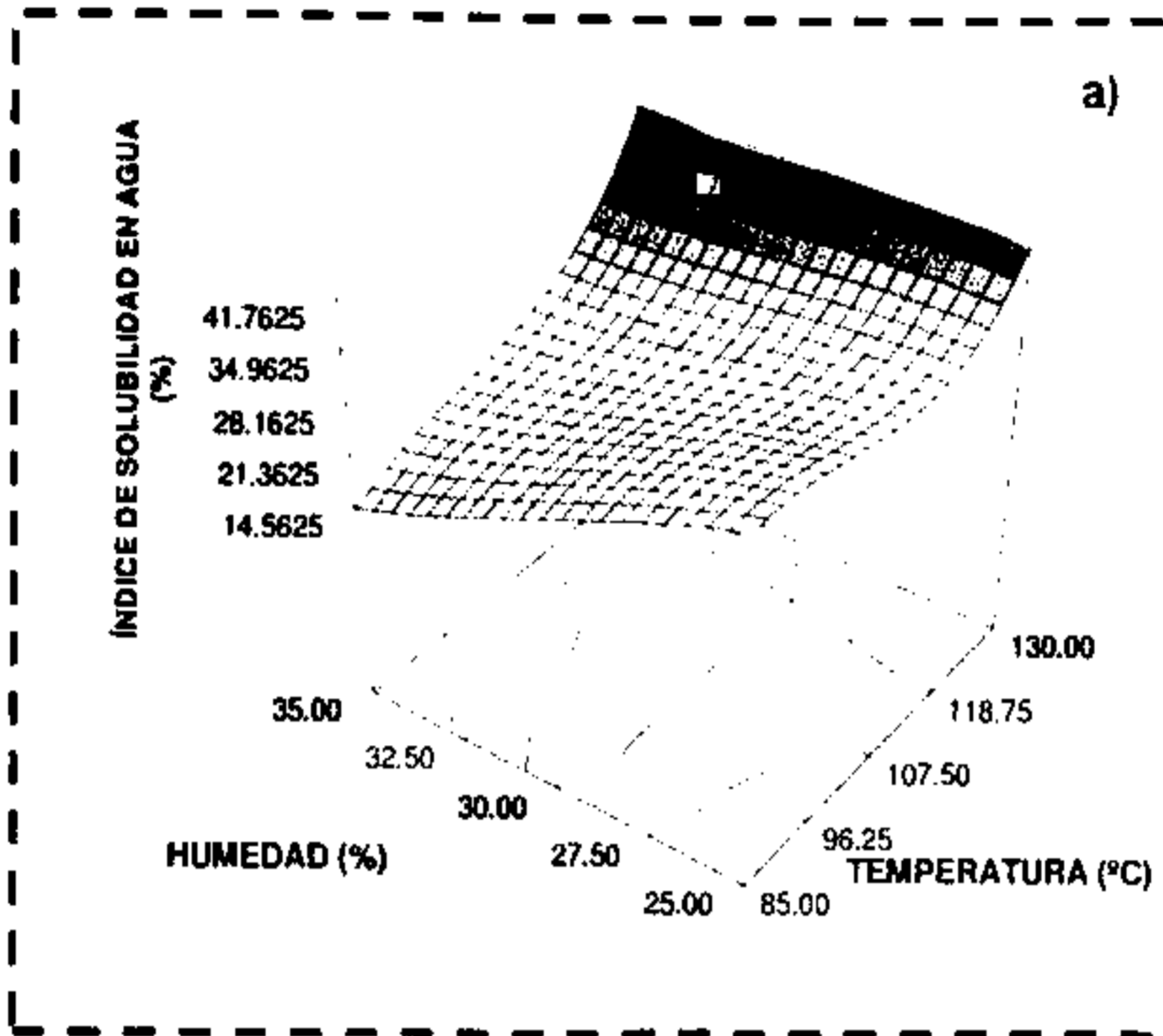
Los aumentos en el índice de solubilidad de los almidones tratados con sales de fosfato se pueden explicar debido a que durante el proceso de extrusión se produce una dextrinización de la molécula de almidón, traduciéndose en un aumento en la cantidad de compuestos solubles en agua (Harper 1992). Los hidratos de carbono solubles son compuestos de moléculas de almidón ramificadas (amilopectina) que pudieron ser producidos por el proceso de degradación de su estructura nativa, por lo que se refleja en el *ISA* (Aboubacar y Hamaker 2000). Las condiciones de contenido de humedad del almidón también tienen un efecto sobre este índice, debido a un incremento en el contenido de humedad en las muestras se induce una reducción en los valores de *ISA*. Estos resultados pueden ser debidos al efecto de que a mayores contenidos de humedad en las muestras, el agua actúa como un plastificante en el proceso de extrusión, previniendo una mayor dextrinización del almidón, reduciendo con ello los valores de solubilidad.





Gráfica 37. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre *ISA* de botanas control de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.



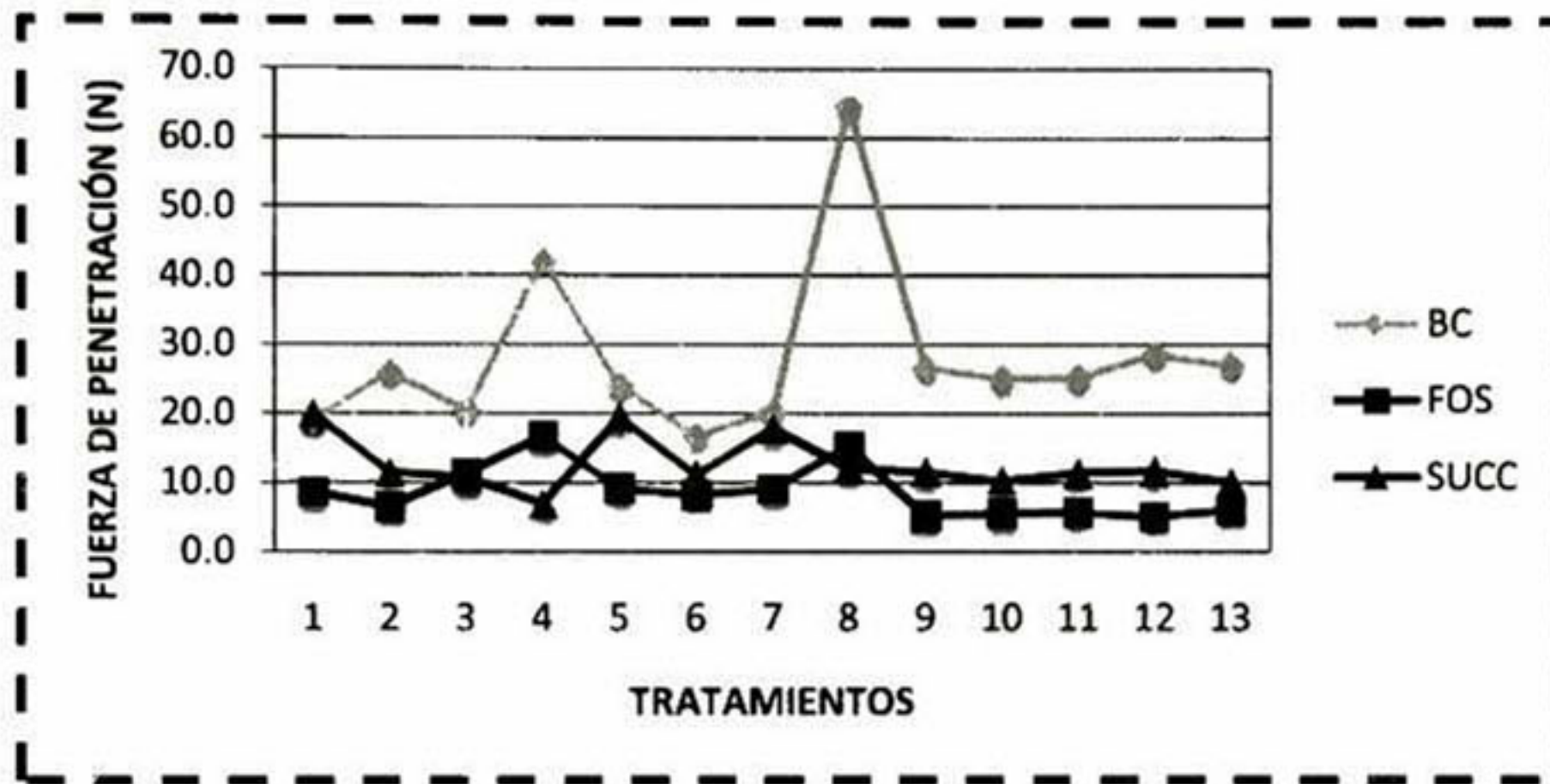


Gráfica 38. Efecto de la humedad y de la temperatura sobre ISA de botanas con almidón succinatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.



### 6.2.1.5 Fuerza de penetración (FP)

De manera general se obtuvieron extrudidos con valores de fuerza de penetración altos para las botanas control y valores para las botanas con almidón fosfatado y las botanas con almidón succinatado (Gráfica 39).



Gráfica 39. Valores comparativos de FP de botanas de tercera generación.

La menor fuerza de penetración para las botanas control, fue de 16.900N, correspondiente al tratamiento T<sub>6</sub>. Esta muestra fue procesada a una temperatura de 139.32°C y un contenido de humedad de 30%. El valor máximo de FP fue de 16.714N y correspondió al tratamiento T<sub>4</sub>, el cual fue procesado a una temperatura de 130°C, con una humedad de 35%. Para las botanas con almidón succinatado la menor fuerza de penetración fue de 6.91N, correspondiente al tratamiento T<sub>4</sub>. Esta muestra fue procesada a una temperatura de 130°C, una y humedad de 35%. En la gráfica 42 a) se muestra que a humedades de 30% las botanas control de tercera generación tienden a ser más duras, es decir mientras el proceso se hace más severo y con humedades bajas ≈16% el extrudido se expande favorablemente. La grafica 43 a) de superficie de respuesta muestra que a humedades de 30% las botanas control de tercera generación tienden a ser más duras. La grafica 44 a) de superficie de respuesta muestra a humedades de 25% las botanas control de tercera generación tienden a ser más duras. Case y col., (1992) elaboraron un producto intermedio a partir de diferentes fuentes de

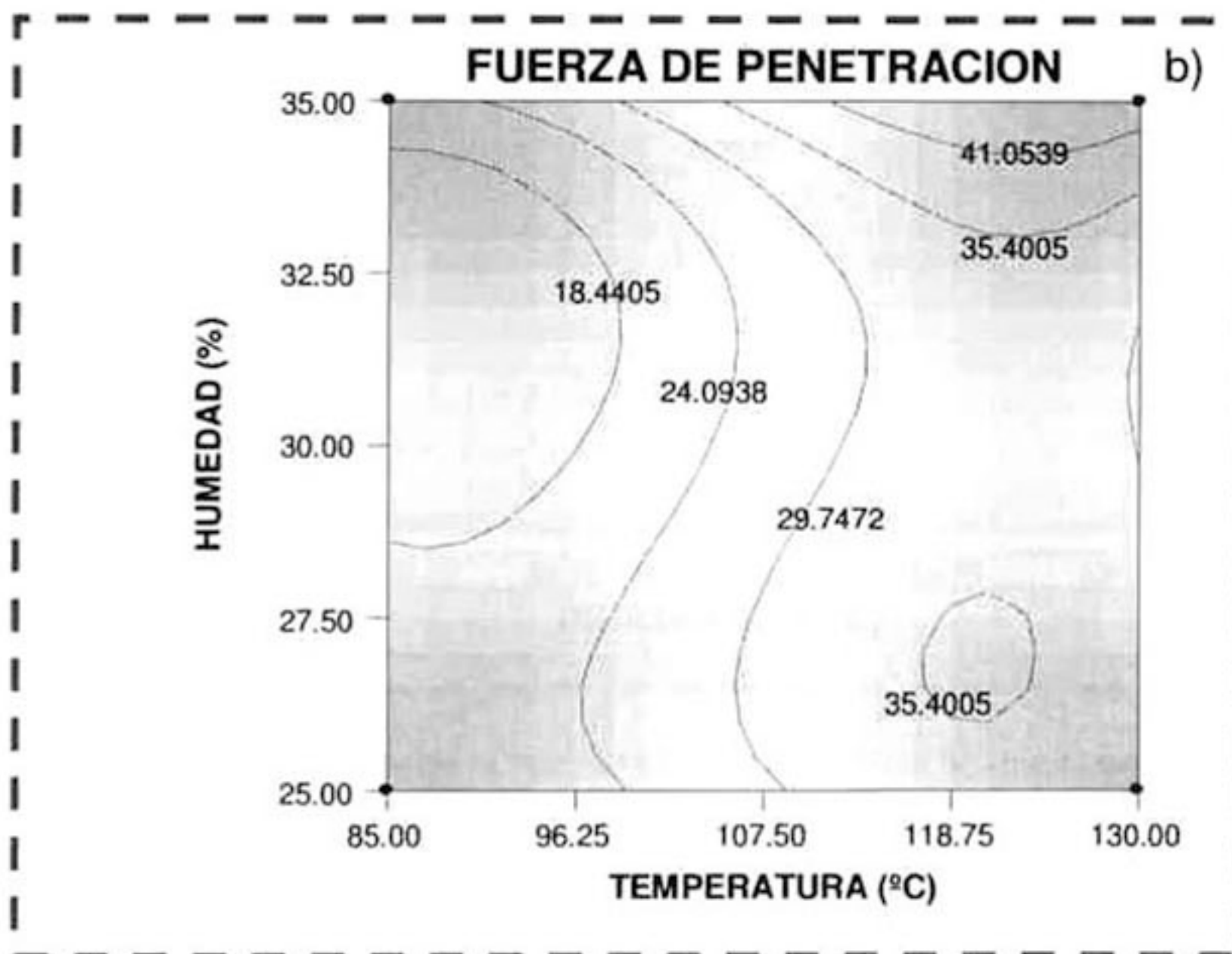
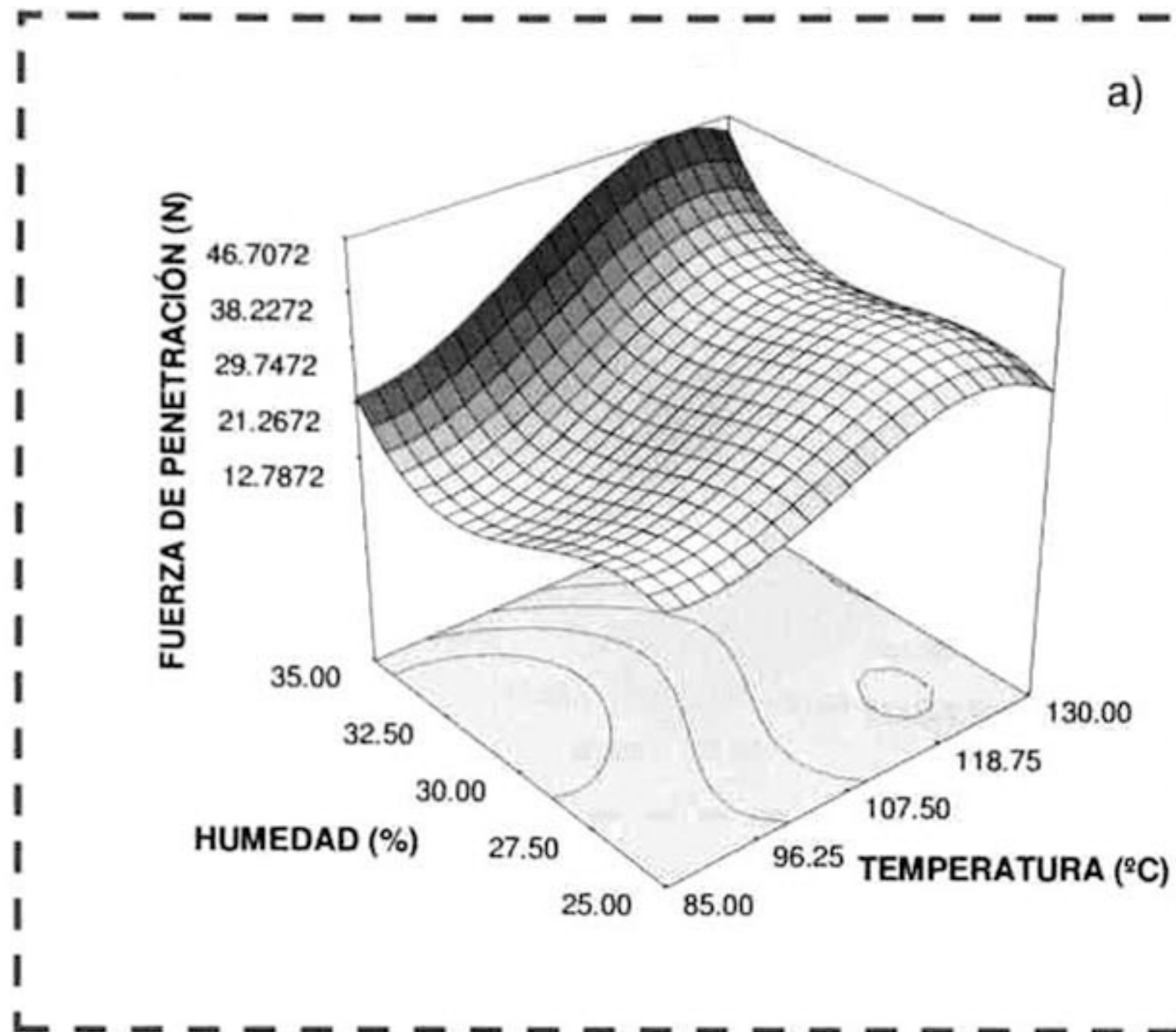


almidón y reportaron que con un aumento en el grado de gelatinización se presentaba una disminución en la fuerza de penetración de los productos altamente gelatinizados con mejores características físicas.

Hsieh y col., (1990) reportaron una relación entre el índice de expansión y la fuerza de corte en productos extrudidos y señalaron que los productos que presentaron mayores índices de expansión, mostraron los menores valores de fuerza de corte. Asimismo, estos autores citaron que los productos con mayor expansión formaban celdas con paredes delgadas, dando como resultado bajos valores de fuerza de corte. La fuerza de corte de los productos expandidos y en particular de las botanas expandidas, es un factor importante tanto para el sector industrial como para el consumidor. Si el producto presenta una fuerza de corte baja, fácilmente se romperá durante la operación de empaqueo y distribución, Por otro lado, si el producto presenta valores altos de fuerza de corte, el consumidor encontrará al producto difícil de morder y de masticar (Maga y Liu, 1993). La fuerza de corte puede estar directamente relacionada con el grado de gelatinización y degradación del almidón (Case y col., 1992). Suknark y col., (1999) mostraron que los productos con mayor expansión formaron celdas con paredes delgadas, dando como resultado bajos valores de fuerza de corte.

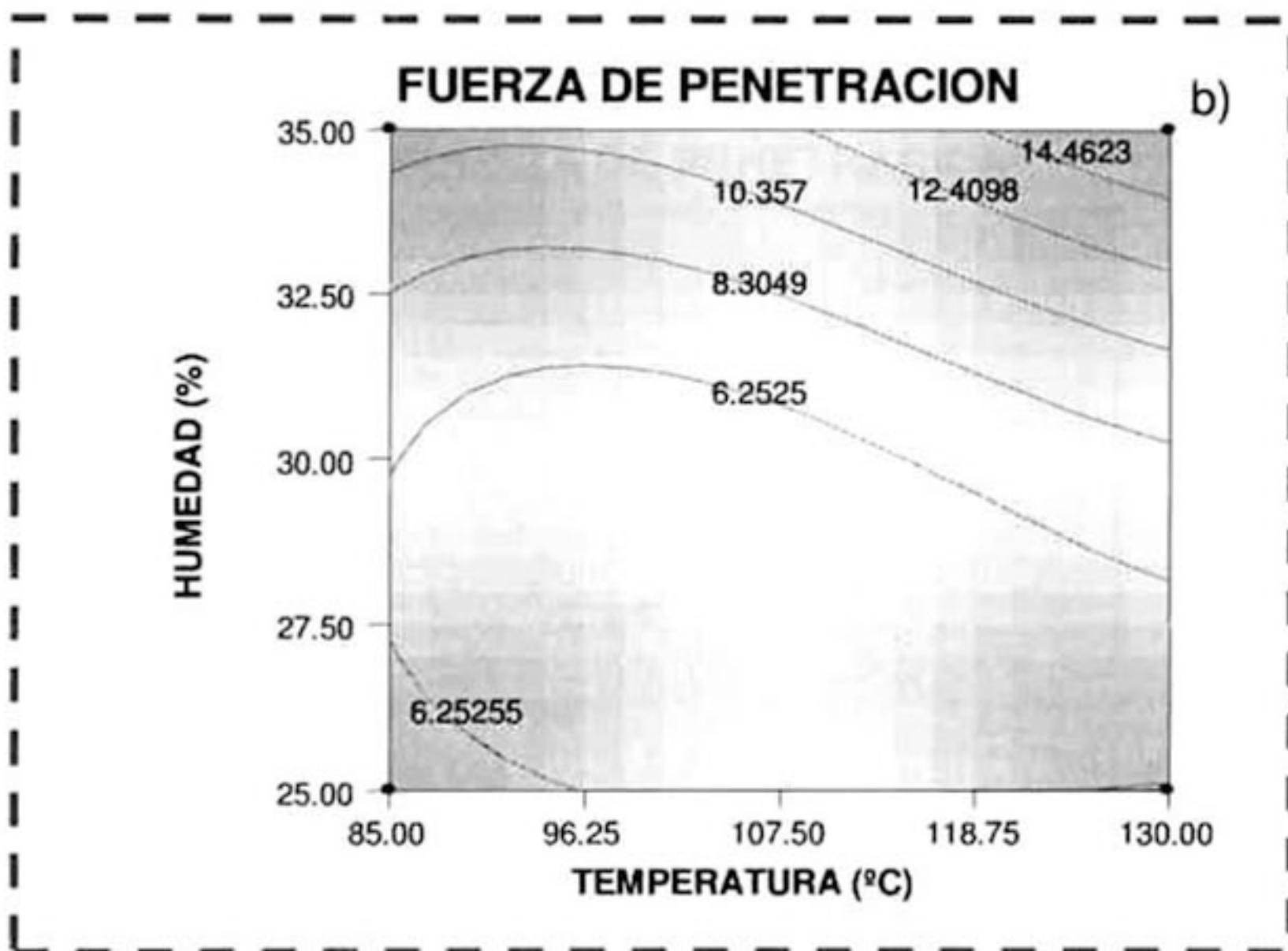
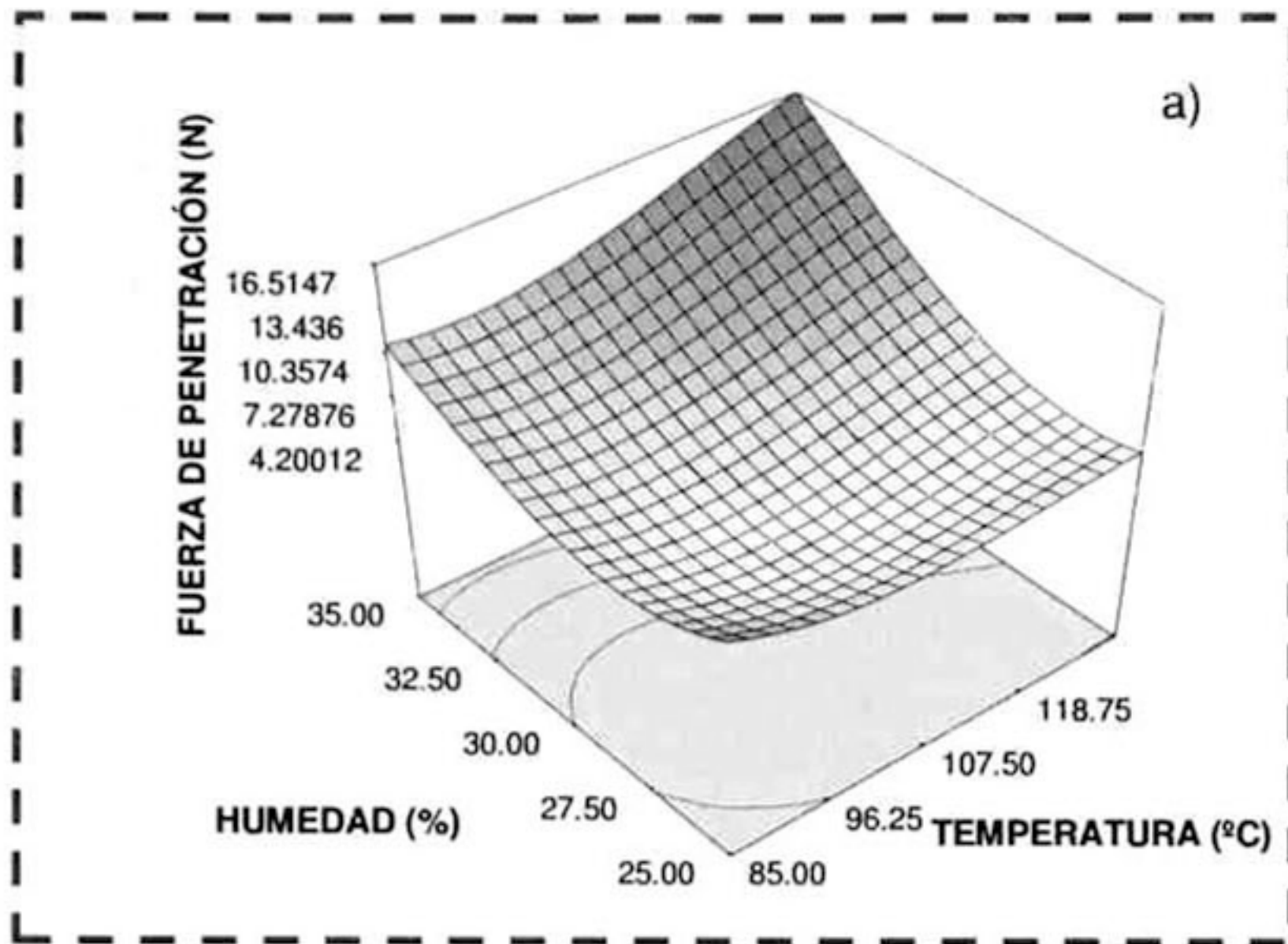
Delgado y col., (2011) reportaron que los menores valores de fuerza de penetración (<8N) fueron obtenidos al procesar las muestras con altas temperaturas de extrusión (>136°C) y bajos contenidos de humedad (<24%) y los mayores valores fueron de 23N. Los resultados obtenidos en este trabajo son también similares a los reportados por Pérez y col., (2008) para extrudidos hechos a base de mezclas de maíz-soya que presentaron una menor dureza cuando la temperatura de barril superaba 185°C y disminuía a humedades menores de 14%. Arimi y col., (2008) encontraron que la fuerza máxima para penetrar los productos expandidos varió de 5 a 35N, esta variabilidad en la dureza de la muestra podría atribuirse principalmente a la falta de uniformidad en la expansión que dio lugar a productos con células de aire de diferentes tamaños.





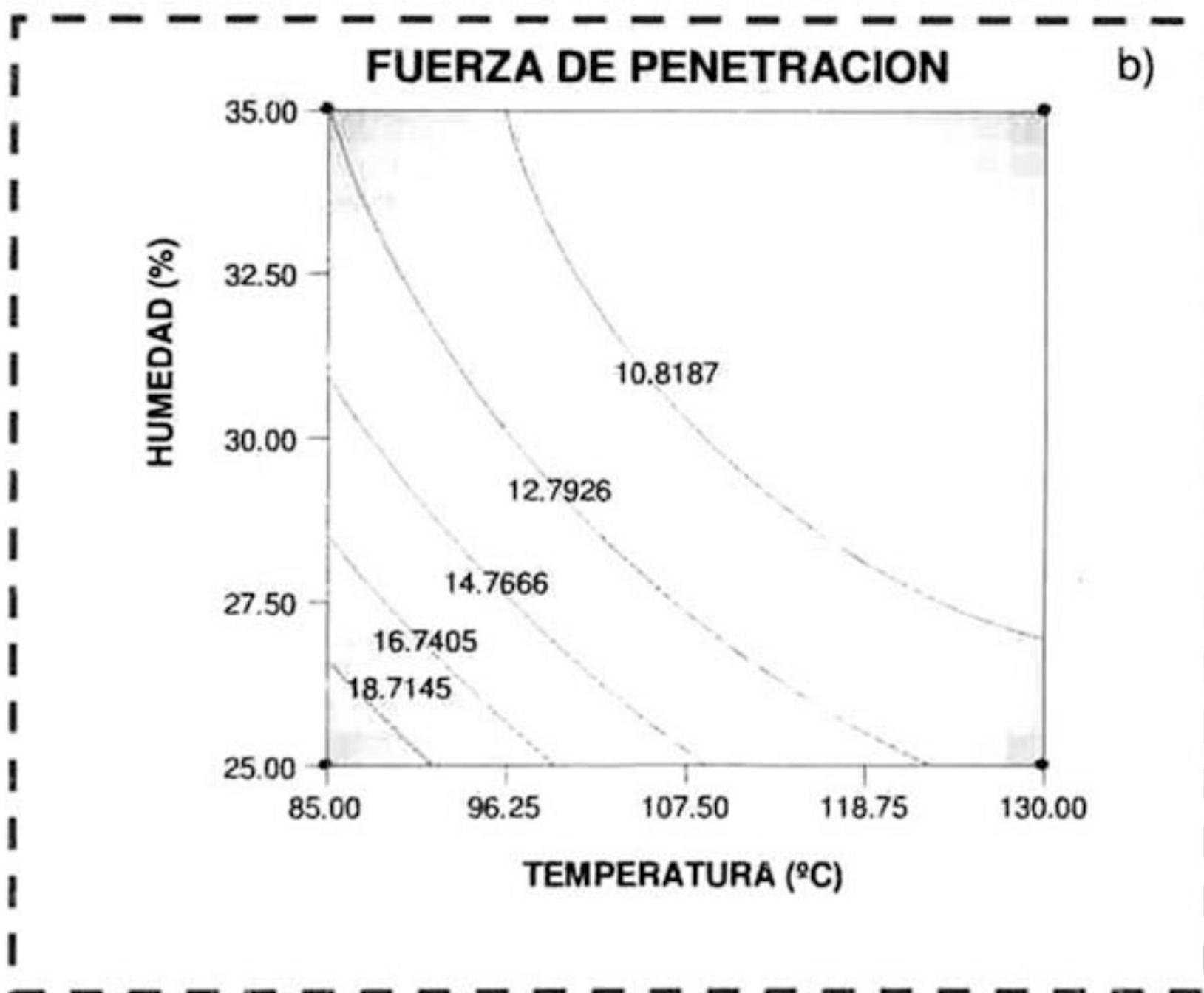
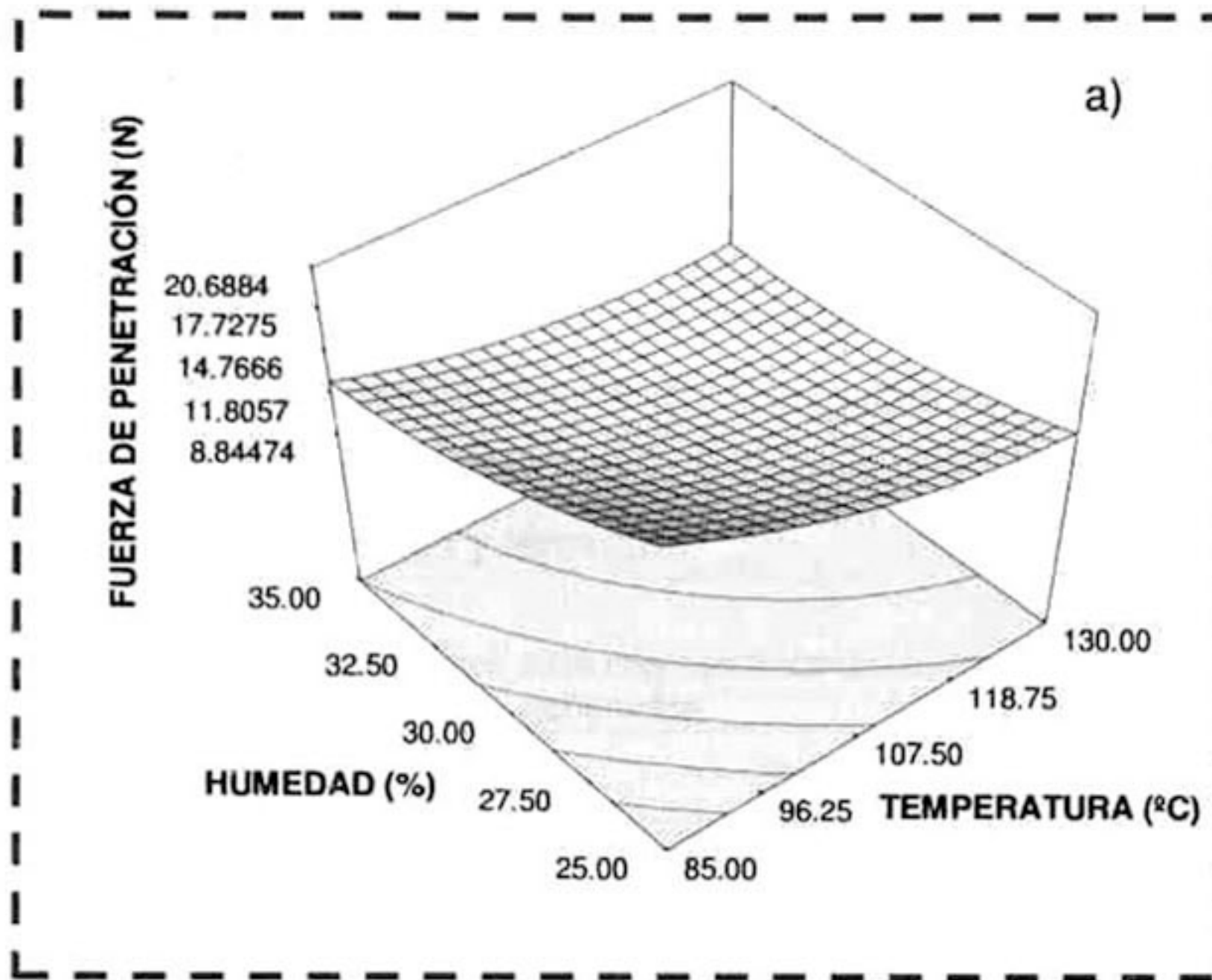
**Gráfica 40.** Efecto de la humedad y de la temperatura sobre *FP* de botanas control de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.





**Gráfica 41.** Efecto de la humedad y de la temperatura sobre *FP* de botanas con almidón fosfatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.





**Gráfica 42.** Efecto de la humedad y de la temperatura sobre *FP* de botanas con almidón fosfatado de tercera generación. a) superficie de respuesta y b) contornos.



### 6.2.1.6 Selección de los mejores tratamientos

La selección de los mejores tratamientos se llevó a cabo tomando en cuenta todas las propiedades evaluadas con anterioridad comparando los resultados obtenidos para cada tipo de botana extrudida, escogiendo los tratamientos con valores más estables de *IE*, *DA*, *L*, *IAA*, *ISA* y *FP* (Tabla 17); de esta manera se tomaron los tratamientos  $T_4$  y  $T_7$  para la evaluación de *GS*, *AR*, y de sus propiedades estructurales y térmicas.

**Tabla 17.** Resultados correspondientes a los mejores tratamientos de las botanas de tercera generación.

Tratamiento	Variables independientes		Variables dependientes						
	vel.de tornillo	Temperatura	<i>IE</i>	<i>DA</i> (Kg/m <sup>3</sup> )	<i>IAA</i>	<i>ISA</i> (%)	<i>FP</i> (N)	<i>L</i>	
BC	4	130.00	35.00	1.52	637.00	6.844	46.400	42.136	88.953
	7	107.50	22.93	2.10	411.55	13.403	34.600	20.174	89.040
FOS	4	130.00	35.00	3.50	195.33	9.393	75.300	16.714	89.830
	7	107.50	22.93	4.41	182.71	11.956	51.900	9.071	90.103
SUC	4	130.00	35.00	4.17	173.13	13.267	41.900	6.911	90.040
	7	107.50	22.93	3.72	185.36	12.831	32.900	17.841	88.890

BC= Botana control

FOS= Botana con almidón fosfatado

SUC= Botana con almidón succinatado

### 6.2.1.7 Grado de sustitución (GS)

En la Tabla 18 se muestran los valores del contenido de fosforo obtenidos y los valores del grado de sustitución calculados para almidones fosfatados por extrusión.

**Tabla 18.** Grado de sustitución de almidones fosfatados de botanas de tercera generación.

Muestra	% Fósforo	Grado de sustitución
$T_4$	BC	0.1222
	FOS	0.2505
$T_7$	BC	0.1268
	FOS	0.2616
<b>Almidón nativo</b>	<b>0.0372</b>	<b>0.0019</b>

BC= Botana control

FOS= Botana con almidón fosfatado



Chang y Lii (1992) compararon las propiedades fisicoquímicas de almidones nativos de maíz y yuca con relación fosfatados por proceso de extrusión y por el método convencional. Sus resultados indican que para preparar almidón fosfatados con similar *GS* el proceso de extrusión requirió una menor cantidad de reactivos que en el método convencional. Los almidones fosfatados por extrusión tuvieron menores temperaturas de gelatinización, entalpías más bajas y menores propiedades de viscosidad que aquellos preparados por el método convencional. Estos autores sugieren que estos resultados pueden atribuirse al alto grado de daño en el almidón durante el proceso de extrusión.

Sitohy y Ramadan (2001) modificaron almidones de maíz, arroz y papa haciéndoles reaccionar con una mezcla de mono y difosfatos de sodio a diferentes rangos molares (moles de fosfato/ moles de glucosa anhidra) con la finalidad de observar sus propiedades morfológicas y fisicoquímicas. Estos autores encontraron que el tamaño del gránulo del almidón estuvo fuertemente ligado a las variaciones en el grado de sustitución (*GS*) con los grupos fosfatos, donde un aumento en *GS* se tradujo en un aumento del tamaño del gránulo del almidón, aunque no en forma lineal. Paralelamente, el incremento de este *GS* resultó en cambio de las propiedades fisicoquímicas que están fuertemente correlacionadas con el tamaño granular, especialmente en propiedades como la solubilidad, poder de hinchamiento y claridad de pasta.

El grado de sustitución de almidones succinatados fue de 0.032 y 0.033 (Tabla 19); para los almidones de las botanas control, se registraron valores de 0.01, lo cual indica que el almidón de las botanas de 3<sup>a</sup> generación reaccionaron correctamente con el anhídrido octenil succínico, esto se debe ver reflejado en el contenido de *AR* aumento en los *IAA* e *ISA* y disminución de la viscosidad.

Rudnik y col., (2005) realizaron succinatación de almidones de diversas fuentes por extrusión reactiva, obtuvieron valores de grado de sustitución de 0.285 para almidón de papa con una humedad de 11.3%; lo cual es mayor a los valores



encontrados en este trabajo. Sin embargo la concentración de reactivo utilizado por los autores fue de 15% y en este trabajo fue menor al 0.5%.

**Tabla 19.** Grado de sustitución de almidones succinatados de botanas de tercera generación.

Muestra		Grado de sustitución
T <sub>4</sub>	BC	0.0107
	SUC	0.0335
T <sub>7</sub>	BC	0.0123
	SUC	0.0325

BC= Botana control

SUC= Botana con almidón succinatado

#### 6.2.1.8 Almidón resistente (AR)

Varios estudios han reportado que es posible un incremento de *AR* en alimentos por la modificación de las condiciones de procesamiento tales como calentamiento y enfriamiento (Tharanathan y Mahadevamma, 2003). La retrogradación de amilosa fue identificada como el mecanismo principal para la formación de *AR*. En la retrogradación los gránulos de almidón están completamente hidratados. La amilosa es lixiviada de los gránulos en solución como un polímero enrollado al azar. Al enfriarse las cadenas empiezan a reasociarse como dobles hélices estabilizadas por enlaces de hidrógeno y el empaquetamiento de las dobles hélices de la amilosa lleva a la formación de cristales los cuales impiden la accesibilidad de  $\alpha$ -amilasa a los enlaces glucosídicos (Haralampu, 2000).

Para el almidón nativo de papa el contenido de *AR* fue de 2.05% similar a lo reportado por Fuentes y col., (2011) (1.7%), para los pellets expandidos de la botana control se registraron valores de 42.57 y 45.92% y los valores más altos correspondieron a las botanas con almidón fosfatado, lo cual puede deberse a que la mayor concentración de reactivo para la modificación fue utilizada en los almidones fosfatados. (Tabla 20).



**Tabla 20.** Contenido de almidón resistente en botanas de tercera generación.

<b>Muestra</b>		<b>Almidón resistente (%)</b>
<b>T4</b>	BC	45.92
	FOS	81.48
	SUC	68.28
<b>T7</b>	BC	42.57
	FOS	80.60
	SUC	66.69
<b>Almidón nativo</b>		2.05

BC= Botana control

FOS= Botana con almidón fosfatado

SUC= Botana con almidón succinatado

Tosi y col. (2001), estudiaron la formación de AR por extrusión en función del contenido de humedad y temperatura. Encontraron que a ciertos intervalos de humedad (12-16%) se presenta un aumento en la formación de AR a medida que se incrementa la humedad, mientras que a contenidos de humedad más elevados, similares a los de este estudio, el AR tiende a disminuir y el fenómeno se ve influenciado fundamentalmente por la temperatura.

Unlu y Faller (1998), encontraron que el almidón de maíz con alto contenido de amilosa, aumenta la producción de AR en productos extrudidos. Tosi y col. (2001), estudiaron la formación de AR por extrusión en función del contenido de humedad y temperatura de tratamiento. Utilizando sémola de maíz sin desgerminar, a tres temperaturas (150, 175 y 200 °C) y humedades comprendidos entre 12 y 20%. Encontraron que el contenido de AR no depende de la humedad después de contenidos de 16%, pues este comportamiento depende fundamentalmente de la temperatura a la que se efectuó el tratamiento, por lo que a temperaturas de 150 y 175 °C, se produce una disminución en el contenido de AR, en tanto que a 200 °C se produce un aumento, tales como la velocidad de tornillo, temperatura y contenido de humedad (Davidson y col., 1984).



## **6.2.2 Propiedades estructurales y térmicas**

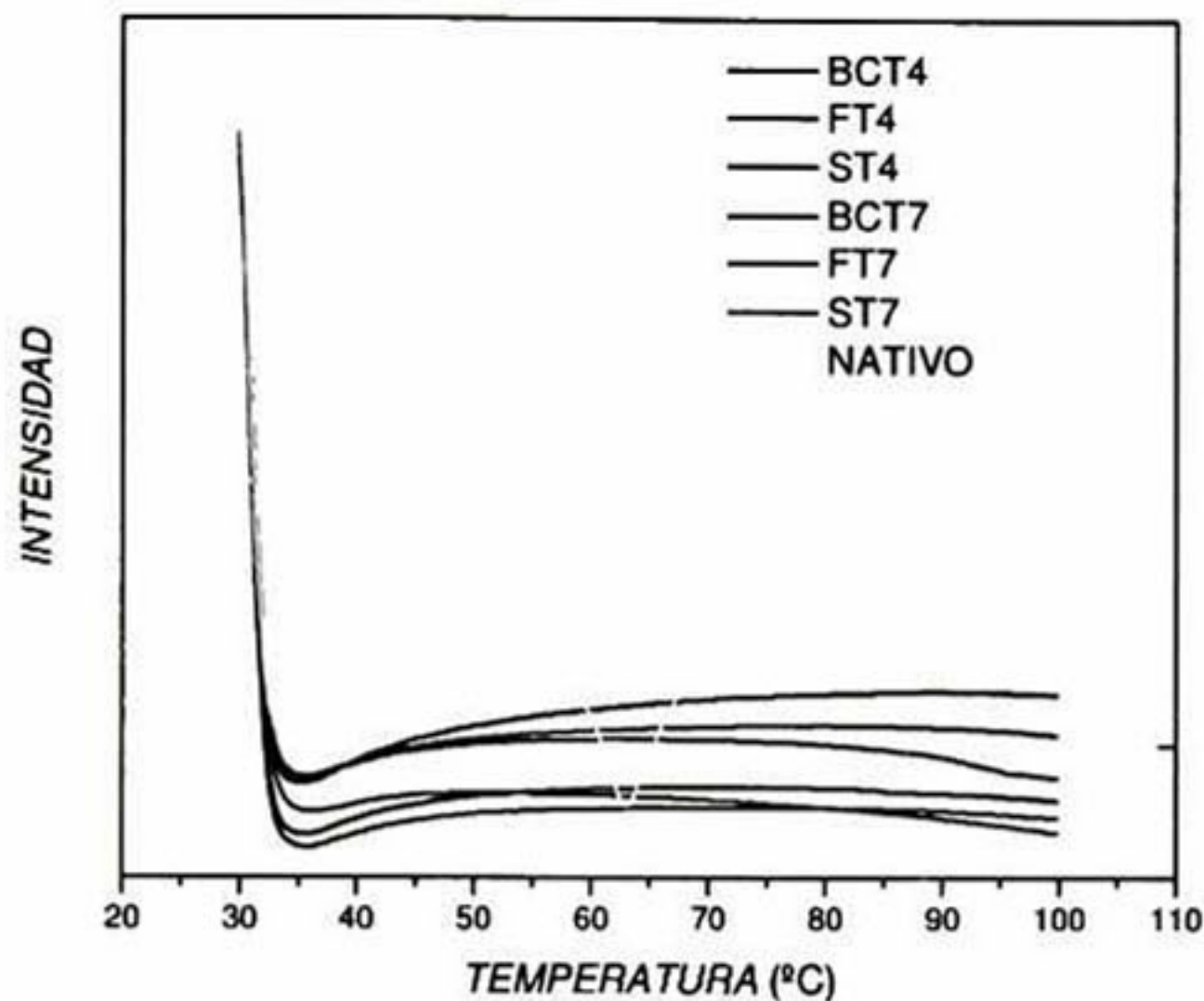
### **6.2.2.1 Calorimetría diferencial de Barrido (DSC)**

La calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés), es un método térmico ampliamente usado para estudiar el fenómeno de gelatinización de los almidones. Este análisis refleja las transiciones que existen en el material estudiado, sin embargo en ocasiones los procesos a los que se somete el almidón son tan severos que el material obtenido ya no presenta transiciones. Este hecho refleja el impacto de este tipo de modificación química, donde las cadenas del almidón son covalentemente unidas a una u otra cadena por los grupos fosfatos y succinatos.

En los difractogramas de los almidones entrecruzados se puede observar que no se muestra ningún tipo de transición (Gráfica 43); esto se debió a una desorganización de las cadenas del almidón debido a este tratamiento térmico. Esto va de acuerdo con los niveles de almidón resistente que presentaron estas muestras. Lo anterior es similar a lo reportado por Lee y col., (1999) quienes encontraron que los productos extrudidos a 80°C mostraron un pequeño pico de gelatinización, mientras que a 90 y 100°C no mostraron ninguno.

Resultados similares fueron encontrados por Gonzales y col., (2006) quienes evaluaron algunas propiedades de almidón resistente producido a partir de almidones de fuentes no convencionales como el plátano y el mango por medio de la extrusión y encontraron que los valores de entalpía de los almidones extruidos disminuyó en comparación con sus contrapartes nativas. Este patrón se produce durante la extrusión, ya que la gelatinización parcial o total se lleva a cabo.





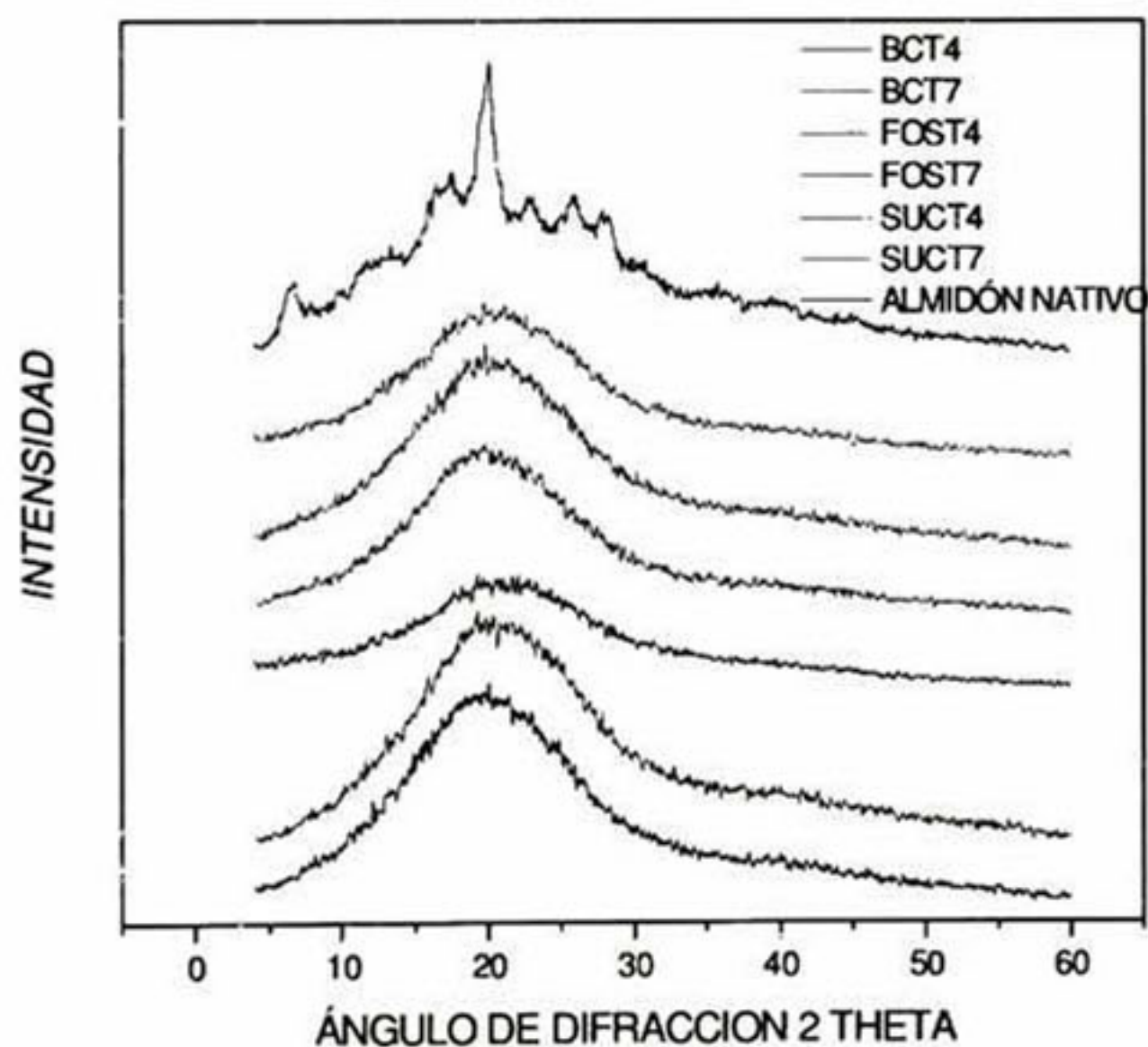
**Gráfica 43.** Termogramas de  $T_4$  y  $T_7$  de botanas control (BC), botanas con almidón fosfatado (FOS), botanas con almidón succinatado (SUC) y almidón nativo.

### 6.2.2.2 Difractometría de rayos X

El patrón de difracción del almidón nativo ha sido usado para comparar su cristalinidad con muestras que fueron procesadas por extrusión para una modificación química por medio de reacciones de entrecruzamiento. Las diferencias en los porcentajes de cristalinidad relativa entre los almidones modificados y el nativo podrían ser atribuidas a la destrucción de los gránulos del almidón causados por los tratamientos por extrusión esto es debido a que el entrecruzamiento dentro de los gránulos de almidón ocurre principalmente en las zonas amorfas y las cristalinas, probablemente debido a que las amorfas son más flexibles y disponibles para el entrecruzamiento. En la gráfica 44 se muestra que los picos que indican cristalinidad en el almidón, desaparecen después del procesamiento por extrusión; es decir, el procesamiento de las botanas fue tan severo que hidrolizó las fracciones cristalinas del almidón nativo, disminuyendo drásticamente su %CR de 20.54% a <5%. Esto indica que el proceso fue eficiente y corrobora el aumento en el contenido de AR en los productos finales.



La fragmentación del almidón durante la extrusión es evidenciada por una parcial o completa destrucción de la estructura cristalina del gránulo, la cual, se ha documentado por estudios de difracción de rayos X (Charbonniere y col., 1973; Chinnaswamy y col., 1989). El grado de fragmentación del almidón depende de las condiciones de operación del extrusor. Rabe y Sievert (1992), investigaron el efecto de la extrusión en la formación de *AR*. Usando harina de trigo y a través de la calorimetría diferencial de barrido, observaron la presencia de complejos amilosa-lípidos y amilosa cristalizada, con lo cual concluyeron que la formación de amilosa cristalizada contribuye en la formación de *AR* y que la presencia de complejos amilosa-lípido, no afecta la formación de *AR*. Tanto la energía mecánica como térmica transferidas al almidón durante la extrusión, provocan el rompimiento de las valencias primarias y secundarias de los enlaces y puentes de hidrógeno entre cadenas adyacentes de amilosa o amilopectina.



**Gráfica 44.** Patrones de difracción de rayos X de botanas de tercera generación



### 6.2.2.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

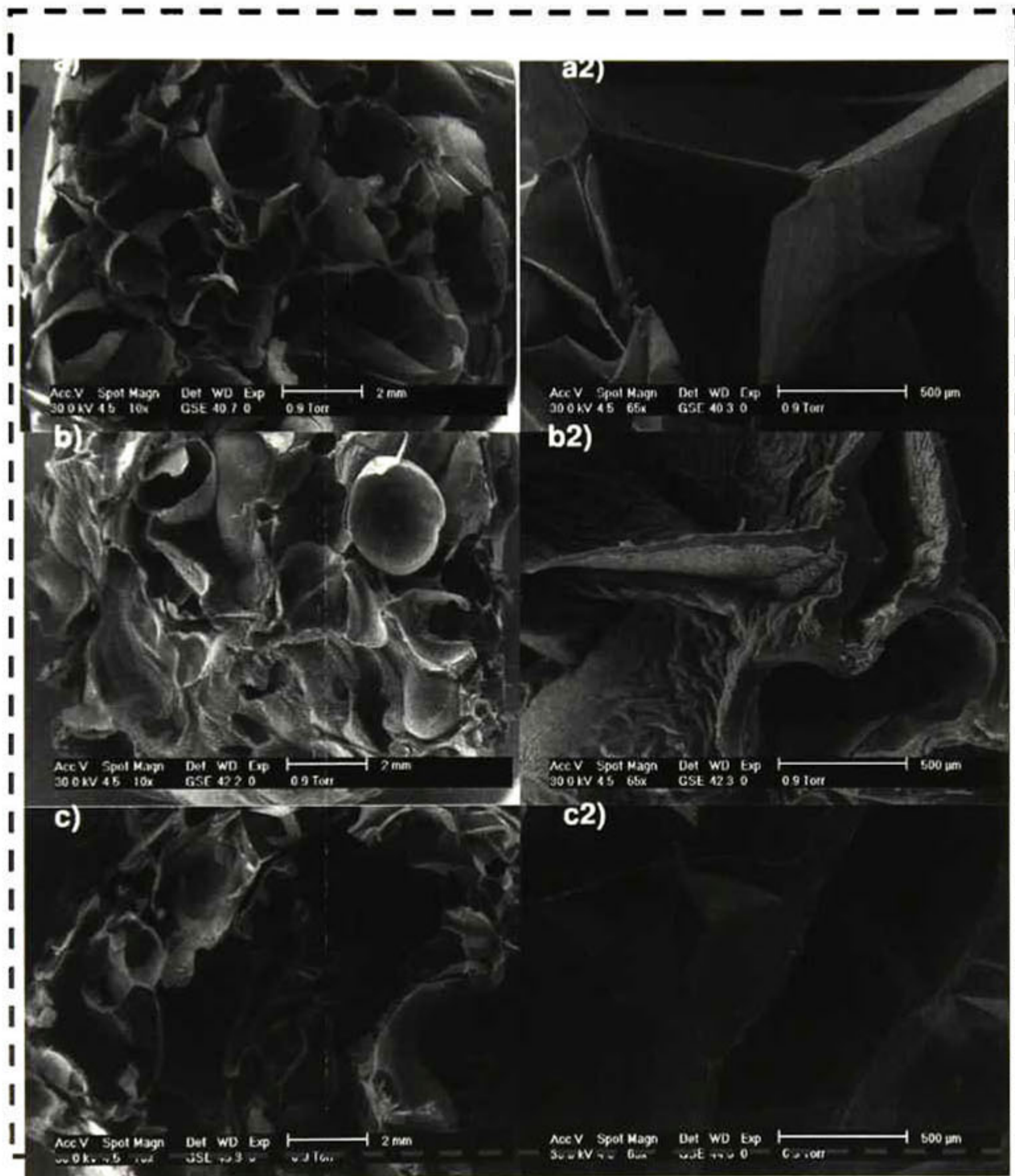
Para observar correctamente la morfología de las botanas procesadas se llevó a cabo el análisis de microscopía electrónica de barrido con tomas a 10x y a 65x en la figura 16a se observó que la expansión para el tratamiento 4 de la botana control fue buena mostrando una botana con celdas de aire aunque grandes, uniformes. En la figura 16 b se observa el tratamiento 4 de la botana con almidón resistente obtenido por fosfatación muestra un tamaño de burbuja mayor que el obtenido por la botana control y para las botanas con almidón succinatado se observa que el tamaño de celda es notablemente no uniforme presentándose en tamaños variados. De acuerdo a la figura 16 podemos decir que la botana con control presenta células de aire de menor tamaño además de que las paredes de estas son de menor espesor que las correspondientes a la botana con almidón fosfatado y a la botana con almidón succinatado; esto mejora la textura de la botana ya que se necesita menor fuerza para penetrarla. Esto a pesar de que las botanas con almidón fosfatado presentaron mayor *IE*.

En la figura 17 se muestran las microfotografías correspondientes al tratamiento 7 de las botanas control, botanas con almidón fosfatado y botanas con almidón succinatado que muestran el mismo comportamiento que para el tratamiento 4 en que las celdas pequeñas para la botana control le confieren mejores características de expansión y textura que las botanas con almidón fosfatado y que la botana control.

Para la distribución uniforme de las células de aire de pequeño tamaño los expandidos deben tener una liberación repentina de la acumulación de presión de vapor dentro de pellets durante el calentamiento por microondas. Por lo tanto, un alto contenido de humedad de los pellets impide la liberación repentina de presión de vapor debido a la falta de esta. El bajo grado de gelatinización puede dar lugar a la expansión insuficiente. En los pellets con menos de gelatinización, el vapor evaporado desde el interior por el calentamiento podría ser desprendido entre los

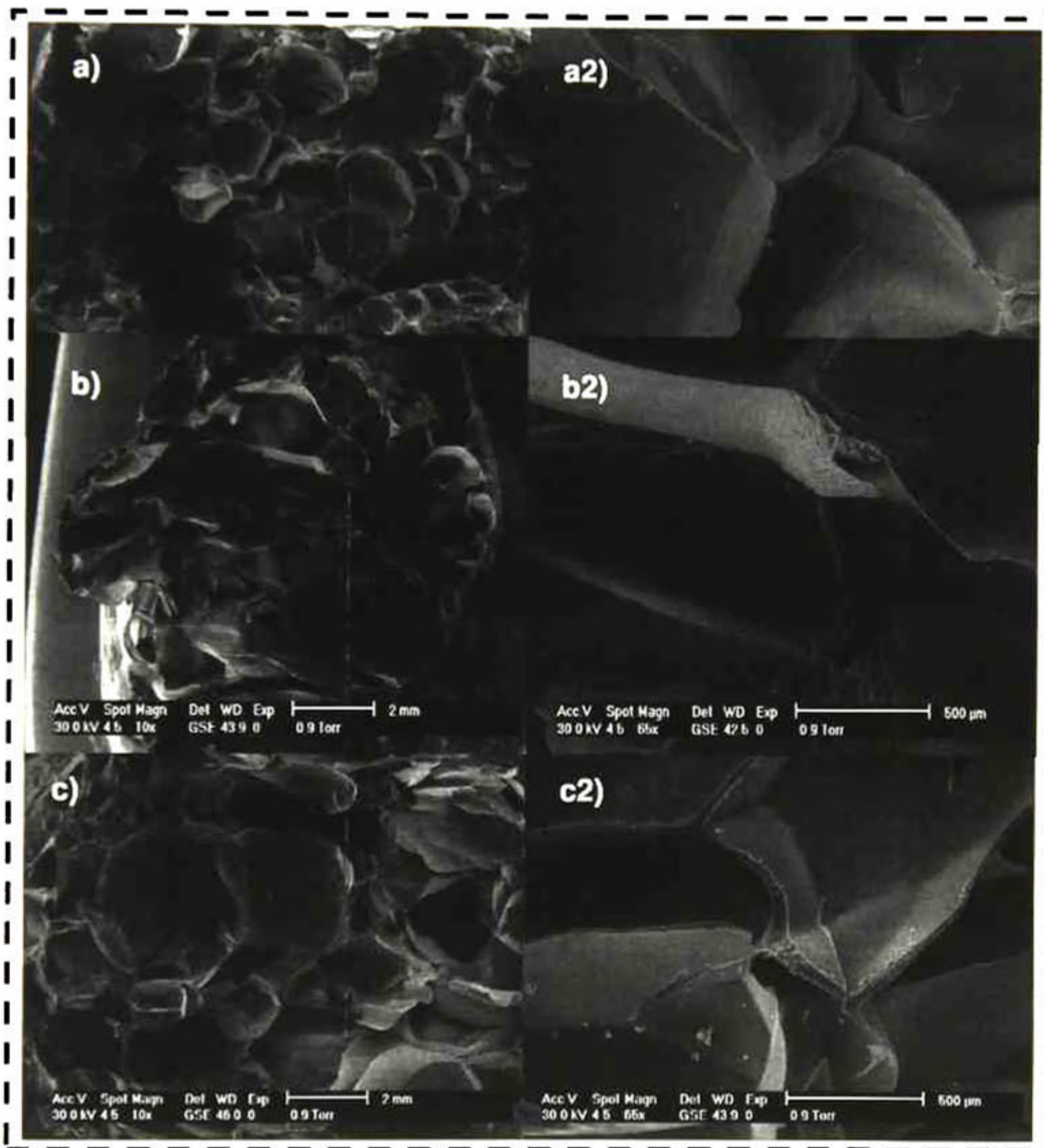


gránulos de almidón hinchados que estaban más o menos fusionados. Por lo tanto, grandes espacios vacíos se podría formar en lugar de celdas de aire (Reeve y Walker 1969).



**Figura 16.** Microfotografías del tratamiento T4 de botanas de tercera generación a) botana control a 10x, a2) botana control 65x; b) botana con almidón fosfatado 10x, b2) botana con almidón fosfatado 65x; c) botana con almidón succinatado 10x, c2) botana con almidón succinatado 65x.





**Figura 17.** Microfotografías del tratamiento T7 de botanas de tercera generación a) botana control a 10x, a2) botana control 65x, b) botana con almidón fosfatado 10x, b2) botana con almidón fosfatado 65x, c) botana con almidón succinatado 10x, c2) botana con almidón succinatado 65x.



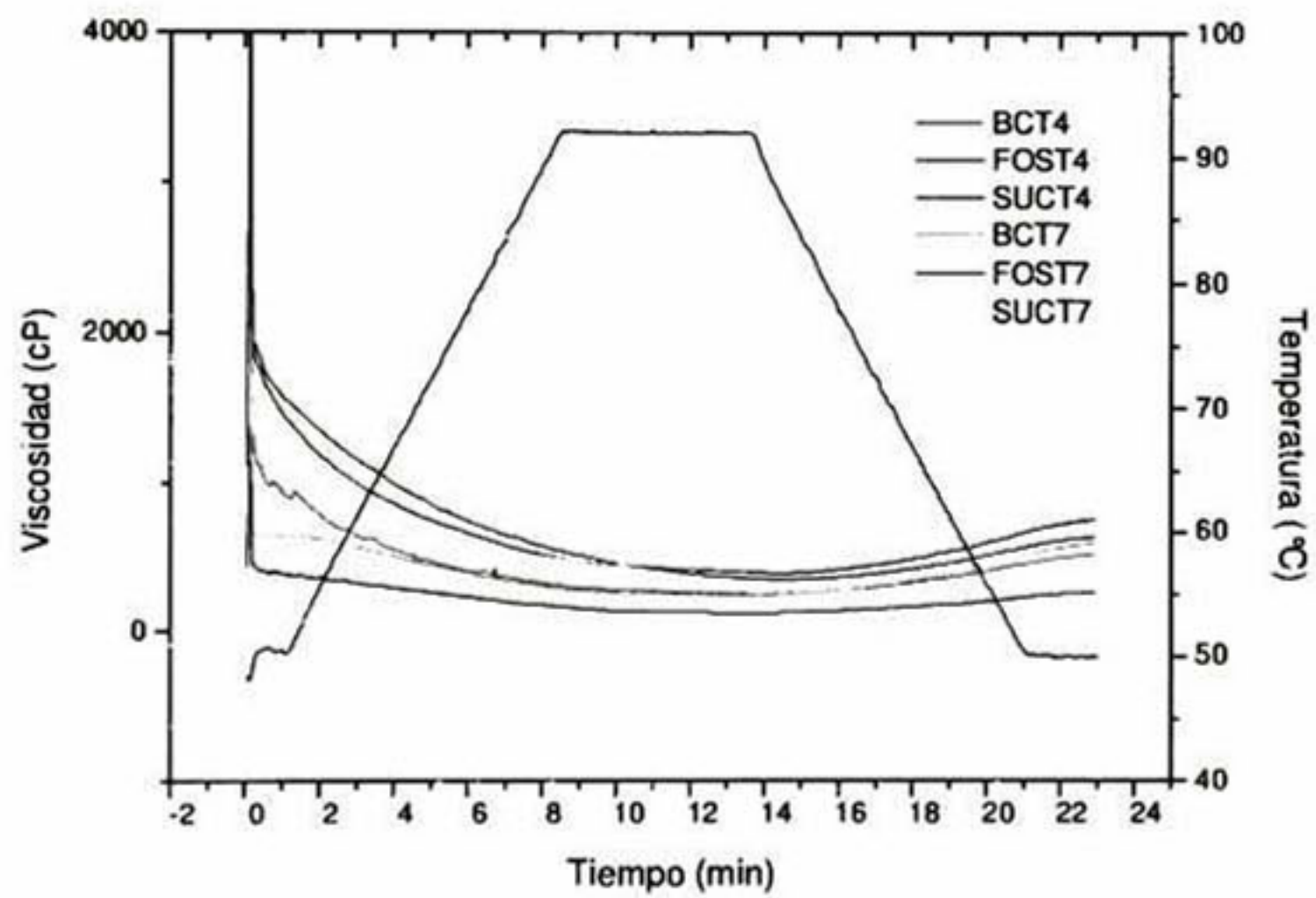
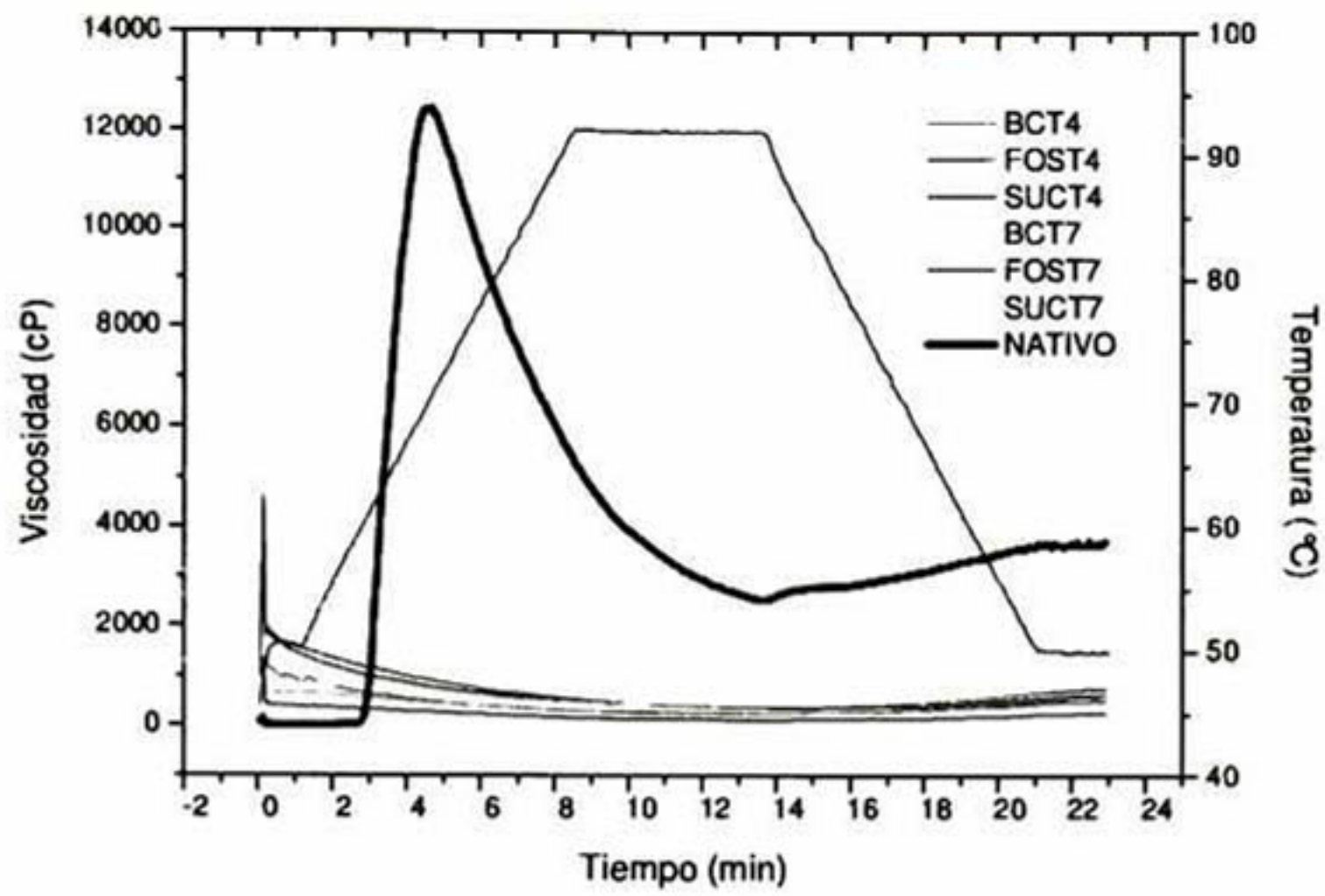
#### **6.2.2.4 Perfiles de viscosidad (RVA)**

En la gráfica 45a) se muestran los perfiles de viscosidad del almidón nativo y las botanas de tercera generación elaboradas por extrusión y expandidas por microondas; se puede observar que al inicio del análisis las muestras presentan una viscosidad inicial que disminuye hasta valores que van de 80 a 2000 cP; sin embargo, al calentarla y con ayuda de agitación, la viscosidad disminuye hasta llegar a un rango de 80-500 cP.

Lo anterior corrobora lo reportado por Lee y col., (2000), quienes reportaron que las mejores características fisicoquímicas de productos de tercera generación, elaborados por extrusión se presentan cuando hay una degradación parcial del almidón.

Resultados similares han sido reportados por Carvalho y col., (2002), durante la evaluación de los parámetros de extrusión en las propiedades físicas de pellets elaborados a partir de harinas de trigo, arroz y plátano. Estos autores encontraron que los perfiles de viscosidad fueron fuertemente influenciados por el contenido de humedad de las mezclas a extrudir, incrementando cada uno de los valores al incrementar el contenido de humedad y por la temperatura de extrusión, la cual, al incrementarla a temperaturas mayores de 80°C se presentó un menor valor de viscosidad. Esto ocurre, de acuerdo con los autores, debido a que a altas temperaturas la masa se vuelve plástica y menor vidriosa, permitiendo que las moléculas vuelvan susceptibles a la acción de corte. De esta forma se tiene una mayor acción térmica y mecánica, resultando en una mayor degradación del almidón y consecuentemente, obteniéndose menores valores de viscosidad.





**Gráfica 45.** Perfiles de viscosidad de tratamientos  $T_4$  y  $T_7$  de botanas control (BC), botanas con almidón fosfatado (FOS) y botanas con almidón succinatado (SUC) a) con almidón nativo, b) sin almidón nativo de botanas de tercera generación.



## **7. PERSPECTIVAS**

La industria alimentaria, que hasta hace poco más de 100 años solo podía ofrecer productos a un número limitado de personas cercanas a las fuentes de producción, al día de hoy permite proporcionar a más público mayor cantidad de productos de manera económica, conveniente y con más y mejores opciones para elegir.

El desarrollo de botanas representa hoy un desafío para la industria alimentaria, ya que está obligada a pensar en salud y nutrición, conceptos que antiguamente no estaban ligados a esta categoría de productos. Las alternativas para elaborar productos enriquecidos con vitaminas, minerales y fibras, se tornan muy valorizadas.

El presente proyecto pretende dar una alternativa viable con materias primas biodisponibles y fácilmente modificables para la elaboración de botanas que proporcionan cualidades parecidas a la fibra insoluble, usando almidones modificados químicamente y de esta manera solucionar el presente y creciente problema de nutrición y obesidad en la población adulta e infantil.



## 8. CONCLUSIONES

Las modificaciones químicas realizadas al almidón contenido en las botanas de segunda generación o productos directamente expandidos influenciaron de manera positiva el *IE* y *DA*.

La modificación química por el proceso de extrusión fraccionó el almidón nativo e indujo la formación de enlaces entrecruzados derivando en un aumento en el contenido de *AR*.

El *IAA* e *ISA* de los productos directamente expandidos aumentaron debido a la fragmentación de almidón que provocó la formación de almidón resistente.

Los mejores tratamientos para las botanas de segunda generación fueron *T<sub>4</sub>* y *T<sub>7</sub>* debido a que presentaron valores: altos de *IE*, bajos de *DA*, superiores a 80 en la escala de *L*, intermedios de *IAA* e *ISA* y *FP* bajas.

Las botanas con almidón succinatado presentaron menores fuerzas de penetración y *DA*, mayores *IE* y *L* que las botanas control y las botanas con almidón fosfatado, debido a que la cantidad de reactivo usado para su modificación fue suficiente para la formación de *AR* pero no provocó el colapso de las células de aire formadas durante la expansión.

Es viable la producción de botanas con alto contenido de almidón resistente directamente expandidas por extrusión en una sola etapa, consiguiendo para las botanas con almidón succinatado, características similares a los productos comerciales.

El tiempo óptimo de expansión en microondas para las botanas de tercera generación fue de 30s.



Las modificaciones químicas hechas a las botanas de tercera generación aumentaron el contenido de *AR*, sin embargo no es distinguible una diferencia en el *IE* y *DA* de las botanas control y fosfatadas.

El tamaño de célula de aire más pequeño correspondió a la botana control de 3<sup>a</sup> generación.

Los análisis de *DSC*, rayos X y *RVA* confirman que la materia prima utilizada para las formulaciones de las botanas de tercera generación, fue transformada completamente, lo que indica la formación de *AR*.

Es viable la producción de botanas de tercera generación con elevado contenido de *AR* mediante la modificación química por extrusión de almidón de papa.



## 9. APÉNDICES

**APÉNDICE 1:** Diseño experimental para la elaboración de productos directamente expandidos (Botanas de 2ª generación) ( $\alpha=1.414$ )

tratamiento	Variables independientes			
	Codificadas		Decodificadas	
	X1	X2	Temperatura (°C)	Vel. De tornillo (Hz)
1	-1	-1	150	45
2	1	-1	150	55
3	-1	1	170	45
4	1	1	170	55
5	-1.414	0	160	42.93
6	1.414	0	160	57.07
7	0	-1.414	145.58	50
8	0	1.414	174.41	50
9	0	0	160	50
10	0	0	160	50
11	0	0	160	50
12	0	0	160	50
13	0	0	160	50

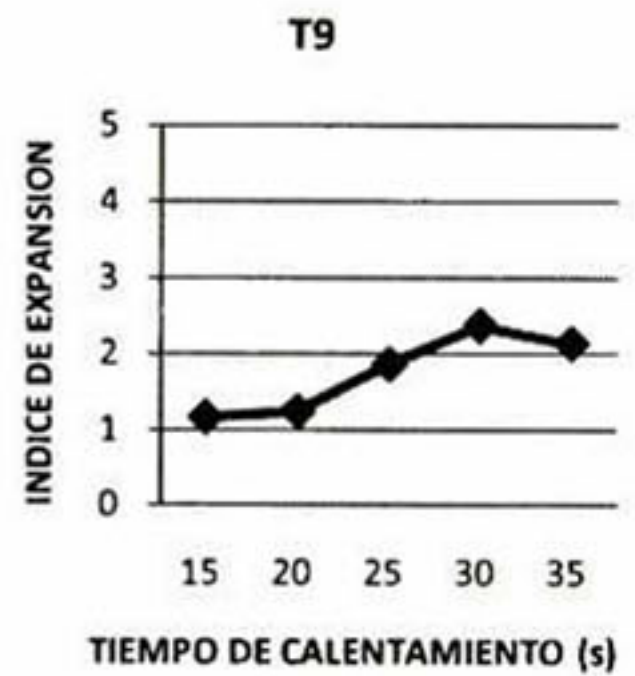
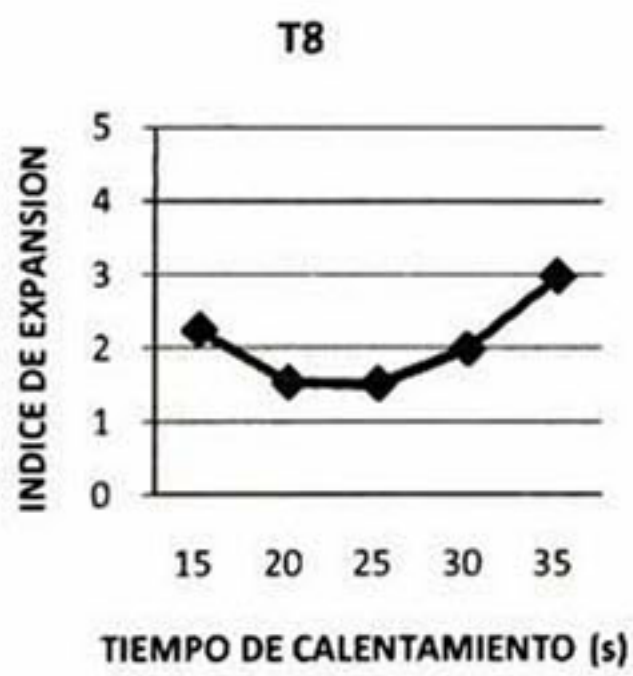
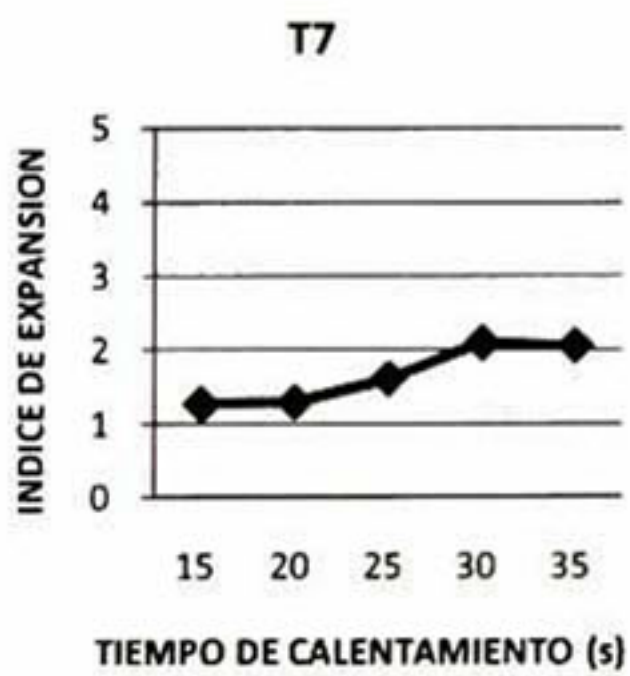
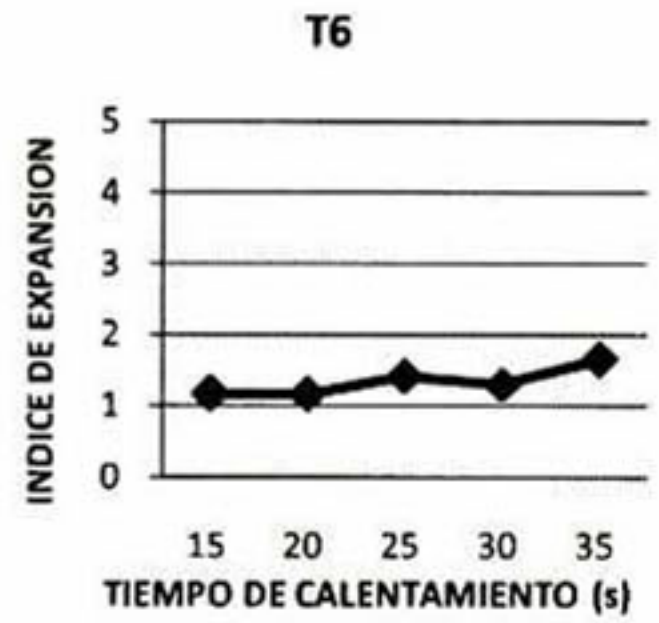
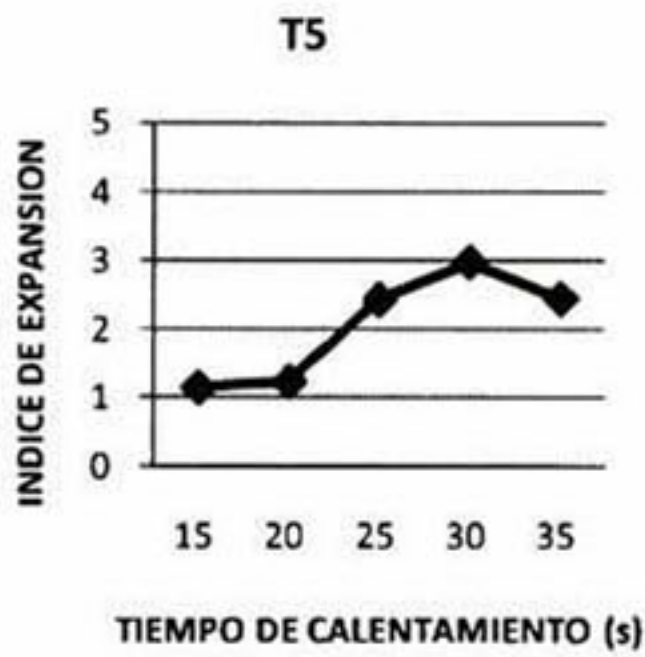
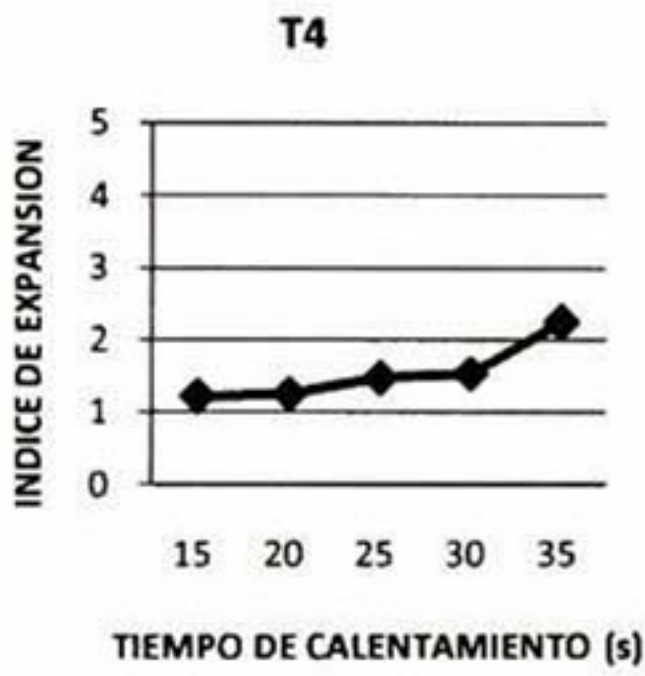
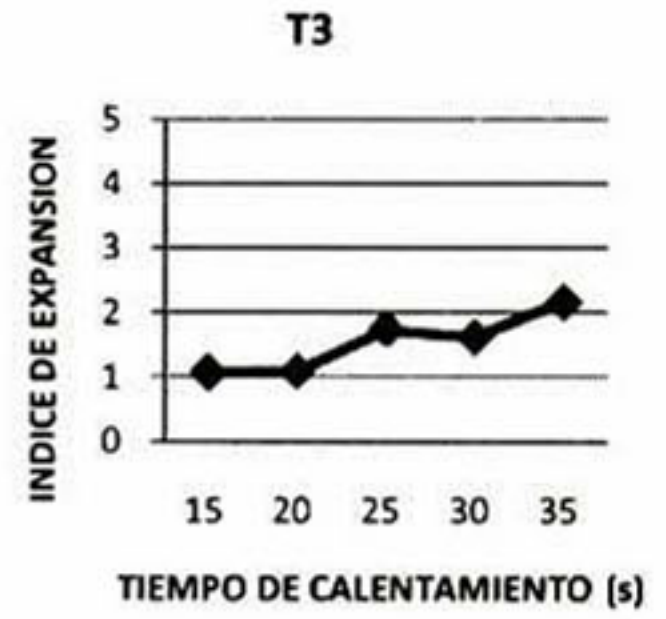
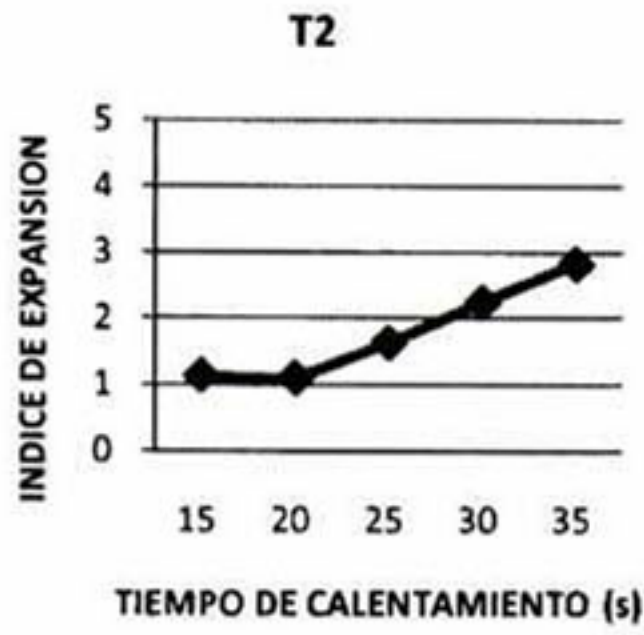
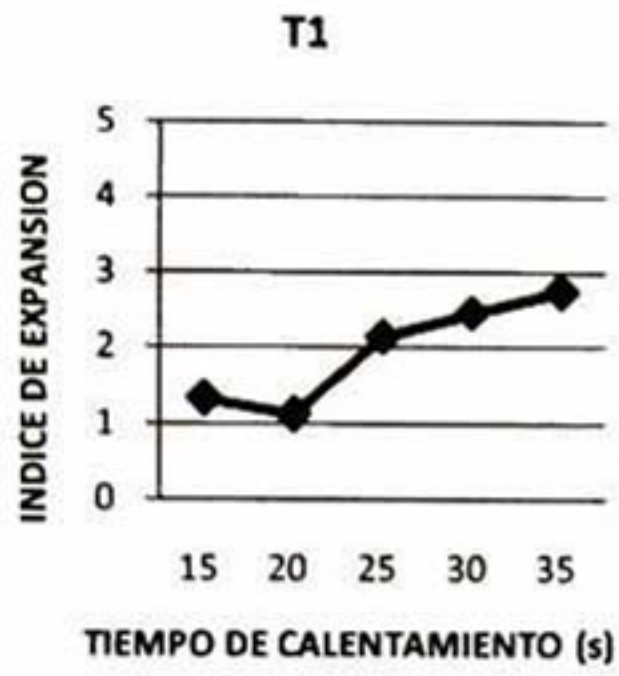


**APÉNDICE 2:** Diseño experimental para la elaboración de Botanas de 3ª generación ( $\alpha=1.414$ )

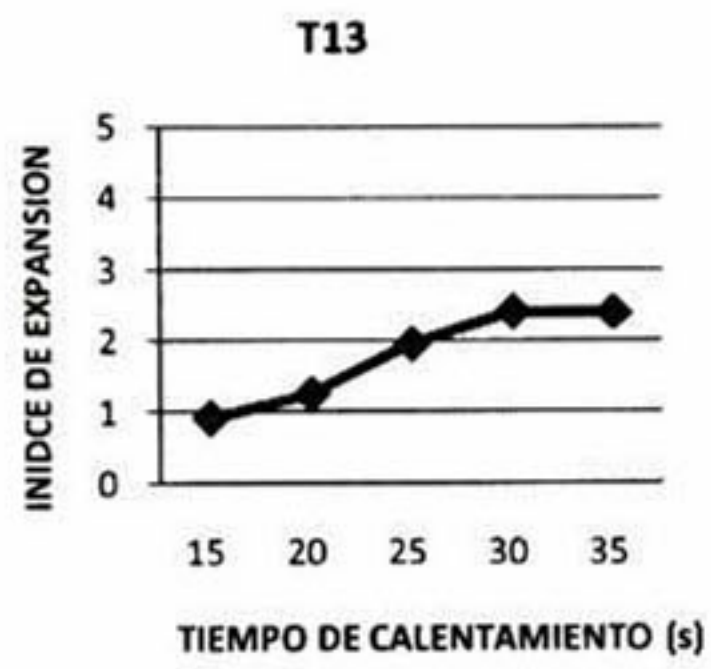
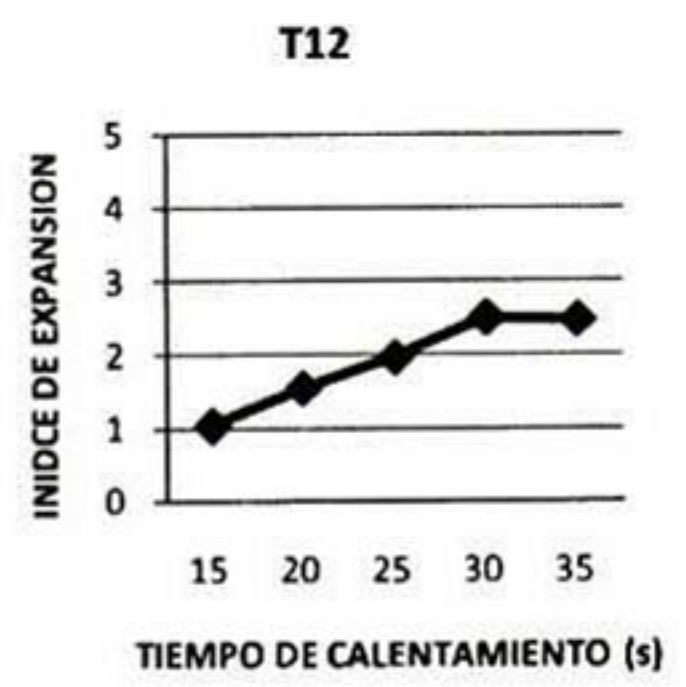
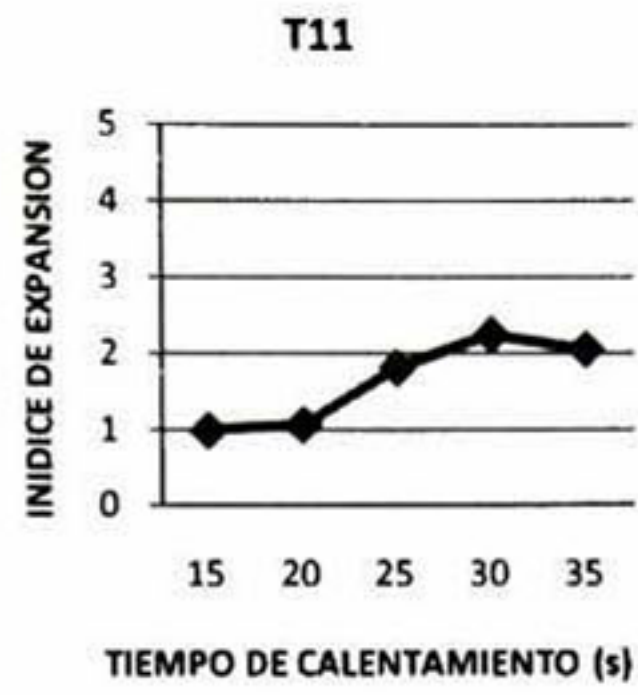
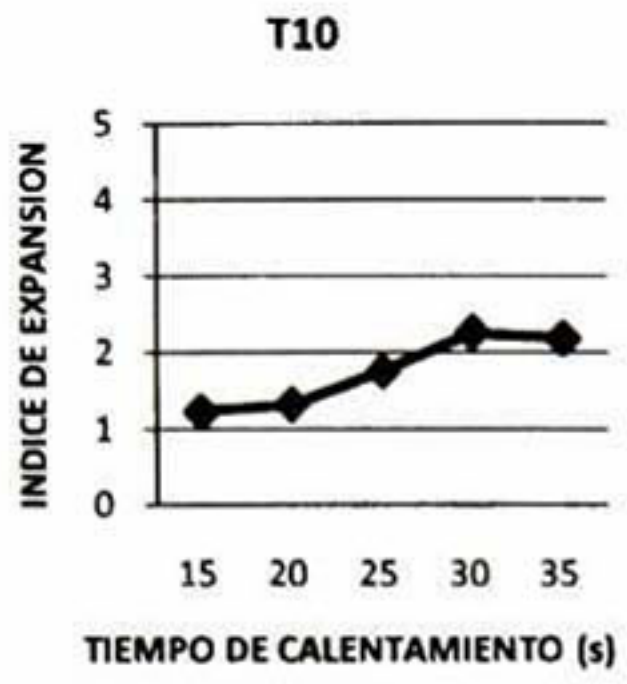
tratamiento	Variables independientes			
	Codificadas		Decodificadas	
	X1	X2	Humedad (%)	Temperatura (°C)
1	-1	-1	25	150
2	1	-1	25	150
3	-1	1	35	170
4	1	1	35	170
5	-1.414	0	30	160
6	1.414	0	30	160
7	0	-1.414	22.93	145.58
8	0	1.414	37.07	174.41
9	0	0	30	160
10	0	0	30	160
11	0	0	30	160
12	0	0	30	160
13	0	0	30	160



**APÉNDICE 3:** Cinética de expansión para las botanas control de tercera generación.

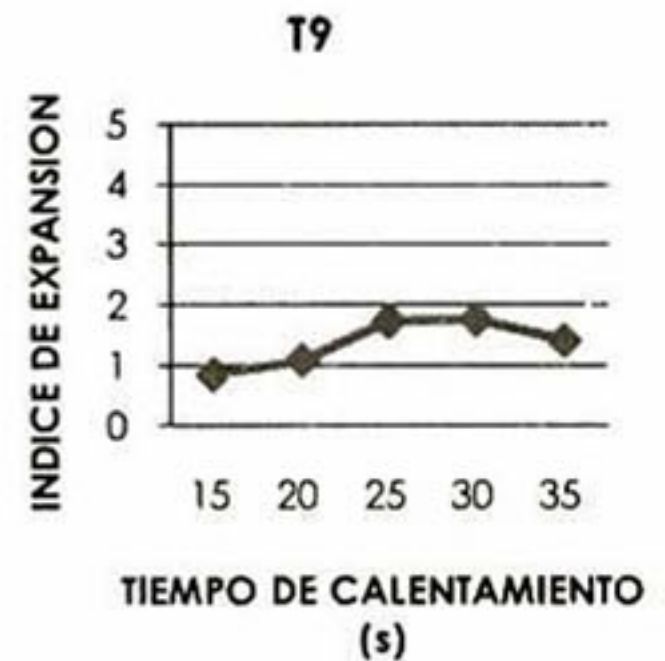
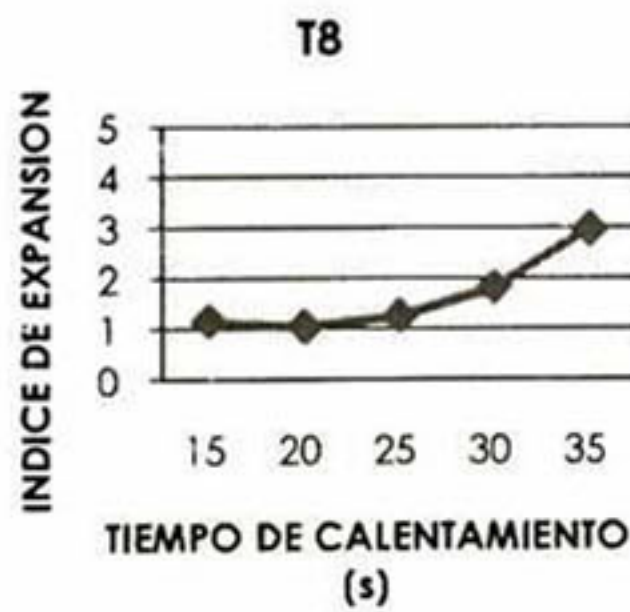
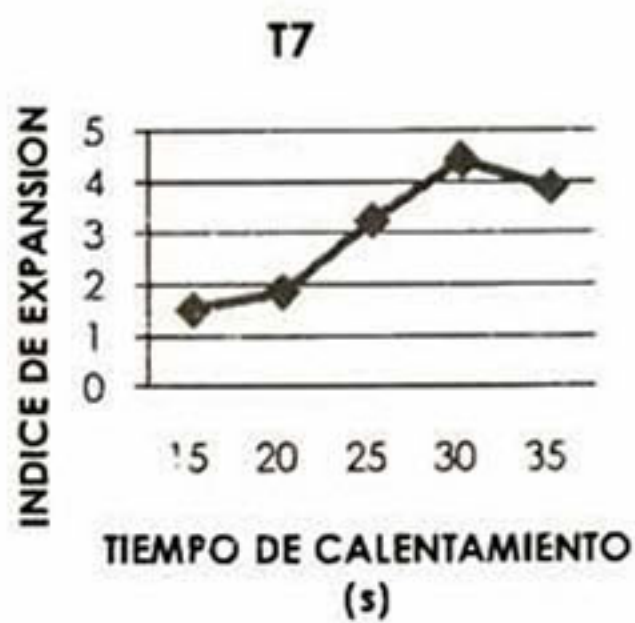
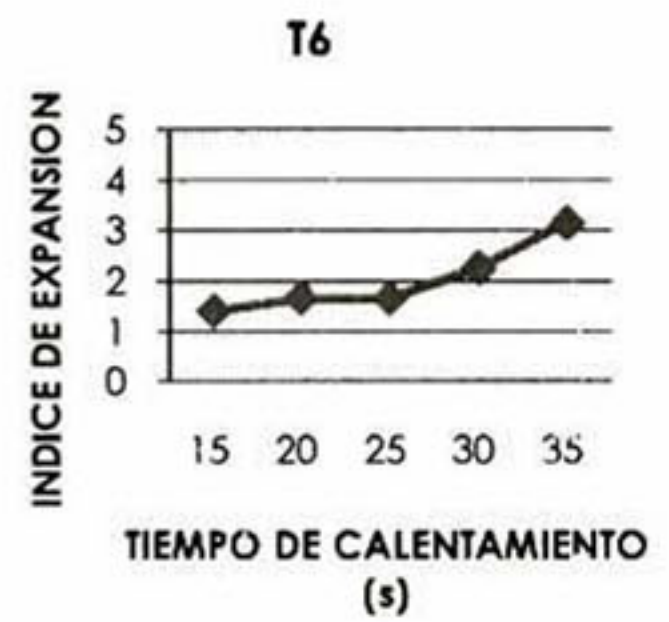
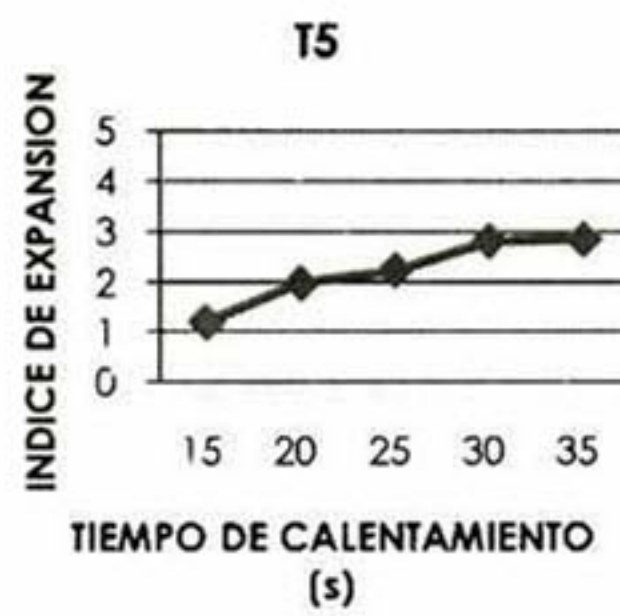
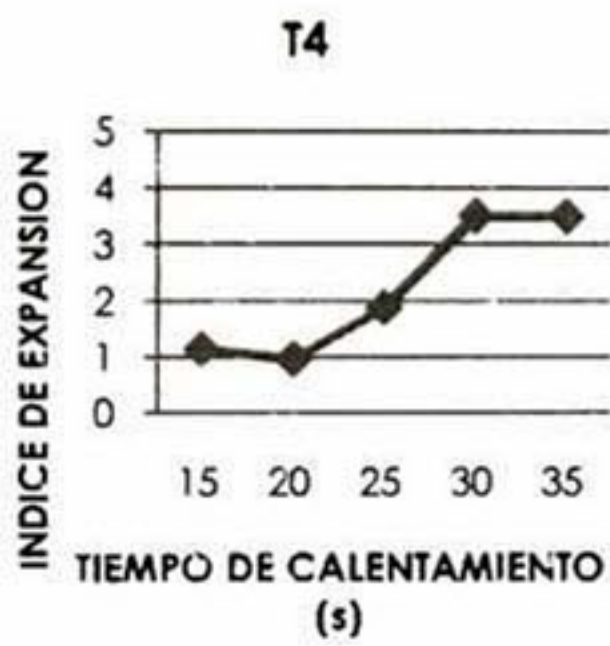
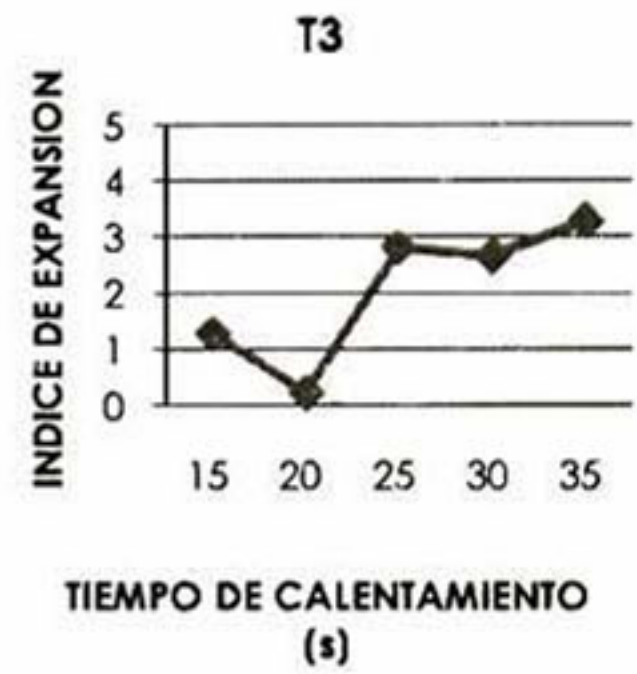




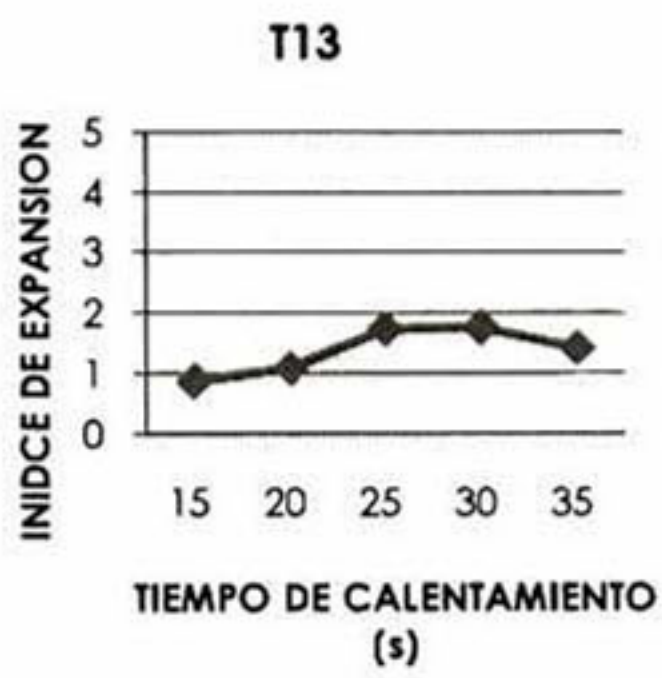
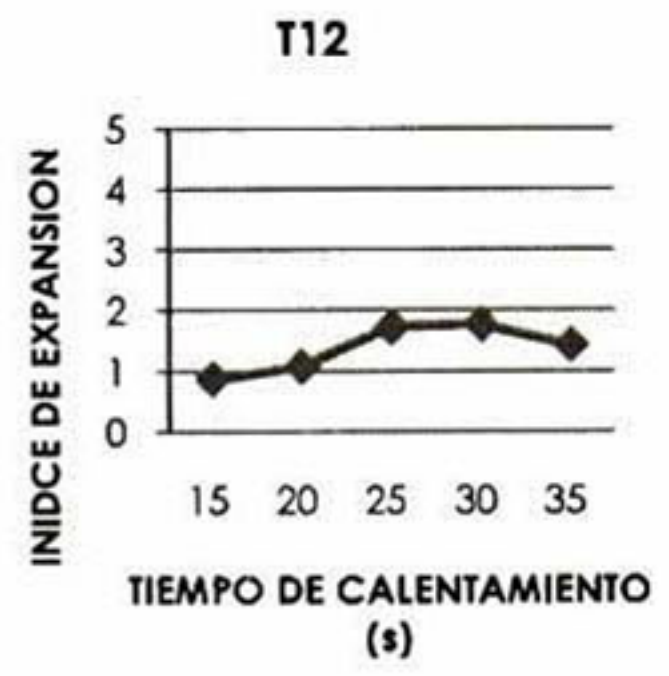
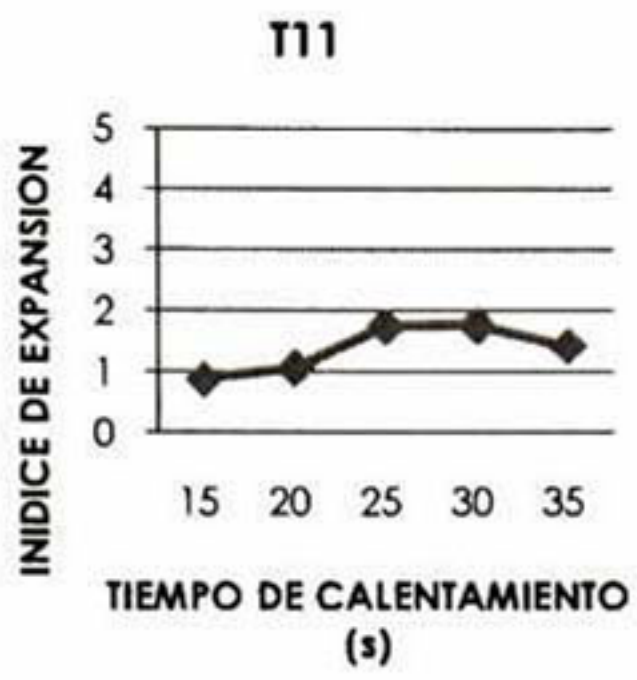
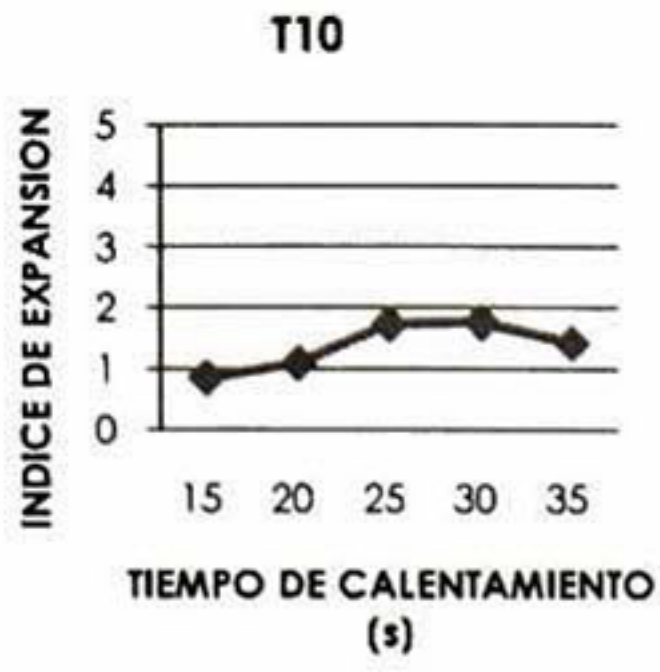




**APÉNDICE 4:** Cinética de expansión para las botanas de tercera generación con almidón fosfatado.

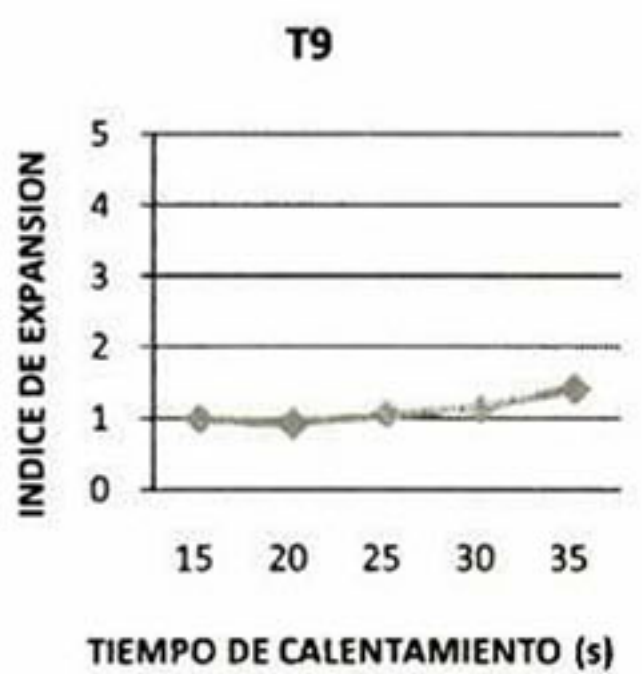
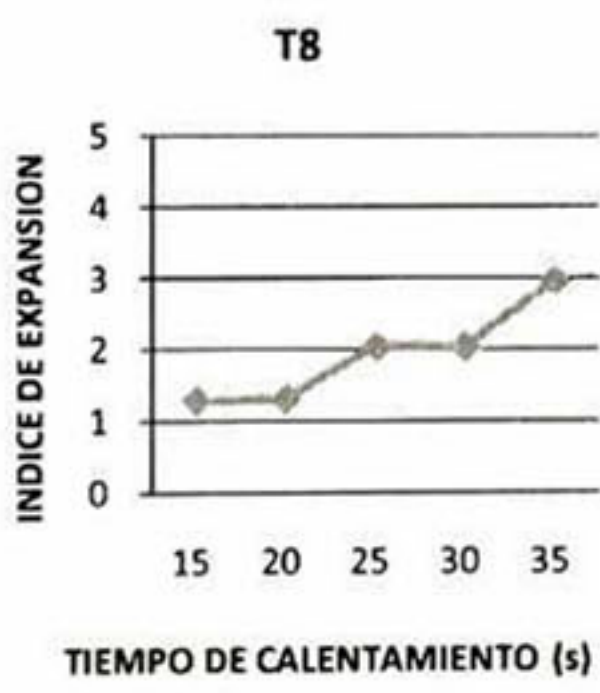
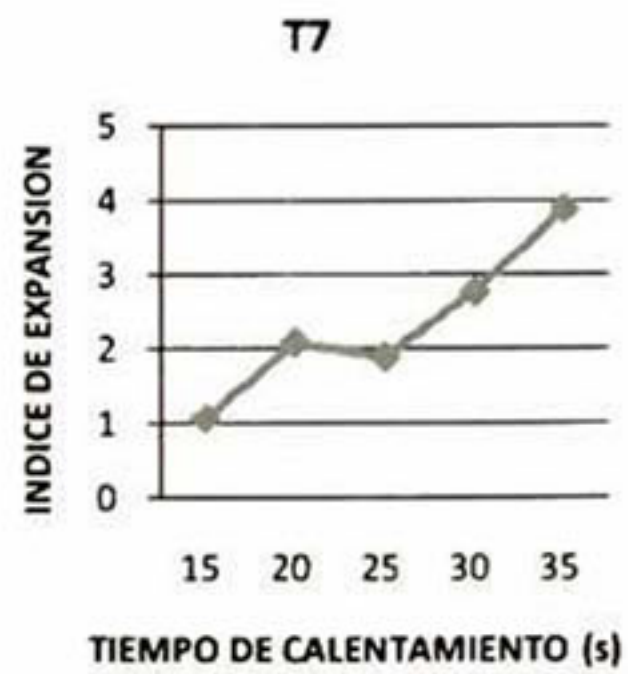
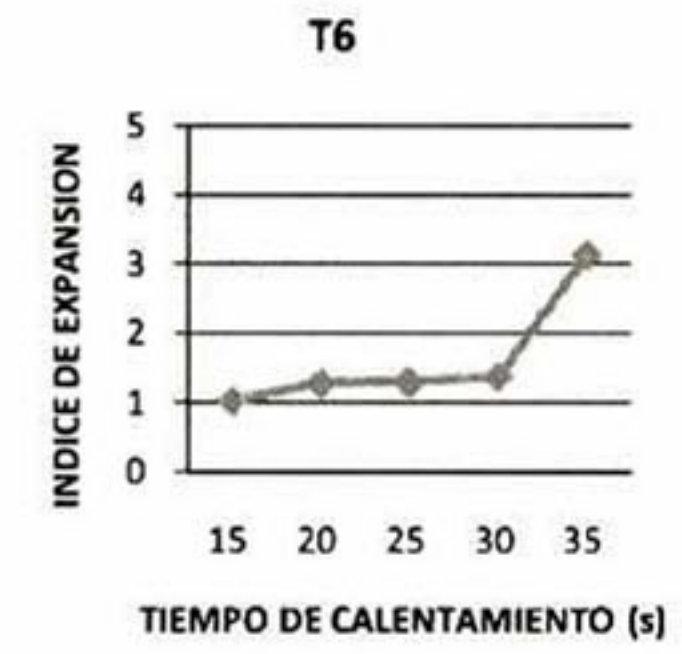
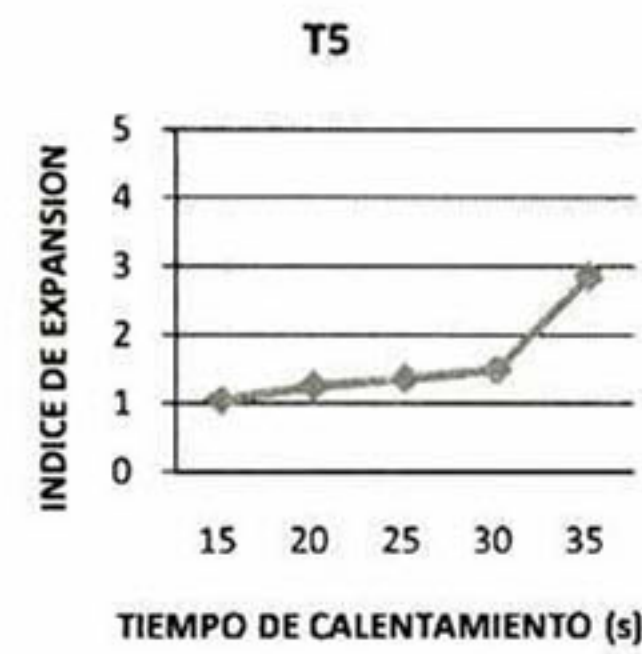
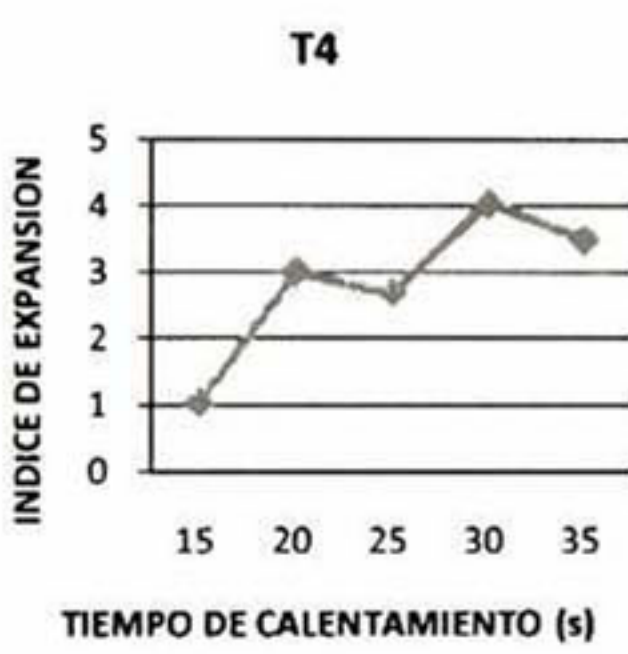
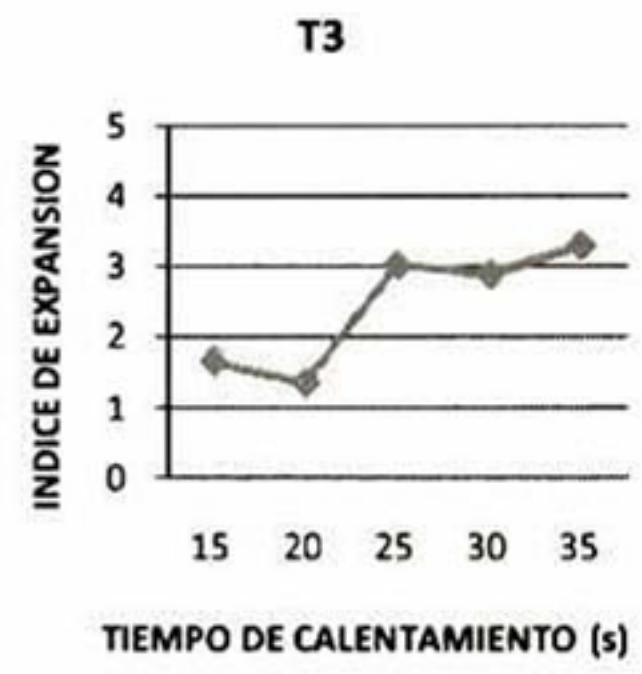
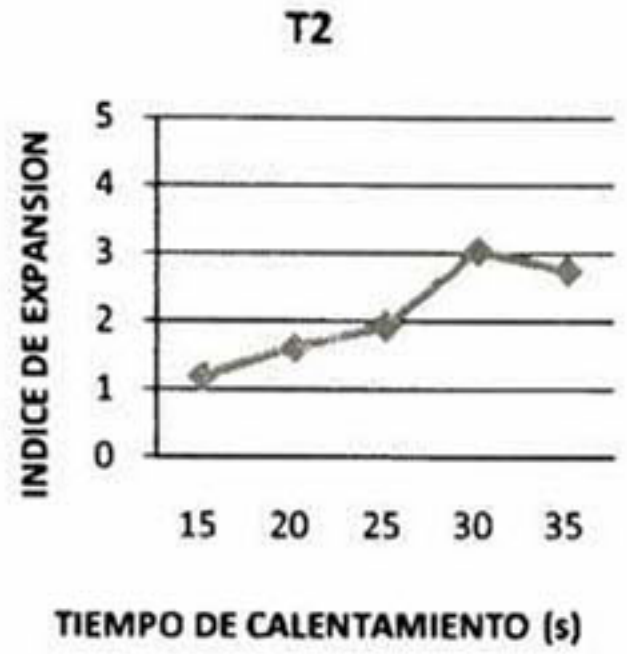
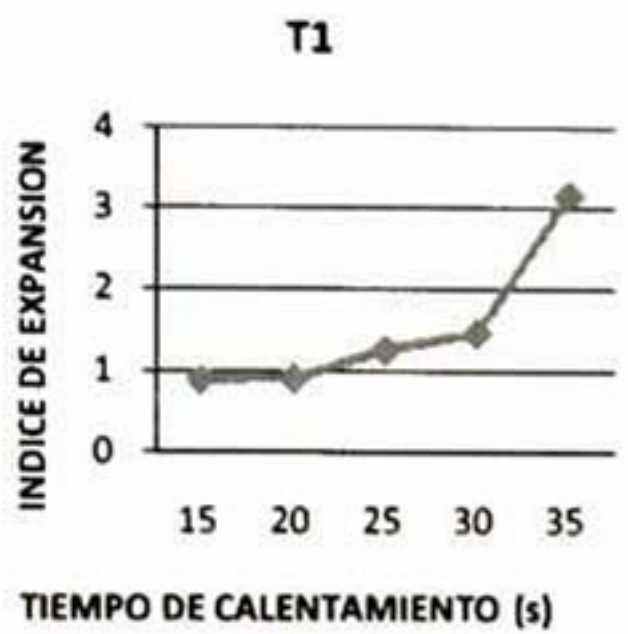




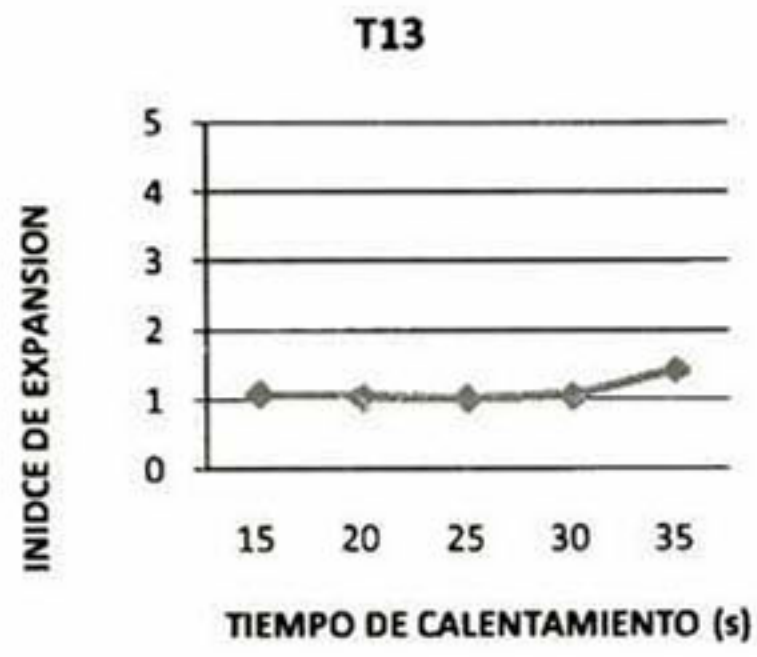
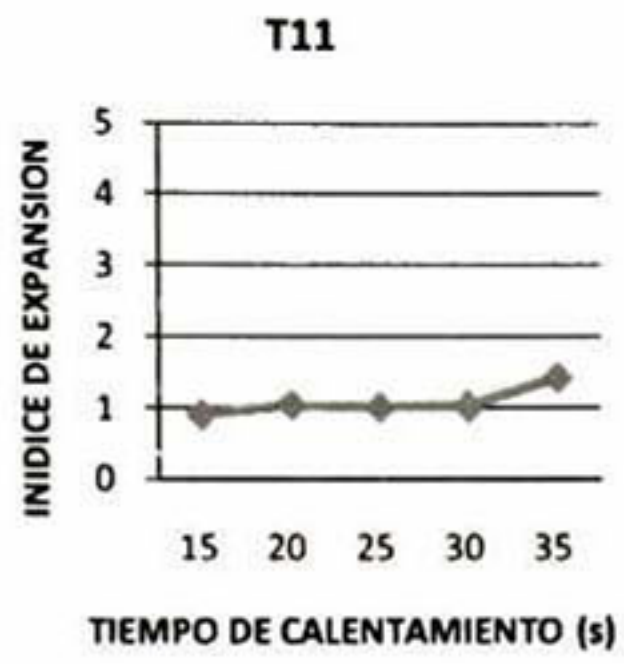
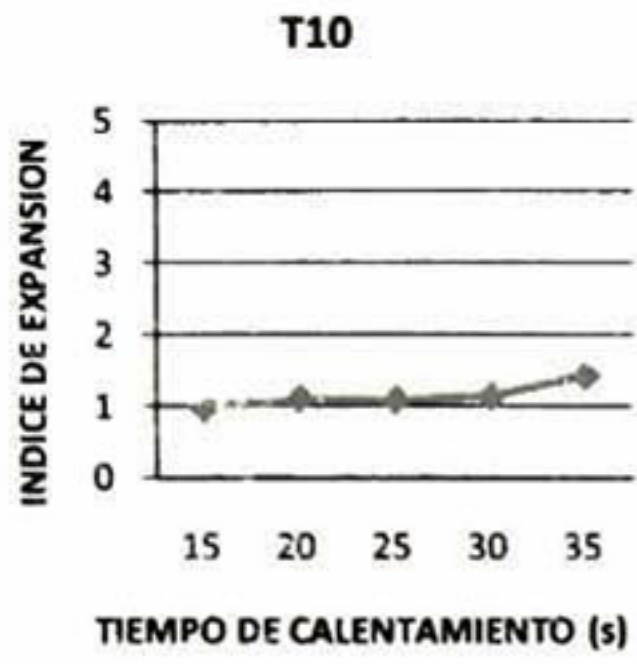




**APÉNDICE 5:** Cinética de expansión para las botanas de tercera generación conteniendo almidón succinatado.









## 10. BIBLIOGRAFÍA

- AACC (1999). *Methods of the AACC*. 9th ed. American Association of Cereal Chemists. Academic Press Inc. St. Paul Minnesota. U.S.A.
- Aboubacar B. y Hamaker R. 2000. Low molecular weight soluble starch and its relationships with Sorghum Couscous stickiness. *Journal of Cereal Science* 31: 119-126.
- Aguilar P. E. 2004. Caracterización fisicoquímica y microestructural de botanas de tercera generación elaboradas por extrusión. Tesis de Maestría. Universidad autónoma de Sinaloa. Facultad de ciencias químico-biológicas. Maestría en ciencia y tecnología de los alimentos.
- Aguilar P. E., Zazueta M. J. de J. and Martínez B. F 2006. Preparation of High-Quality Protein-Based Extruded Pellets Expanded by Microwave Oven. *cereal chemistry* 83(4):363–369.
- Aguilar P. E., Zazueta M, J. de J., Harumi E. N. and Martínez B. F. Optimization of extrusion process for production of nutritious pellets. 2010. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 32(1):1-9.
- Anderson R. A., Conway H. F., Pfeiffer U. F. and Griffin R. L. 1969. Gelatinization of corn grits by roll-and extrusion-cooking. *Journal of Cereal Science. Today* 14(1): 4-12.
- Annison G. 1994. Nutritional Role of Resistant Starch Chemical-Structure vs Physiological-function. *Annual Review of Nutrition* 14 (103): 297-320.
- Aparicio T. M. A., Waliszewski K. N., Bello P. L. A. and Monroy, J. A. 2003. Changes of banana starch by chemical and physical modification. *Carbohydrate Polymers* 52, 237-242.



- Arias G. R. M., Chávez C. A. E., Herrera N. R., Morales De León J., Pedroza I. R., Salazar Z. A., and Durán De B. C. 2007. Condiciones de operación de extrusores de tornillo simple para mezclas de harina de trigo. Parte 1: Pruebas de laboratorio. Tecnología Ciencia Educación Ed. IMIQ 22:53-66.
- Arimi J. M., Duggan E., O'Sullivan M., Lyng J. G. and O'Riordan E. D.. 2008. Effect of refrigerated storage on water mobility and microwave expansion of imitation cheese containing resistant starch. *Journal of Food Engineering* 89(3):258-266.
- Arimi J. M., Duggan E., O'Sullivan M., Lyng J. G., O'Riordan E. D.. 2011. Effect of protein:starch ratio on microwave expansion of imitation cheese-based product. *Food Hydrocolloids* 25:1069-1076
- Ascheri J.L.R., Ciacco CF, Riaz M.N. y Lusas E.W. 1995. Efecto de la formulación sobre la expansión y viscosidad de snacks (pellets) producidos por extrusión termoplástica. *Alimentaria, Madrid* 33(309):101-106.
- Baker A. A., Miles M.J. and Helbert W. 2001. Internal structure of the starch granule revealed by AFM. *Carbohydrate Research* 330(2):249-256.
- Baixauli R., Sanz T., Salvador A. and Fiszman S. M. 2008. Muffins with resistant starch: Baking performance in relation to the rheological properties of the batter. *Journal of Cereal Science* 47(3): 502-509.
- Ballón A. E., Cerrón P., Rodolfo E., Chambi A., Chambi Q. E. y Torres C. 2000. Nombres quechumaras de la papa, Terminología agraria andina. Cuzco: Centro de Estudios Regionales Andinos Bartolomé de las Casas (CBC), Centro Internacional de la Papa (CIP).



- Bhandari P. N. and Singhal R. S. (2002). Effect of succinylation on the corn and amaranth starch pastes. *Carbohydrate Polymers*, 48:233–240.
- Bastos C. I. 2000. Aproveitamento de batata (*Solanum tuberosum* L.) desclassificada a comercialização para obtenção e caracterização de produtos expandidos intermediários (half products) por tecnologia de extrusão. Tesis de licenciatura. Departamento de tecnologia de alimentos UNICAP. Campinas, Brasil.
- Bastos C. I., Zazueta M. J. de J., Martínez B. F. and Kil C. Y. 2007. Development and Characterization of Extruded Pellets of Whole Potato (*Solanum tuberosum* L.) Flour Expanded by Microwave Heating. *Cereal chemistry* 84(2):137–144
- Benítez A. A. 1998. La botana, negocio serio. *Tecnología de Alimentos, Industria y Mercado* 33(5):26-34.
- Bhosale R. and Singhal R. 2006. Process optimization for the synthesis of octenyl succinyl derivative of waxy corn and amaranth starches. *Carbohydrate Polymers* 66(4): 521-527.
- Biliaderis C. G. 1998. Structures and phase transitions of starch polymers. In R. H. Walker (Ed.), *Polysaccharide association structures in food* (pp. 57–168). New York: Marcel Dekker, Inc.
- Bingham S. A., Day N. E. and Luben R. 2003. Dietary fibre in food and protection against colorectal cancer in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition (EPIC): An observational study 361: 1496–1501.
- Brown W. E. 1981. *Handbook of Plastics Test Methods*. 2nd ed. George Godwin. London. Pp. 423.



- Brown I., Conway P. and Topping D. 2000. The health potential of resistant starches in foods, an Australian perspective. *Scandinavian Journal of Nutrition* 44: 53–58.
- Buléon A., Colonna P., Planchot V. and Ball S. 1998. Starch Granules: Structure and Biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*. 23(2):85-112
- Bushuk W. 2001. In *Rye: Production, Chemistry and Thechnology*. Second edition. (Ed. Bushuk, W.) American Association of Cereal Chemists Inc. (AACC). St. Paul, Minnessota, USA.
- Buttriss J.L. and Stokes C. S. 2008. Dietary fibre and health: an overview. *Nutrition Bulletin* 33(3):186-200.
- Brümmer T., Meuser F., Lengerich B. V. and Niemann C. 2002. Extrusion cooking on molecular parameters of corn starch. *Starch* 54:1-8.
- Camire M. E., Camire A. and Krumhar K. 1990. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 29(1):35-57.
- Carvalho R. V., Ascheri J. L. R., Cal-Vidal J. 2002. Efeito dos parâmetros de extrusao nas propiedades físicas de pellets (3G) de misturas de farinhas de trigo, arroz e banana. *Ciência e Agrotecnologia Lavras* 26(5): 1006-1018.
- Cárabez T, A., Paredes L, O., and Reyes M, C. 1989. Microstructure of cotyledon cell from hard-to-cook common beans. *Starch* 41(9): 335-339.



- Case S. E., Hamann D. D. and Schwartz S. J. 1992. Effect of starch gelatinization on physical properties of extruded wheat-and corn-based products. *Cereal Chemistry* 69:401-404.
- Chang Y. H. and Lii C. Y. 1992. Preparation of starch phosphate by extrusion. *Journal of Food Science* 57:203-205.
- Charalampopoulos D., Wang R., Pandiella S. and Webb C. 2002. Application of cereal and cereal components in functional foods: a review. *International Journal of Food Microbiology* 79: 131-141.
- Charbonniere, R., Duprat, F., and Guilbot, A. 1973. Changes in various starches by cooking-extrusion processing: Physical structure of extruded products. *Cereal Science Today* 18:286
- Chaiyakul S., Jangchud K., Jangchud A., Wuttijumnong P. and Winger R. 2009. Effect of extrusion conditions on physical and chemical properties of high protein glutinous rice-based snack. *Food Science and Technology* 42:781–787.
- Cheftel H. and Pierre B. 1989. *Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los Alimentos*. Vol. II; prólogo de Pierre Desnuelle; Traducido del francés Por Francisco López Capont Zaragoza: Acribia, DL.
- Chen C. M. and Yeh A. L. 2000. Expansion of rice pellets: Examination of glass transition and expansion temperature. *Journal of Cereal Science* 32:137-45.
- Chinnaswamy R., Hanna M. A., Zobel H. F. 1989. Microstructural, physiochemical, and macromolecular changes in extrusion-cooked and retrograded maize starch. *Cereal Foods World* 34: 415–423.



- Colonna P. and Mercier C. 1983. Macromolecular modifications of manioc starch components by extrusion-cooking with and without lipids. *Carbohydrate Polymers* 3:87-108.
- Colonna P., Tayeb J. and C. Mercier. 1989. Extrusion cooking of starch and starchy products. In: *Extrusion Cooking*. Mercier, C., P. Linko, and J.M. Harper (eds). American Association of Cereal Chemists Inc. (AACC). St. Paul, Minnesota, USA. pp: 247-319.
- Cousidine D. M. 1982. *Foods and Food Production Encyclopedia*. John Wiley Inc., NY. pp. 142.
- Delgado N. C., Aguilar P. E., Gallegos I. A., Rocha G. N., Zazueta M. J. de J. and Caro C. J. de J. 2011. Characterization and Optimization of Extrusion Cooking for the Manufacture of Third-Generation Snacks with Winter Squash (*Cucurbita moschata* D.) Flour. Artículo en proceso de publicación. *Cereal Chemistry*.
- Dziekak J. D. 1989. Single and Twin-screw Extruder in Food Processing. *Food Technology* 43(4): 164-174.
- Eun Y. L., Kyung L., Jae-kag L. and Seung-Taik L. 2000. Effects of Gelatinization and Moisture Content of Extruded Starch Pellets on Morphology and Physical Properties of Microwave-Expanded Products. *Cereal Chemistry* 77(6):769–773.
- Faraj A., Vasanthan T. and Hoover R. 2004. The effect of extrusion cooking on resistant starch formation in waxy and regular barley flours. *Food Research International* 37:517–525.



- Fellows P 2007. Tecnología del procesado de los alimentos. 2a edición, Ed. Acribia, España.
- Ferguson I. B., Ben Y. S., Mitcham E.J., McDonald, R.E. and Lurie S. 2000. Postharvest heattreatments: introduction and workshop summary. *Postharvest Biology and Technology* 21(1): 1–6.
- Fengwei X., Long Y., Hongshen L. and Ling C. 2006. Starch Modification Using Reactive Extrusion. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, CMIT, Melbourne, Australia.
- Fuentes Z, E., Sanchez Z, E. Sendra E., Sayas E., Navarro C., Fernandez L. J. and Perez A. J. A. 2011. Resistant starch as prebiotic: A review. *Starch* 63:406–415.
- Gómez M. H. and Aguilera J. M. 1984. A physicochemical model for extrusion of corn starch. *Journal of Food Science* 49:40-43.
- González S. R. A., Sánchez H. L., Solorza F. J., Núñez S, C., Flores H. E. and Bello P. L. A. 2006. Resistant Starch Production from Non-conventional Starch. Sources by Extrusion. *Food Science and Technology International* 12(1):5–11.
- Goñi I., García D. L, Mañas E. and Saura C. F. 1996. Analysis of resistant starch: A method for foods and food products. *Food Chemistry* 56: 445- 449.
- Gujska E. and Khan K. 1991. Effect of temperature on properties of extrudates from high starch fractions of navy, pinto bean meal (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Food Science* 55:466-469.
- Guy R. 2001. Extrusión de Alimentos. Editorial Acribia. S. A. Zaragoza España.



- Haralampu S. G. 2000. Resistant starch—a review of the physical properties and biological impact of RS3. *Carbohydrate Polymers* 41: 285–292.
- Harper J. M. 1981. *Extrusion of foods. Vol I and II.* CRC Press Inc. Boca Raton, Florida, USA.
- Harper J. 1989. Food extruders and their applications. In: *Extrusion Cooking.* C. Mercier, P. Linko, J.J. Harper (Eds). American Association of Cereal Chemists Inc. (AACC). St. Paul, MN. Pp. 1-15.
- Hasjim J. and J. Jane L. 2009. Production of Resistant Starch by Extrusion Cooking of Acid-Modified Normal-Maize Starch. *Journal of Food Science* 74:7.
- He g. Q., Song X. Y., Ruan H. and Chen F. 2006. Octenyl Succinic Anhydride Modified Early Indica Rice Starches Differing in Amylose Content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54(7): 2775–2779
- Hernández M. M., Torruco U. J., Chel G. L. y Betancur A. D. 2008. Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos en Yucatán, México. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 28(3): 718-726.
- Hsieh F., Peng I. C. and Huff H. E. 1990. Effects of salt, sugar and screw speed on processing and product variables of corn meal extruded with a twin-screw extruder. *Journal of Food Science* 55(1): 224-227.
- Huber G. R. and Rokey G. J. 1990. Extruder snacks. In Booth R G E D. *Snack foods.* Ed. AVI book. USA. Chapter 6. pp. 107- 137.



- Jane J. L. (1997). Starch functionality in food processing. En : Starch : Structure and Functionality. P. J. Frazier, A. M. Donald, P. Richmond, Eds. Cambridge: The Royal Society of Chemistry. Pp. 26-35.
- Jeon Y. S., Viswanathan A. and Gross R. A. 1999. Studies of starch esterification: Reactions with alkenyl-succinates in aqueous slurry systems. *Starch* 51(2-3): 90-93.
- Jobling S. 2004. Improving starch for food and industrial applications. *Current Opinion in Plant Biology* 7:210–218.
- Jovin H. and Jay-Lin J. 2009. Production of Resistant Starch by Extrusion Cooking of Acid-Modified Normal-Maize Starch. *Journal of Food Science* 74(7):C556–C562.
- Kim C. T., Kyonggi D., Shin F. F., Champagne E. T. and Diagle K. 1999. Effects of phosphorylating salts and temperature on the preparation of rice starch phosphates by extrusion. *Starch* 51(8-9):260-286.
- Kim M. J., Choi S. J., Shin S. I., Sohn M. R., Lee C. J., Kim Y., Cho W. Il., Moon T. W.. 2008. Resistant glutarate starch from adlay: Preparation and properties. *Carbohydrate Polymers* 74:787–796.
- Keenan M. J., Zhou J., McCutcheon K. L., Raggio A. M. and Bateman H.G. 2006. Effects of resistant starch, a non-digestible fermentable fiber, on reducing body fat. *Obesity* 14: 1523-1534.
- Koch H. D. and Koppers J. 1982. Analytical investigations on phosphate cross-linked starches. *Starch* 34:16-21.



- Krueger B. R., Knutson C. A., Inglett G. E. and Walker C. E. 1987. A Differential Scanning Calorimetry Study on the Effect of Annealing on Gelatinization Behavior of Corn Starch. *Journal of Food Science* 52(3):715 – 718.
- Chakraborty S. K., Singh D. S. , Kumbhar B. K. and Singh D. 2009. Process parameter optimization for textural properties of ready-to-eat extruded snack food from millet and legume pieces blends. *Journal of Texture Studies* 40:710–726.
- La Madrid A. A., Bernal G. L. A. and Morales M. M. G. 2009. Capacidad de adhesión y fermentación a gránulos de almidón de papa por bacterias ácido lácticas silvestres para evaluar su actividad como prebiótico. *Revista del Centro de Investigación, Universidad La Salle* 8(31):5-21.
- Lee E. Y., Ryu G. H. and Lim S. T. 1999. Effects of processing parameters on physical properties of corn starch extrudates expanded using supercritical CO<sub>2</sub> injection. *Cereal Chemistry* 76:63-69.
- Lee E. Y., Lim K. I. I., Lim J. K. and Lim S. T. 2000. Effects of gelatinization and moisture content of extruded starch pellets on morphology and physical properties of microwave-expanded products. *Cereal Chemistry* 77:769-773.
- Limón V. V., Aguilar P. E., Zazueta M. J. de J., Martínez B. F. and Caro C. J. de J., Hernández C. I.L. 2010. Physicochemical evaluation and optimization of enriched expanded pellets with milk protein concentrate. *Cereal Chemistry* 87(6):612-618.
- Liu Q. 2005. Understanding Starches and Their Role in Foods. In "Food Carbohydrates: Chemistry, Physical Properties, and Applications". Chapter 7. Taylor and Francis Group LLC.



- Maga J.A. y Liu, M.B., 1993. Hopi blue corn extrusion. *Development in Food Science* 32: 983-986.
- Meng X., Threinen M. Hansen D. and Driedger E. 2010. Effects of extrusion conditions on system parameters and physical properties of a chickpea flour-based snack. *Food Research International*. 43(2): 650-658.
- Mikulíková D., Masár Š., Kraic J. 2008. Biodiversity of legume health promoting. *Starch* 60:426-432.
- Moraru C. I. and Kokini J. L. 2003. Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 2:120-138.
- Morris V. J. 1990. Starch Gelation and Retrogradation. *Trends in Food Science and Technology* 1: 2-6.
- Morton J. 1997. *Procesamiento de Plásticos*. Ed LIMUSA-Noriega Editores. México D.F. Pag 13-25.
- Mua J. P. and Jackson D. S. 1997. Fine structure of corn amylase and amylopectin fractions with various molecular weights. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 45:3840-3847.
- Murúa P. B., Beristain G. C. I., Martínez B. F. 2009. Preparation of starch derivatives using reactive extrusion and evaluation of modified starches as shell materials for encapsulation of flavoring agents by spray drying. *Journal of Food Engineering* 91:380–386.



- Nugent A. P. 2005. Health properties of resistant starch. *Nutrition Bulletin*. 30(1):27–54.
- O'Brien S., Wang Y. J., Vervaet C., Remon J. P. 2009. Starch phosphates prepared by reactive extrusion as a sustained release agent. *Carbohydrate Polymers* 76: 557–566.
- Olkku J. and Linko P. 1977. Effects of thermal processing on cereal based food systems. In *Food Quality and Nutrition, Research Priorities for Thermal Processing* (W.K. Downey, ed.) pp. 575–579, Applied Science, London.
- Ordorica F. C. A. 1988. Obtención de los aislados proteínicos por micelización y precipitación isoeléctrica a partir de pastas de cártamo. Tesis de Doctorado. Doctorado en Ciencias en Biotecnología en plantas, CINVESTAV-Irapuato, México.
- Pastor C. E., Drago S. R., González J.R., Juan R., Pastor J. E., Alaiz M., Vioque J. 2011. Effects of the addition of wild legumes (*Lathyrus annuus* and *Lathyrus clymenum*) on the physical and nutritional properties of extruded products based on whole corn and brown rice. *Food Chemistry* 128:961–967
- Paredes L. O., Bello P. L. A. and López M. G. 1994. Amylopectin Structural Gelatinization and Retrogradation Studies. *Food Chemistry* 50:411-418.
- Peñaranda C. O. I., Perilla P. J. E., Algecira E. y Néstor A. 2008. Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos. *Ingeniería e Investigación* 28(3):47-52.
- Pérez A. A., Drago S. R., Carrara C. R., De Greef D. M., Torres R. L., and González R. J. 2008. Extrusion cooking of a maize/soybean mixture:



- Factors affecting expanded product characteristics and flour dispersion viscosity. *Journal of Food Engineering* 87:333–340.
- Qi A. H. and Xu A. 1999. Starch based ingredients for flavor encapsulation. *Cereal Foods World* 44:460-465.
- Rabe E. and Sievert D. 1992. Effects of baking, pasta production, and extrusion cooking on formation of resistant starch. *European Journal of Clinical Nutrition* 46:S105-S107.
- Ratnayake W. S. and Jackson D. S. 2006. Gelatinization and Solubility of Corn Starch during Heating in Excess Water: New Insights. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54 (10):3712–3716.
- Ratnayake, W. S. and Jackson D.S. 2008. Thermal behavior of resistant starches RS2, RS 3, and RS 4. *Journal of Food Science* 73(5): 356-366.
- Reeve R. M. and Walker H. G. 1969. The microscopic structure of popped cereals. *Cereal Chemistry* 46(3):227-241.
- Riaz M. 2004. *Extrusores en las aplicaciones de alimentos*. Ed. Acribia, España.
- Samperio, J.M. 2003. *Proceso industrial de la soya*. Asociación Americana de Soya, A.C.
- Rivera D. J., Barquera S., Campirano F., Campos N. I., Safdie M. and Tovar V. 2002. The epidemiological and nutritional transition in Mexico: rapid increase of non communicable chronic diseases and obesity. *Public Health Nutrition* 14: 113-122.
- Roberfroid M. B. 2000. Concepts and strategy of functional food science: the European perspective. *Am J Clin Nutr* 71: 1660S-1664.



- Rodríguez M. J., Ruiz L. I. I., Herman L. E., Martínez S. C. E, Delgado L. E., Vivar V. M. A. 2011. Development of extruded snacks using taro (*Colocasia esculenta*) and nixtamalized maize (*Zea mays*) flour blends . *Food Science and Technology* 44:673-680.
- Rutenberg M. W. and Solarek D. 1984. Starch derivatives: Production and uses. In:R. Whistler , J.N. BeMiller and E.F. Paschall, eds. *Starch: Chemistry and Technology*. (pp. 312–388). London: Academic Press. 314–388.
- Rudnik, E., Matuschek, G., Milanov, N. and Kettrup, A. 2005. Thermal properties of starch succinates. *Thermochimica Acta* 427:163–166.
- Sandhu K. S. and Lim S. T. 2008. Digestibility of legume starches as influenced by their physical and structural properties. *Carbohydrate Polymers* 71:245-252.
- Sajilata M. G., Singhal R. S. and Kulkarni P. K. 2006. Resistant starch a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 5:1-17.
- San Martín M. E., Aguilar M. M. A., Espinoza S. T., Pless R. C. and Quintana Z. D. 2004. Starch phosphate produces by extrusion: Physical properties and influence on yogurt stability. *Starch* 56:199-207.
- Scholz F. G., Bucci S. G., Goldstein G., Meinzer F. C., Franco A. C. and Miralles W. F. 2007. Biophysical properties and functional significance of stem water storage tissues in Neotropical savanna trees. *Plant Cell Environ* 30:236-248.
- Singh N., Smith A. C. and Frame N. D. 1998. Effect of process variables and glycerol monostearate on the extrusion behaviour of maize grits using two sizes of extrudates. *Journal of Food Engineering* 35: 91-109.



- Singh J. and Singh N. 2003. Studies on the morphological and rheological properties of granular cold water soluble corn and potato starches. *Food Hydrocolloids*. 17 (1): 63 - 72.
- Singh J., Kaur L. and Mc Carthy O.J. 2007. Factors influencing the physicochemical morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications – A review. *Food hydrocolloids* 21:1- 22.
- Singh J., Kaur L., Mc Carthy O. J., Moughan P. and Singh H. 2009. Development and characterization of extruded snacks from New Zealand Taewa (*Maori potato*) flours. *Food Research International* 42 (5–6):666–673.
- Sitohy M. and Ramadan M. 2001. “Granular properties of different starch phosphate monoesters”. *Starch* 53: 27-34.
- Sgaramella S. and Ames J. M. 1993. The development and control of colour in extrusion cooked foods. *Food Chemistry* 46: 129–132.
- Smith, R. J. and Caruso, J. L. 1964. Determination of phosphorus and ash. In *Methods in Carbohydrate Chemistry*. R. L. Whistler (ed). Academic Press, New York. Pp 311.
- Stanley D. W. 1986. Chemical and Structure of Determinants of Texture of Fabricated Foods. *Food Technology* 40(3):65-68, 76.
- Sompong R., Siebenhandl S., Berghofer E. and Schoenlechner R. 2011. Extrusion cooking properties of white and coloured rice varieties with different amylose content. *Starch* 63: 55–63



- Song X. Y., He G. Q., Ruan H. and Chen Q. H. (2006). Preparation and properties of octenyl succinic anhydride modified early indica rice starch. *Starch* 58(2):109-117.
- Suknark K., Philips R. D., Huang Y. W. 1999. Tapioca-fish and tapioca-peanut snacks by twin screw extrusion and deep-fat frying. *Journal of Food Science* 64:303-308.
- Sunderland R. 1996. Production of third-generation snacks. *Cereal Foods World* 41:12-14.
- Suksomboon A., Limroongreungrat K., Sangnark A., Thititumjariya K. and Noomhorm A. 2011. Effect of extrusion conditions on the physicochemical properties of a snack made from purple rice (Hom Nil) and soybean flour blend. *International Journal of Food Science and Technology* 46: 201–208.
- Takeda Y. and Preiss J. 1993. Structures of B90 (sugary) and W64A (normal) maize starches. *Carbohydrate Research* 240: 265-275.
- Tester R. F., Karkalas J. and Qi X. 2004. Starch – composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science* 29:151-165.
- Tharanathan R. N. 2002. Food-derived carbohydrate—Structural complexity and functional diversity. *Critical Reviews in Biotechnology* 22:65-84.
- Tharanathan R. N. 2003. Biodegradable Films and Composite Coatings: past, present and Future. *Trends in Food Science and Technology* 14:71-75.
- Tharanathan R. N. and Mahadevamma S. 2003. Grain legumes: a boon to human nutrition. *Trends in Food Science and Technology* 14:507–518.



- Tharanathan R. N. 2005. Starch – Value Addition by Modification. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 45:371-384.
- Thomas D. J. and Atwell W. A. 1999. Special Topics: Encapsulating Agents. Chapter 9, and Starch Modification. Chapter 4, In: *Starch*. American Association of Cereal Chemists. Pp. 31-39 y 84-85.
- Topping D. L., Fukushima M. and Bird A. R. 2003. Resistant starch as a prebiotic and symbiotic: state of the art. *Proceedings of the Nutrition Society* 62:171-176.
- Tosi E. A., Ré E., Torres R., DeGreel M. y Ciappini C. 2001. Modificación de la Concentración de Almidón Resistente por Tratamiento Térmico en Cereales, En: *Fibra Dietética en Iberoamérica: Tecnología y Salud*. Varela, Eds. São Paulo, Brasil, pp: 155–161.
- Trubiano P. 1986. Succinate and substituted succinate derivatives of starch., En Wurzburg (Ed.), *Modified starches: Properties and uses*, Boca Ratón, Florida: CRC press, Inc.
- Unlu, E., and J. F. Faller. 1998. Formation of resistant starch by a twin-screw extruder. *Cereal Chemistry* 75: 346–350.
- Upadhyay A., Sharma H.K. and Sarkar B.C. 2010. Optimization of carrot pomace powder incorporation on extruded product quality by response surface methodology. *Journal of Food Quality* 33:350–369.
- Valdés S., Flores Y. y Fernández R. 2003. *Moldeo por Inyección de Termoplásticos*. Limusa 2003.



- Vermeylen R., Derycke V., Delcour J. A., Goderis B., Reynaers H. and Koch M. H. J. 2006. Gelatinization of Starch in Excess Water: Beyond the Meeting of Lamellar Crystallites. A Combined Wide- and Small-Angle X-ray Scattering Study. *Biomacromolecules* 7: 2624 - 2630.
- Wang R. L. and Shogren J. L. W. 1997. Preparation of Starch Succinates by Reactive Extrusion. *Starch* 49(3):116–120.
- Watano S., Shimoda E. and Osako Y. 2002. Measurement of Physical strength of pharmaceutical extruded pellets. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin* 50:26-31.
- Wepner B., Berghofer E., Miesenberger E. and Tiefenbacher K. 1999. Citrate starch: application as resistant starch in different food systems. *Starch* 5:354-361.
- Whistler R. L. and BeMiller, J. N. 1999. *Carbohydrate chemistry for food scientist*. Eagan press, st. Paul, Minnesota, USA. pp 63 - 151.
- Woo, K. S. and Seib P. A, 2002. Cross-linked resistant starch: Preparation and properties. *Cereal Chemistry* 79: 819-825.
- Wurzburg O. B. 1986. *Modified Starches: Properties and Uses*. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, pp: 1–277.
- Xie F., Yu L., Liu H. and Chen L. 2006. Starch Modification Using Reactive Extrusion. *Starch* 58:131-139.
- Zhang B., Huang Q., Luo F., Fu X., Jiang H. and Jane J. 2011. Effects of octenylsuccinylation on the structure and properties of high-amylose maize starch. *Carbohydrate Polymers* 84:1276–1281.



Zazueta Morales J. J. 2003. Extrusión de Maíz (*Zea mays* L.) azul: Efecto del Hidróxido de Calcio Sobre las Propiedades Fisicoquímicas y Funcionales. Tesis de doctorado. Programa de postgrado en alimentos del centro de la república. Facultad de Química. Universidad Autónoma de Querétaro. UAQ. Santiago de Querétaro. Querétaro, México.



EL JURADO DESIGNADO POR LA UNIDAD QUERÉTARO DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, APROBÓ LA TESIS DE MAESTRÍA DE LA C. AMIRA DANIELA CALVO LÓPEZ TITULADA: OBTENCION Y CARACTERIZACION DE PRODUCTOS DIRECTAMENTE EXPANDIDOS POR EXTRUSION Y BOTANAS DE TERCERA GENERACIÓN CONTENIENDO ALMIDÓN RESISTENTE, FIRMAN AL CALCE DE COMÚN ACUERDO LOS INTEGRANTES DE DICHO JURADO, EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO, QRO., A LOS 20 DÍAS DEL MES DE ENERO DEL AÑO 2012.



**DR. FERNANDO MARTÍNEZ BUSTOS**



**DRA. SILVIA LORENA AMAYA LLANO**



**DR. JUAN DE DIOS FIGUERÓA CÁRDENAS**





CINVESTAV - IPN  
Biblioteca Central



SSIT0010815