



“UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
MÉXICO”

FACULTAD DE QUÍMICA

“ANÁLISIS DEL PROCESO DE ADSORCIÓN DE HUMEDAD EN MICROCÁPSULAS
DE ACEITE DE CHÍA MEDIANTE DIFERENTES MODELOS CINÉTICOS”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero Químico

PRESENTA:

Juan Daniel San Juan Medrano

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. César Pérez Alonso

ASESOR EXTERNO:

Da. Stefani Cortés Camargo

Toluca Estado de México, agosto de 2023

Índice

AGRADECIMIENTOS	13
1.Resumen.....	14
2.Introducción.....	16
3 Antecedentes	18
3.1. La semilla de chía: <i>Savia hispánica</i> Lamiaceae.....	18
3.2 Composición del aceite de chía	18
3.3 Producción del aceite de chía	19
3.4 Ácidos grasos.....	20
3.5 Microencapsulación	21
3.6 Tecnología de microencapsulación	22
3.6.1 Secado por aspersión	23
3.6.2 Emulsiones liofilizadas.	28
3.6.3 Secado en lecho fluidizado.	28
3.6.4 Extrusión	29
3.6.5 Inyección fundida.....	30
3.6.6 Coacervación compleja	31
3.6.7 Complejación inclusiva	33
3.6.8 Atrapamiento por liposomas.	33
3.7 Métodos emergentes de microencapsulación de aceites omega-3.....	34
3.7.1 Granulación por aspersión y revestimiento de película de lecho fluidizado	34
3.7.2 Encapsulación usando atomizador ultrasónico	35
3.7.3 Proceso de microencapsulación de aceites omega- 3 usando la coacervación compleja.	36
3.8 Biopolímeros	37
3.9. Isotermas de sorción.	40
3.9.1 Adsorción.....	40
3.9.2 Actividad de acuosa (aw).	40
3.9.3 Isotermas de adsorción	41
4 Justificación, hipótesis, objetivos	48
4.1 Justificación	48

4.2 Hipótesis	49
4.3 Objetivo general.....	49
4.4 Objetivos específicos	50
5. Metodología.....	51
5.1. Materiales	51
5.2. Métodos	51
5.2.1 Extracción del aceite de chía.....	51
5.2.2. Formulación de emulsiones aceite-en-agua (O/W).....	52
5.2.3. Obtención de microcápsulas a través de secado por aspersion	52
5.2.4 Isotermas de adsorción de las microcápsulas.....	52
5.3. Área específica de adsorción	53
6 Resultados y discusión.....	55
6.1. Isotermas de adsorción	55
6.1.1 Modelo teórico G.A.B.....	55
6.1.2 Modelo teórico B.E.T.	56
6.1.3 Modelo semiempírico Halsey.	58
6.1.4 Modelo empírico Henderson.	60
6.1.5 Modelo empírico Oswin.....	61
6.1.6 Modelo Smith.	63
6.1.7 Modelo semiempírico Lewicki.....	64
6.1.8 Modelo de Pleg.....	66
6.1.9 Modelo Chen.....	67
6.1.10 Modelo Chung y Pfof.....	68
6.2 Interpretación de los modelos de adsorción: modelo teórico.....	70
6.3 Área específica de adsorción	71
6.3.1 Radio del poro.....	72
7. Conclusiones.....	75
8. Glosario.....	76
9. Referencias.	81
10 Anexos.	86

10.1. Anexo I: Datos experimentales de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C, 35°C y 40°C	86
10.2. Anexo II: datos ajustados de las isothermas de adsorción con los modelos matemáticos para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C, 35°C y 40°C	88
10.3. Anexo III: densidad, tensión superficial y volumen molar del agua a 25°C, 35°C y 40°C	107
10.4 Anexo IV: Clasificación de los poros de acuerdo a su dimensión transversal (w).....	108

Índice de figuras

1. [Tipos de isotermas.....47](#)
2. [Isoterma de adsorción para las microcapsulas de aceite de chíá encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de G.A.B.....56](#)
3. [Isoterma de adsorción para las microcapsulas de aceite de chíá encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de B.E.T.....58](#)
4. [Isoterma de adsorción para las microcapsulas de aceite de chíá encapsulados con goma de mezquite y proteína suero de leche. Modelo de Halsey.....59](#)
5. [Isoterma de adsorción para las microcapsulas de aceite de chíá encapsulados con goma de mezquite y proteína suero de leche. Modelo de Henderson61](#)
6. [Isoterma de adsorción para las microcapsulas de aceite de chíá encapsulados con goma de mezquite y proteína suero de leche. Modelo de Oswin.....62](#)
7. [Isoterma de adsorción para las microcapsulas de aceite de chíá encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de Smith.....64](#)
8. [Isoterma de adsorción para las microcapsulas de aceite de chíá encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de Lewicky.....65](#)
9. [Isoterma de adsorción para las microcapsulas de aceite de chíá encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de Pleg.....67](#)
10. [Isoterma de adsorción para las microcapsulas de aceite de chíá encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de Chen.....68](#)

11.	<u>Isoterma de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de Chung & Pfof.....</u>	<u>69</u>
12.	<u>Regiones de la isoterma de adsorción a 25°C: modelo de G.A.B.....</u>	<u>70</u>
13.	<u>Regiones de la isoterma de adsorción a 35°C: modelo de G.A.B.....</u>	<u>70</u>
14.	<u>Regiones de la isoterma de adsorción a 40°C: modelo de G.A.B.....</u>	<u>71</u>

Índice de tablas

1. <u>Ácidos grasos omega-3 y sus fuentes naturales.....</u>	<u>21</u>
2. <u>Tecnologías de secado y sus materiales de pared.....</u>	<u>24</u>
3. <u>Parámetros del modelo de G.A.B. para las isothermas de adsorción.....</u>	<u>55</u>
4. <u>Parámetros del modelo de B.E.T.. para las isothermas de adsorción.....</u>	<u>57</u>
5. <u>Parámetros del modelo de Halsey. para las isothermas de adsorción.....</u>	<u>59</u>
6. <u>Parámetros del modelo de Henderson. para las isothermas de adsorción.....</u>	<u>60</u>
7. <u>Parámetros del modelo de Oswin para las isothermas de adsorción.....</u>	<u>62</u>
8. <u>Parámetros del modelo de Smith. para las isothermas de adsorción.....</u>	<u>63</u>
9. <u>Parámetros del modelo de Lewicki. para las isothermas de adsorción.....</u>	<u>65</u>
10. <u>Parámetros del modelo de Pleg para las isothermas de adsorción.....</u>	<u>66</u>
11. <u>Parámetros del modelo de Chen para las isothermas de adsorción.....</u>	<u>67</u>
12. <u>Parámetros del modelo de Chung & Pfof para las isothermas de adsorción.....</u>	<u>69</u>
13. <u>Áreas específicas de adsorción a 25°C, 35°C y 40°C.....</u>	<u>71</u>
14. <u>Actividad acuosa para diferentes valores específicos de contenido de humedad en el equilibrio a 25°C, 35°C y 40°C.....</u>	<u>73</u>
15. <u>Radio del poro de las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C, 35°C y 40°C.....</u>	<u>74</u>

16.	<u>Datos experimentales de las isothermas de adsorción para para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C.....</u>	<u>86</u>
17.	<u>Datos experimentales de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C</u>	<u>86</u>
18.	<u>Datos experimentales de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C.....</u>	<u>87</u>
19.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo B.E.T.....</u>	<u>88</u>
20.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de B.E.T.....</u>	<u>88</u>
21.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de B.E.T.....</u>	<u>89</u>
22.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Chen.....</u>	<u>90</u>
23.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite</u>	

	<u>y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Chen.....</u>	<u>90</u>
24.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Chen.....</u>	<u>91</u>
25.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Chung & Pfof.....</u>	<u>92</u>
26.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Chung & Pfof.....</u>	<u>92</u>
27.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Chung & Pfof.....</u>	<u>93</u>
28.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de G.A.B.....</u>	<u>94</u>
29.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de G.A.B.....</u>	<u>94</u>
30.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de G.A.B.....</u>	<u>95</u>

31. Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo Halsey.....95
32. Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Halsey.....96
33. Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Halsey.....97
34. Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Henderson.....97
35. Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Henderson98
36. Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Henderson.....99
37. Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Lewicki.....99
38. Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite

	<u>y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Lewicki.....</u>	<u>100</u>
39.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Lewicki.....</u>	<u>101</u>
40.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Oswin.....</u>	<u>101</u>
41.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Oswin.....</u>	<u>102</u>
42.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Oswin.....</u>	<u>103</u>
43.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Pleg.....</u>	<u>103</u>
44.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Pleg.....</u>	<u>104</u>
45.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Pleg.....</u>	<u>105</u>

46.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Smith.....</u>	<u>105</u>
47.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Smith.....</u>	<u>106</u>
48.	<u>Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Smith.....</u>	<u>107</u>
49.	<u>Densidad, tensión superficial y volumen molar del agua a 25°C, 35°C y 40°C.....</u>	<u>107</u>
50.	<u>Clasificación de los poros de acuerdo a su dimensión transversal (w).....</u>	<u>108</u>

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Estado de México por financiar esta tesis mediante el proyecto con clave 6661/2022SF, “Diseño y análisis de la estructura física de microcápsulas de aceite de linaza mediante secado por aspersion empleando mezclas de proteína de chícharo y polisacáridos como agentes encapsulantes”

1. Resumen

El objetivo de este trabajo fue estudiar el fenómeno de adsorción en microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a partir de la construcción de isothermas de adsorción de vapor de agua, estableciendo los diferentes parámetros matemáticos de ajuste, el contenido de humedad en el equilibrio, el contenido de humedad en la monocapa y la actividad acuosa con base a diez modelos de aplicación: dos modelos teóricos, B.E.T. y G.A.B., dos modelos semiempíricos, Lewicki y Halsey, dos modelos empíricos, Oswin y Henderson, y por último los modelos de Chen, Chung & Pfoest, Pleg y Smith.

El primer paso fue la extracción del aceite de chía mediante un proceso de prensado en frío, en seguida se preparó una emulsión mezclando el aceite de chía con goma de mezquite y proteína de suero de leche, finalmente la emulsión se secó utilizando un secador por aspersión. Las isothermas de adsorción a 25°C, 35°C y 40°C se determinaron mediante el método gravimétrico de celdas en equilibrio las cuales contenían soluciones salinas saturadas a diferentes actividades de agua. La actividad acuosa se midió con un medidor Aqualab con compensación de temperatura y el contenido de humedad en el equilibrio se determinó por diferencia de peso después de secarlo al vacío.

Posteriormente, los resultados experimentales se ajustaron utilizando los diez modelos descritos, entre los cuales los modelos Pleg y G.A.B. fueron los que ajustaron mejor los datos experimentales basados en el factor de correlación, sin embargo, el modelo G.A.B. se desarrolló como el modelo óptimo en los datos obtenidos por sus variables intrínsecas con significado físico, como el valor de la monocapa (M_0), ya que indica la cantidad de agua que se adsorbe fuertemente en sitios específicos y se considera como el valor óptimo en el que un alimento es más estable. La constante de Guggenheim (C_G) y el parámetro matemático de corrección para las propiedades de las moléculas en la multicapa con respecto al agua, (K) representan adecuadamente los datos experimentales en un intervalo de actividad

acuosa de 0 a 0.95 para la mayoría de los alimentos de interés práctico. Los valores encontrados a partir de este modelo teórico para el contenido de humedad en la monocapa (M_0) fueron 4.99, 4.48 y 3.99 kg $H_2O/100$ kg s.s. y actividad acuosa (a_w) de 0.329, 0.318 y 0.313, para la constante de Guggenheim (C_G) 5.32, 4.61 y 3.22 y para el parámetro matemático (K) fueron 0.77, 0.78 y 0.81 a 25°C, 35°C y 40°C, respectivamente. Las isotermas de adsorción corresponden a una clasificación sigmoideal de tipo II.

Finalmente, se determinó el área específica de adsorción (S_0). Los valores obtenidos fueron 176.79 m^2/g , 158.72 m^2/g y 139.23 m^2/g a 25°C, 35°C y 40°C, respectivamente. La disminución revela que las energías de unión asociadas con la adsorción en la monocapa y multicapa disminuyeron al aumentar la temperatura. El radio de los poros (r_p) en las microcápsulas de aceite de chía se clasificaron en microporos y mesoporos de acuerdo con la IUPAC.

2.Introducción

Con el propósito de mejorar la salud del ser humano, han sido desarrollados “alimentos funcionales” que son productos alimenticios de amplia aceptación y consumo, a los cuales se les han añadido ingredientes con alto valor nutricional para satisfacer los requerimientos de audiencias específicas como atletas, personas con deficiencias nutrimentales, etc. Los alimentos funcionales han ganado prominencia en el mercado, son desarrollados en la industria con diferentes procedimientos, ingredientes y materiales, por lo que se ha vuelto un área de estudio de gran interés.

La *Savia hispánica* L. conocida como chía es una planta de la familia *Lamiaceae*, es una semilla de aceite nativa del centro de México y Guatemala. La semilla de chía se ha convertido en un producto de interés debido a su composición principalmente fibra soluble, antioxidantes y ácidos grasos, los últimos componentes esenciales para el correcto funcionamiento del cuerpo humano.

La microencapsulación es una tecnología definida como un envolvimiento de una sustancia sólida, líquida o gaseosa dentro de otra en muy pequeñas cápsulas selladas. Dentro de las diferentes técnicas de encapsulación de ingredientes de alimentos, se encuentran los métodos físicos y químicos. El método más común empleado es el secado por aspersión, es económico y de fácil implementación. La eficiencia de protección y control de liberación depende de la composición y la estructura de la pared estabilizadora, y también de las condiciones de operación durante la producción (temperatura, pH, presión, humedad) y uso de estas micropartículas.

El comportamiento de los productos alimentarios con respecto al aire húmedo que los rodea es descrito por la isoterma de vapor de agua, la cual da la relación entre el contenido de agua y la actividad de agua a una temperatura dada. El análisis de los datos de las isotermas de sorción mediante la aplicación de principios termodinámicos provee el calor isostérico de sorción, el cual da la medida de la interacción agua-sólido.

Los modelos matemáticos son muy útiles para describir y predecir el comportamiento de las isothermas de adsorción a diferentes condiciones experimentales y, por lo tanto, para calcular todas las propiedades termodinámicas y estructurales que pueden ser deducidas, como el área específica de adsorción, el radio del poro, las cuales sirven para predecir la estabilidad de los productos alimenticios deshidratados y de esta manera conocer la vida útil del producto.

3 Antecedentes

3.1. La semilla de chía: *Savia hispánica* Lamiaceae

La *Savia hispánica* L. Conocida como chía es una planta de la familia Lamiaceae. A pesar de ser una semilla de aceite nativa del centro de México y Guatemala, en años recientes la semilla de chía crece comercialmente en países como Argentina, Australia, Ecuador, Bolivia, Nicaragua y Ecuador debido a sus beneficios nutricionales reportados en numerosos artículos científicos (Julio, 2015)

Esta planta era usada por las tribus Aztecas en la temprana historia de Mesoamérica. La cosecha de cereales era importante no solo para la comida, sino también para la medicina y para la pintura. El aceite de chía hoy en día ha sido redescubierto como un importante ingrediente en aplicaciones nutrimentales y en cosméticos (Ayerza, 1995)

3.2 Composición del aceite de chía

A pesar de ser tan antigua, el consumo de la semilla de chía ha aumentado en las últimas décadas, al mismo tiempo que más estudios científicos sobre la misma se llevan a cabo. Se ha descubierto que la semilla de chía tiene altos niveles de ácidos grasos esenciales altamente insaturados, especialmente ácido linoleico (ω -6) (17%-26%), ácido α -linoleico (ω -3) y ácido linolénico (50%-57%), indispensables para el correcto funcionamiento de las células, gracias a estos también tiene propiedades antiinflamatorias y protectoras cardiovasculares (Guindani et al., 2016).

La semilla de chía es una excelente fuente de fibra soluble y antioxidantes (incluyendo tocoferoles, polifenoles, carotenoides), los cuales además de ser saludables nutricionalmente, terapéuticamente, también sirven para preservar el aceite. La semilla de chía contiene aproximadamente 30% de aceites y la fracción

primaria de este aceite está compuesta principalmente por ácidos grasos insaturados (Morato, 2015)

Los alimentos ricos en omega 3 como lo es la chía pueden considerarse alimentos funcionales, ya que contienen ácidos grasos omega 3 esenciales en la dieta humana, aun cuando hay otros mecanismos que producen esta sustancia a partir de otras sustancias. Los ácidos grasos omega 3 son los responsables de precursores hormonales importantes para el mantenimiento metabólico y homeostasis ósea (Morato, 2015).

3.3 Producción del aceite de chía

La mayoría de los aceites vegetales comercializados y usados son el aceite de palma, de soya, de girasol, de canola; sin embargo, en años recientes ha aumentado el interés en otras plantas como fuentes de ácidos grasos insaturados, debido a sus propiedades industriales, medicinales y alimenticias (Bruneel et al., 2013).

La extracción del aceite de chía por fluidos supercríticos (EFS) es una técnica alternativa que provee grandes ventajas como la ausencia de luz y oxígeno durante el proceso de extracción, así como la posibilidad de uso de baja temperatura, evitando reacciones de degradación. La EFS proporciona extractos libres de solventes orgánicos (Guidani et al., 2016)

En la industria la producción de aceite de chía arroja residuos denominados torta de desechos de semilla de chía, la cual es recientemente usada en manufactura como productos con bajo valor como lo son el flúor de chía y como alimento para animales (Guidani et al., 2016).

3.4 Ácidos grasos

Los ácidos grasos omega -3, contienen propiedades antiinflamatorias y antioxidantes. Los ácidos grasos omega -3 pertenecen a la familia de ácidos grasos poliinsaturados (PUFA's). Como su nombre lo dice, estos tienen múltiples enlaces dobles, con el primer doble enlace localizado en el tercer carbón empezando desde el final del metil. El primer miembro de la familia del omega -3 es el ácido Alfa linolénico (ALA, 18:3n-3), el cual no es sintetizado por el cuerpo humano. Además, ALA juega un papel importante en muchas funciones cerebrales en el cuerpo humano y por lo tanto es reconocido como esencial en la dieta. Los otros ácidos grasos importantes omega -3 son los metabolitos de cadena más larga del ALA, el ácido eicosapentaenoico (EPA, 20:5n-3) y el ácido docosahexaenoico (DHA, 22:6n-3). EPA y DHA son ácidos grasos de cadena larga (LCPUFA) obtenidos en nuestra dieta de fuentes marinas principalmente (Pratibha, 2014)

Los niveles deseados de ácidos grasos omega- 3 pueden ser conseguidos incluyendo varias comidas enriquecidas con ácidos grasos poliinsaturados omega -3. A pesar de esto hay poca variedad de productos disponibles en el mercado, hay desafíos en las técnicas de producción, transporte, almacenamiento, disponibilidad y aceptabilidad sensorial (Kolanowski, 1999).

Las características físicas y químicas de los aceites omega -3 limitan su aplicación como potencial ingrediente alimenticio. Gracias a la alta insaturación natural de los ácidos grasos omega-3, estos son susceptibles a la oxidación y rápidamente producen hidroperóxidos, sin sabores ni olores, los cuales son indeseables para los consumidores. Para evitar los mencionados problemas, el uso de tecnología de microencapsulación ha sido explorada por varios investigadores (Klinkerson et al., 2005).

Los aceites de pescado tienen diferentes composiciones, comparados con los aceites provenientes de otros animales, debido a su alto contenido de ácidos grasos insaturados. El consumo de estos ácidos grasos están estrechamente relacionados con efectos benéficos a la salud humana (Labuschagne, 2018).

Tabla 1. Ácidos grasos omega-3 y sus fuentes naturales

Ácido graso omega 3	Fuentes
Ácido Alpha linolénico (ALA)	Vegetales frondosos verde oscuro, algunas nueces, semillas y otros aceites, semilla de lino, cáñamo y nuez, canola, perilla, chía, kiwi
Ácido eicosapentaenoico (EPA)	Grasa de pescado como la espina de pescado, caballa de pescado, hígado magro de pescado blanco como col y fletan, grasa de marín.
Ácido docosahexaenoico (DHA)	Mamíferos como ballenas, focas y especies de algas

*Fuente: Kaushik et al. 2014.

3.5 Microencapsulación

Los alimentos funcionales han ganado prominencia en el mercado alimenticio, con un largo número de productos que han sido desarrollados (Agustín et al., 2015). Productos con amplia aceptación y consumo se les han agregado ingredientes que mejoran la salud del consumidor, estos ingredientes son desarrollados en la industria para satisfacer la demanda para audiencias específicas como los atletas (Morato, 2015).

La microencapsulación es una tecnología definida como un envolvimiento de una sustancia sólida, líquida o gaseosa dentro de otra en muy pequeñas cápsulas selladas, donde el centro del material es difundido gradualmente a través de las paredes de la cápsula a velocidades controladas bajo condiciones específicas (Martínez, 2014).

Dentro de las diferentes técnicas de encapsulación de ingredientes alimenticios, se encuentran los métodos físicos (baño de sartén, baño de suspensión de aire, extrusión centrífuga, boquilla de vibración, secado por aspersión) y los métodos químicos (polimerización interfacial, polimerización *in-situ* y polimerización de matriz). El método más común es el secado por aspersión, debido a que es económico y de fácil implementación (Fuchs et al., 2006).

La microencapsulación protege contra el oxígeno, agua, aire, luz e incluso evade el contacto con otros ingredientes. La eficiencia de protección y liberación depende mayormente de la composición y la estructura de la pared estabilizadora, y también de las condiciones de operación durante la producción (temperatura, pH, presión, humedad) y uso de estas partículas. Un área de investigación de interés creciente es el del uso de mezclas de biopolímeros como agente encapsulante que pueda permitir incrementar la eficiencia de la encapsulación y la duración de los ingredientes encapsulados (Jiménez, 2006).

3.6 Tecnología de microencapsulación

La tecnología de encapsulación puede prevenir parcialmente la oxidación y extiende la duración de vida de los ácidos grasos omega 3, ofreciendo soluciones prácticas de estabilización y mejor entrega de ácidos grasos omega- 3 en productos alimenticios. La microencapsulación es el proceso de atrapar un ingrediente activo dentro de otra sustancia de revestimiento. El material encapsulado es generalmente llamado material central, ingrediente activo, relleno, fase interna o carga útil (Versic, 1998). Lo externo continuo y protector alrededor del núcleo es llamado cápsula, encapsulante, material de pared, membrana, caparazón, portador o matriz de encapsulación (Kaushik et al., 2014)

3.6.1 Secado por aspersión

El secado por aspersión es descrito como la conversión de una mezcla líquida (solución o emulsión) en partículas secas, provenientes del esparcimiento de la alimentación (mezcla líquida) en un medio caliente, generalmente aire (Labuschagne., 2018). El objetivo principal es construir una barrera entre el componente en la partícula y el medio ambiente.

El secado por aspersión ofrece muchas ventajas como la capacidad de manejar materiales sensibles al calor, maquinaria disponible, de fácil operación y la posibilidad de controlar el tamaño de la partícula de el secado de las emulsiones, sin embargo, solo hay un número limitado de materiales de pared compatibles con esta tecnología (Desai et al., 2005).

Hay una necesidad de explorar diferentes materiales de pared que puedan encapsular grandes cantidades de aceites omega -3 y puedan mejorar la eficacia de protección y subsecuentemente la viabilidad de los ácidos grasos omega -3. Esto es verdad particularmente para el complejo de coacervación, donde las partículas son formadas durante el proceso de coacervación rápidamente en el secador. Las proteínas han mostrado formar coacervados pobres en comparación con las gelatinas, particularmente con respecto al caparazón exterior con coacervados aglomerados en el multinúcleo (Zhang et al., 2009).

El proceso general del secado por aspersión es el de encapsular un material en una solución de polímero, se forma una emulsión o dispersión, se bombea la solución/emulsión que se alimenta y atomiza la mezcla y la deshidrata en gotitas atomizadas para producir microcápsulas. Dependiendo de la concentración de sólidos de la solución (emulsión) alimentada y las condiciones de operación, el tamaño de las microcápsulas producidas por el secado por aspersión puede variar de 10-50 μm al final fino de 2-3 μm al final largo (Kaushik et al., 2014)

La producción de aceite omega- 3 micro encapsulado, involucra la selección del material del núcleo (fuente de aceite omega- 3) y los materiales de la pared o matriz,

diseño de la formulación (radio del núcleo a la pared) y la selección de la tecnología para la encapsulación. Un sistema de microencapsulación es evaluado en base a la eficiencia de encapsulación y la estabilidad de almacenamiento de las microcápsulas de aceite omega- 3, las cuales principalmente depende del tipo y composición del material de pared usado (Kaushik et al., 2014). Una cantidad considerable de materiales de pared han sido utilizados para producir microcápsulas de omega- 3 por secado por aspersión de emulsiones. Esto incluye proteínas, carbohidratos, lípidos y gomas usadas, ya sea solo o en combinación para lograr las características deseadas. Por ejemplo, se ha observado que los carbohidratos de bajo peso molecular se cristalizan a temperaturas por encima de la temperatura de transición y así pierden la protección del material del núcleo (Kaushik et al., 2014). La cristalización puede ser retrasada combinando azúcares con polímeros o con cationes divalentes (Kaushik et al., 2014).

En un estudio se evaluó el potencial de la maltodextrina en combinación con diferentes materiales de pared (almidón, concentrado de suero de proteína y goma arábica) por encapsulación de semilla de lino a través de secado por aspersión. Los resultados indican que la maltodextrina (MD) en combinación con almidones modificados dan la mayor eficiencia en la encapsulación en comparación con la goma arábica y suero de proteína conectada (WPC) combinada. La emulsión con mayor estabilidad y protección contra la oxidación se observó en la combinación MD-WPC (Kaushik et al., 2014).

Tabla 2: tecnologías de secado y sus materiales de pared.

Tecnologías	Materiales de pared
Secado por aspersión (aceite de pescado)	Gelatina, caseinato y maltodextrina
Secado por aspersión (aceite de pescado)	Caseína y lactosa

Secado por aspersión (aceite de pescado)	Caseinato de sodio y dextrosa equivalente
Secado por aspersión (aceite de pescado)	Dextrina cíclica altamente ramificada y caseinato de sodio
Secado por aspersión (aceite de pescado)	Metilcelulosa
Secado por aspersión (aceite de pescado)	Hidroxipropil metilcelulosa
Secado por aspersión (aceite de pescado)	Caseinato de sodio, glucosa, jarabe de glucosa, n-octanilsuccinato.
Secado por aspersión (aceite de pescado)	Almidón derivado/jarabe de glucosa o trehalosa metilcelulosa
Secado por aspersión (aceite de pescado)	Metilcelulosa
Secado por aspersión (aceite de pescado)	Hidroxipropil metilcelulosa
Secado por aspersión (aceite de pescado)	Pectina de azúcar de remolacha y jarabe de glucosa.
Secado por aspersión (aceite de pescado)	Goma arábica
Secado por aspersión	Jarabe de sólidos de maíz
Secado por aspersión (lino)	Almidón, concentrado de suero de proteína
Secado por aspersión (lino)	Concentrado de suero de proteína
Secado por aspersión (lino)	Goma arábica y lecitina

Secado por aspersión (aceite de lino)	Maltodextrina, concentrado de suero de proteína, goma arábica y dos almidones modificado, almidón de tapioca y maíz ceroso
secado en frio (aceite de pescado)	Caseinato de sodio y carbohidrato
Aspersión y secado en frio (aceite de pescado)	Polvo de clara de huevo.
Aspersión y secado en frio (aceite de pescado)	Goma arábica
Aspersión y secado en frio (aceite de pescado)	Lactosa y maltodextrina
Coacervación simple y secado por aspersión (aceite de pescado)	Hidroxipropil metilcelulosa
Complejo de coacervación, y secado en congelado (aceite de lino)	Gelatina y goma arábica
Complejo de coacervación (aceite de micoalga)	Gelatina goma arábica con transglutaminasa como agente de reticulación.
Emulsificación doble y gelación enzimática subsecuente (aceite de pescado)	Proteína de soya, suero de proteína, proteína de trigo caseinato de sodio transglutamina

*Fuente Kaushik 2014.

En adición con los materiales de pared, los métodos de procesamiento usados en el proceso de emulsificación también impactan en la eficacia de la emulsificación. Se ha observado que el tamaño de la partícula de la emulsión tiene un efecto pronunciado en la eficiencia de la encapsulación de los aceites durante el secado por aspersión. Las partículas pequeñas de aceite se encierran y se incrustan más eficazmente dentro de la pared de la matriz de las microcápsulas. Por eso los

métodos que producen partículas pequeñas de la emulsión encapsulan cantidades más grandes de aceite y permiten menos cantidades de aceite expuestas a la superficie de la partícula de la microcápsula. Basada en esta teoría usando un microfluidizador para reducir el tamaño de la partícula durante la preparación de la emulsión, usando este método se observó mayor eficiencia de encapsulación y menor superficie de aceite. Comparado con otros métodos para preparar emulsiones, como es la ultrasonificación en un estudio similar se reportó que una mayor concentración de aceite y menor contenido de sólidos resultó en emulsiones con menor viscosidad, partículas con tamaños más largos, pobres en carga de aceite y alta oxidación de lípidos (Kaushik, 2014).

A pesar de que el secado por aspersión es la tecnología más usada para la encapsulación de ácidos grasos omega-3, algunos estudios también han señalado que tiene algunas desventajas. Estos autores reportan que el uso de aire a altas temperaturas como medio, produce partículas con estructura porosa. Por lo tanto, las partículas en polvo pueden oxidarse rápidamente, lo que hace decrecer su vida útil (Kaushik, 2014).

Se reportó que los polvos de aceite de pescado secados por aspersión se oxidan más pronto comparados con el aceite de pescado una vez almacenado. La industria tiene un fuerte interés en la manufactura de polvos de aceite de pescado por medio del secado por aspersión y un estudio reciente se enfoca en vencer la sensibilidad de oxígeno de los polvos. El uso de materiales de pared entrecruzados, por ejemplo, carbohidratos y proteínas vía reacción Millard ha sido sugerido como una potencial solución. También ha sido reportado que la aplicación de métodos de complejos de coacervación incorporando maltodextrina en una emulsión de aceite de pescado y hidroxipropil-metil-celulosa (HPMC) también mejora la estabilidad de la oxidación del aceite de pescado. Por lo tanto, el caparazón formado por coacervación y entrelazamiento lejano de polímeros pueden ayudar a proteger a los aceites omega-3 contra la oxidación post secado (Kaushik, 2014).

3.6.2 Emulsiones liofilizadas.

Para el secado de emulsiones por liofilización, la emulsión se congela a temperaturas entre -90°C y -40°C y luego se secan por sublimación bajo presión baja. La ventaja principal de esta tecnología es la remoción del oxígeno y la aplicación de bajas temperaturas, que ayudan a minimizar la oxidación del producto. Estas ventajas de la liofilización hacen esta tecnología adecuada para la microencapsulación de ingredientes altamente sensibles, como los probióticos y los PUFA' (Kaushik, 2014).

Pocos estudios han explorado la microencapsulación de ácidos grasos omega -3 usando liofilización. Se ha reportado que los polvos de aceite de pescado microencapsulado por liofilización da polvos con mayor estructura porosa y menor tiempo de vida útil. En estudios similares se compararon las características de los productos con microcápsulas de aceites de pescado usando secado por aspersion, granulacion por espray y por liofilizacion y se encontro que la porosidad, irregularidad y escamas como estructuras de estos polvos liofilizados aceleran la oxidacion debido al acceso de oxigeno al interior de estos polvos. Además, el liofilizado es de 30 a 50 veces más costoso que el secado por aspersion. Por lo tanto, la liofilización de emulsiones es una tecnología cara para la producción comercial de productos omega- 3 microencapsulados y requiere asesoramiento tecnologico para reducir los problemas de porosidad en la estructura final del polvo (Kaushik, 2014).

3.6.3 Secado en lecho fluidizado.

La microencapsulación usando un revestimiento en lecho fluidizado es una técnica en la cual un revestimiento es aplicado en las partículas de polvo en un proceso por lotes o en una configuración continua. Las partículas en polvo están suspendidas en una corriente de aire mantenida a una temperatura específica y rociada con una

capa de materiales. Generalmente el aceite de omega -3 en polvo puede ser recubierto con una capa de líquidos para prevenir la oxidación durante el almacenamiento. Las grasas derretidas y ceras son preferidas como material de caparazón en comparación con formulaciones base agua por no tener paso de evaporación en revestimientos base lípidos, resultando en ahorro de energía y tiempo. Skelbaek & Anderson (1994) patentaron un proceso de encapsulación doble de aceite de pescado. Primero el aceite de pescado se emulsifica por medio del uso de caseinato como emulsificante y esta emulsión se seca por aspersion. Este polvo fue revestido con almidón de maíz como un agente de aspersion. En otra patente Ponginebbi & Publisi (2008) produjeron polvos de aceite de pescado por secado por aspersion y subsecuentemente revestidos con aspersion de búlgaros 30% (w/w) cera de palma hidrogenada a estos polvos para incrementar la estabilidad de oxidación (Kaushik, 2014).

Sin embargo, este método solo ha sido usado para proveer revestimiento adicional en la superficie del ya microencapsulado aceite de pescado, pero nunca directamente para la microencapsulación de PUFA's omega -3. Además, este método es un método secundario útil para proveer estabilidad en la microencapsulación u otras propiedades con un revestimiento a la medida, más bien que un método primario para producir polvos de omega -3 (Kaushik, 2014).

3.6.4 Extrusión

Extrusión es otra tecnología potencial para la microencapsulación de ácidos grasos omega- 3. Esta tecnología puede ser usada para producir productos encapsulados de alta densidad. Esto involucra una mezcla de portadores fundidos con aceites omega-3, permitiendo a la emulsión pasar por la tubería o boquilla a alta presión. El objetivo principal de esta tecnología ha sido patentado por Saleeb & Arora (1999). De acuerdo con estos autores, la extrusión es preferible en comparación con el secado por aspersion porque la extrusión produce productos menos porosos. Sin embargo, se ha observado que el costo de la extrusión es casi el doble que el del

secado por aspersión y el uso de extrusión por tornillo a alta presión genera altas fuerzas de corte, las cuales son perjudiciales para la estabilidad de un material sensitivo como lo es el aceite omega-3 (Kaushik, 2014).

Coextrusión o extrusión centrífuga es un tipo tecnología de extrusión que es poco comúnmente usada en el proceso de microencapsulación. En esta tecnología, las boquillas usadas son orificios concéntricos. Una solución de polímero acuoso calentado fluye hacia la tubería externa y el aceite que va a ser encapsulado fluye a través de la tubería interior y finalmente los dos fluidos son descargados en una corriente en movimiento de fluido portador. El intervalo del tamaño de la partícula de las microcápsulas obtenido por co- extrusión es de entre 500-1000 μm . El tamaño de la partícula es muy grande para la útil inclusión de muchas comidas, porque las partículas de alrededor de 100 μm impacta en la sensación de la boca (Kaushik, 2014).

3.6.5 Inyección fundida

El proceso de inyección fundida empieza con la mezcla de aceite omega -3 en una matriz que contiene almidón, anti- oxidantes, azúcares, emulsificantes y agua a aproximadamente 130 °C. La mezcla es luego extruida a través de un filtro y recolectada en una tina llena con solvente orgánico frío (isopropanol o nitrógeno líquido), el cual solidifica la matriz de azúcar y la transforma en un material en estado vidrioso, el cual es lavado con terpeno (ej. limoneno) para remover la superficie de aceite. El aceite microencapsulado obtenido usando este método se notó que es muy estable cuando se almacena a $a_w \leq 0.3$. Sin embargo, este proceso hace posible evadir el ubicuo uso de gelatina u otras proteínas en la encapsulación de aceites omega- 3. Sin embargo, la longitud de la partícula limita la utilidad de este método para la preparación de ingredientes alimenticios (Kaushik, 2014).

3.6.6 Coacervación compleja

Coacervación es definida generalmente como la separación de dos fases líquidas en una solución coloidal. Una de las dos fases es rica en polímeros y es llamada la fase de coacervación y la otra es vacía, llamada solución de equilibrio. En caso de coacervación simple solo hay un polímero, mientras que la coacervación compleja involucra la interacción de dos coloides cargados opuestamente. En la microencapsulación de aceites omega- 3 por coacervación simple el componente de aceite es usualmente dispersado en solución de gelatina y luego un ajuste de pH causa que la gelatina se coacerve y forme una capa sobre las gotas de aceite. El paso de enfriamiento subsecuente endurece la capa y encapsula el aceite (Kaushik, 2014).

La coacervación compleja usa dos polímeros cargados opuestamente y es una de las tecnologías más prometedoras para la estabilización de los aceites omega-3 por microencapsulación, ya que entrega la carga útil más alta (40%-60%). Los dos hidrocoloides más usados típicamente en la coacervación compleja de aceites de omega 3 son gelatina o suero de proteína y goma arábiga cargada opuestamente, polifosfato de sodio o carboximetil celulosa. La formación de una capa externa por estas mitades de carga opuesta es inducida por el ajuste del pH. La solidificación del caparazón formado por desnaturalizado térmicamente de la proteína o por enlace cruzado de las cadenas de las proteínas por glutaraldehído o transglutaminasa (Kaushik, 2014).

La morfología de las microcápsulas obtenidas usando esta tecnología es ya sea mono -nucleado (un solo núcleo- una sola gota de aceite rodeada de caparazón) o poli- nucleado (multi- núcleo o multi gotas de aceite rodeadas de un caparazón en común). Pero el tamaño y la forma de las células depende de los dos métodos de formación de la emulsión y de los parámetros base del material, como lo son el tipo de polímeros, su peso molecular, densidad de carga, concentración y su radio.

Similarmente el tamaño y la forma de las células también depende de los parámetros basados en procesos como lo son el pH, temperatura, velocidades de

solidificación y enfriamiento. Por tanto, la interdependencia de todos estos factores, la optimización del proceso es un desafío (Kaushik, 2014).

La principal ventaja de la coacervación compleja es la producción de microcápsulas con menor tamaño de partícula con intervalos entre 1 μm a 100 μm . Sin embargo, comparado con otros procesos de microencapsulación la coacervación compleja da una carga inusualmente alta arriba de 90% para un solo núcleo y 60% para multinúcleos. Este proceso es también exitoso, previene la migración del aceite a la superficie de la partícula y la concentración de la superficie de aceite es normalmente bajo comparado con otros métodos, particularmente en el proceso del multinúcleo. Una concentración baja de la superficie de aceite es propicio en mantener las propiedades sensoriales de los polvos de coacervación compleja durante el almacenamiento de ácidos grasos omega-3. La carga útil más alta es requerida para conseguir satisfacer la necesidad de incrementar la ingesta diaria en la dieta de ácidos grasos omega-3 (Kaushik, 2014).

La tecnología de coacervación compleja también viene con algunas desventajas. Esta tecnología funciona como un proceso por lotes, el cual es un consumidor de tiempo y puede compensar las ventajas en ahorro de uso de menos material de pared. Además, este proceso requiere un paso extra para permitir la reticulación de la proteína. Sin embargo, las coacervados formadas con esta técnica son estables en un intervalo reducido de pH y fuerza iónica, por lo tanto, encontrar el punto correcto final antes de la reticulación requiere un monitoreo cuidadoso incluso a niveles de producción. Este proceso usa primariamente gelatina como el polímero cargado positivamente, pero la gelatina de derivados animales no es aceptada por la comunidad vegetariana. La gelatina de pescado es también usada en lugar de la gelatina derivada de animales. Sin embargo, el costo del material para la producción de gelatina de pescado es limitado, en especial si es requerida gelatina de alta floración. En adición, el costo de la gelatina de pescado es de 4 a 5 veces mayor a la gelatina de puerco. Las desventajas previamente mencionadas asociadas con la gelatina de puerco y de pescado sugiere que hay una necesidad de variedad de

fuentes de agentes de coacervación las cuales sean de origen vegetal y puedan dar una carga útil alta, fuerza estructural y estabilidad oxidativa (Kaushik, 2014).

3.6.7 Complejación inclusiva

Esta tecnología normalmente usa ciclodextrinas como agente encapsulante. Las ciclodextrinas son oligosacáridos cíclicos de seis a ocho unidades D-glucosa, que se unen enzimáticamente a través de uniones α (1-4) de un anillo. Ciclodextrinas de complejos con LCPUFA's, y proveen alguna protección contra la oxidación. En una patente asignada a Schmid, el aceite de pescado fue mezclado con gamma ciclodextrina (con ocho moléculas de glucosa) para formar un complejo. Este complejo inclusivo fue formado por medio de turbulencia continua de la mezcla de la ciclodextrina de aceite- gamma de pescado en la presencia de nitrógeno a 45°C por 24h. El producto complejo resultante contiene la carga útil de aceite de pescado de 15% a 40% y fue estable cuando se almacenó por debajo de los 100°C por 24h (Kaushik, 2014).

Choi et al. (2010) encapsulo el aceite de pescado en una ciclodextrina y reportó una eficiencia de encapsulación de 84.1% y una carga útil del 62.7%. Sin embargo, la superficie de aceite después de la liofilización fue de 11.0%, la cual es alta comparada con la superficie de aceite de los polvos obtenidos usando coacervación compleja (Kaushik, 2014).

3.6.8 Atrapamiento por liposomas.

Un liposoma es una vesícula de lípido compuesta de bicapas que encierran un número de compartimentos acuosos. Los fosfolípidos son usados primariamente como agentes encapsulantes en procesos de microencapsulación basados en liposomas. Los liposomas han sido usados para encapsular ácidos grasos omega-

3 disolviendo la fuente de aceite en fosfolípido antes de la adición de agua. Esta mezcla de fosfolípido comprimido, aceite de omega-3 y agua es zonificado de productos encapsulados y finalmente secados a polvos. El aceite encapsulado en liposomas es un poco más estable contra la oxidación. La ventaja principal de esta tecnología es que los ingredientes encapsulados como las enzimas pueden ser enviadas a locaciones específicas dentro de los productos de comida, como el componente de cuajada de la leche en la preparación de quesos. Sin embargo, el alto costo y algunas veces poca estabilidad limita la aplicación de esta tecnología para la microencapsulación de ácidos grasos (Kaushik, 2014).

3.7 Métodos emergentes de microencapsulación de aceites omega-3

Sergio et al. (2010) usaron electro aspersion para la microencapsulación de DHA en ultradelgadas películas de prolamina zeína. Fueron formadas cápsulas de tamaño nanométricas usando electro aspersion y el periodo de inducción para la encapsulación de aceite fue incrementada, mostrando una mejorada estabilidad oxidativa venciendo al revestimiento de la prolamina zeína. La presencia de este revestimiento tiene un impacto mínimo en las características de textura del producto, indicando que este es una prometedora tecnología en la industria alimenticia (Kaushik, 2014).

3.7.1 Granulación por aspersion y revestimiento de película de lecho fluidizado

Para alcanzar la estabilidad del aceite de pescado, la granulación por aspersion y el revestimiento de lecho fluidizado fueron usados en combinación para la microencapsulación. En esta tecnología, las microcápsulas fueron producidas en dos pasos sucesivos. Primeramente, el aceite de pescado fue emulsificado con polisacáridos de haba de soya y maltodextrina y secado por aspersion para producir

gránulos. Posteriormente, los gránulos fueron revestidos usando hidroxipropil betaciclodextrina. Sin embargo, los autores encontraron que el revestimiento no es efectivo para prevenir la oxidación del lípido y por lo tanto este método no es útil para la estabilización del omega-3 sin un futuro desarrollo (Kaushik, 2014).

3.7.2 Encapsulación usando atomizador ultrasónico

Las boquillas de aspersión a presión producen una distribución de gran tamaño de gotas, ya que son incapaces de controlar el tamaño de las gotas. Los atomizadores ultrasónicos emplean energía ultrasónica para atomizar fluidos y proveer gotas más pequeñas con una distribución relativamente menor de tamaño (Kaushik, 2014).

Klaypradit & Huang (2008) encapsularon aceite de pescado usando un atomizador ultrasónico. Obtuvieron partículas pequeñas de tamaño y buena estabilidad de la emulsión en una matriz combinada de material de pared de maltodextrina y quitosano. Estas microcápsulas fluidizadas contenían 240 mg/g de EPA y DHA. La tecnología de atomizado ultrasónico tiene potencial para microencapsulación de aceites omega- 3, pero la carga útil es relativamente baja.

En un estudio similar, Legako & Dunford (2010) usaron tres boquillas de fluido a presión y dos boquillas de fluido ultrasónico. En estas boquillas el aceite y la solución acuosa que contiene el material de pared fluye en canales separados y no se mezcla hasta que se encuentra al final de la boquilla. La aplicación de estas boquillas elimina la necesidad del paso de la preparación de la emulsión previo al secado (Kaushik, 2014).

La eliminación del paso de la preparación de la emulsión elimina la oxidación que pueda ocurrir durante la emulsificación. Aunque, los resultados de estos estudios demostraron mejorar la estabilidad oxidativa durante el proceso, la microencapsulación usando boquillas de tres fluidos y boquillas ultrasónicas resultan en relativamente baja eficiencia de encapsulación. Por lo tanto, se

requieren más estudios profundos para evaluar los resultados usando una boquilla de tres fluidos para producir microcápsulas de aceite de pescado (Kaushik, 2014).

3.7.3 Proceso de microencapsulación de aceites omega- 3 usando la coacervación compleja.

Los complejos de coacervación formados por proteínas y polisacáridos han sido ampliamente usados como vehículos para la encapsulación de aceites omega-3. Se ha encapsulado aceite de pescado por coacervación compleja de hidroxipropil celulosa con maltodextrina y secado por aspersion de los coacervados obtenidos. Se encontró que la mejor estabilidad del aceite de pescado contra la oxidación se consigue reemplazando 40% de la maltodextrina con goma acacia. La microencapsulación de aceite de pescado por coacervación compleja con goma arábica y gelatina también se reportó. La limitación de este método fue que los coacervantes obtenidos tuvieron altos contenidos de agua después del secado por aspersion (Kaushik, 2014).

Barrow et al. (2007) desarrolló una tecnología de coacervación mejorada la cual involucra una aglomeración controlada y formación de un caparazón externo que rodea aglomeraciones múltiples. Esta tecnología ha sido escalada a nivel industrial y usada comercialmente para estabilizar y liberar aceites omega-3 en alimentos y bebidas. Drusch (2007) microencapsuló aceite de pescado rico en ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga en una matriz combinada de pectina de azúcar de remolacha y jarabe de glucosa. Los resultados de este estudio indicaron que la pectina de azúcar de remolacha podría ser una alternativa, un material de pared efectivo en costo como la goma Arábica; sin embargo, la carga máxima de aceite obtenido con la pectina de azúcar de remolacha en este estudio no fue de más del 50% (Kaushik, 2014).

Zhang et al. (2009) usaron suero de proteína y goma Arábica para encapsular aceite de pescado usando una combinación de coacervación compleja y proceso de

reticulación térmica. Fueron producidos polvos fluidos a través de secado por aspersión de los coacervados. En lugar de aplicar reticulación química o enzimática de proteínas, los autores usaron un proceso de reticulación térmica para solidificar las microcápsulas y prevenir su disolución. Las microcápsulas obtenidas con aislado de proteína de suero fueron estables en tratamientos de altas temperaturas, comparadas con esas obtenidas usando gelatina (Kaushik, 2014).

Para preservar y proteger el ácido graso omega -3 en el aceite de lino, este aceite debe ser microencapsulado por coacervación compleja usando gelatina – goma arábiga los cuales produjeron polvos libres. La producción de productos de oxidación primarios y secundarios fue inhabilitada en estos polvos cuando fueron almacenados a temperatura ambiente por 25 días. Los resultados de una literatura indican que la gelatina es el material escogido para el uso en procesos de coacervación compleja debido a sus propiedades únicas. Sin embargo, como la mayoría de las gelatinas son de origen animal, y la gelatina tiene sus propios problemas sensoriales, el uso de gelatina tiene algunas limitaciones en aplicaciones alimenticias y de bebidas. Por lo tanto, es necesario descubrir alternativas a la gelatina para la coacervación compleja. Materiales basados en plantas, como lo son las proteínas de chía y de lino, proveen una alternativa vegetariana y deben de ser estudiadas por su eficacia en términos de carga útil, prevención de la oxidación, así como de la fuerza estructural de los coacervados. Los polifenoles de las plantas han sido usados como agentes de reticulación y en la microencapsulación de aceites omega -3. Los polifenoles también han sido usados como antioxidantes para incrementar la vida útil del aceite de lino microencapsulado (Kaushik, 2014).

3.8 Biopolímeros

La selección del material de pared (agente encapsulante) influye en la estabilidad de las microcápsulas durante la formación y después del proceso de secado, afectando las características de las microcápsulas (Ré, 1998).

Los agentes encapsulantes comunes son proteínas (vegetales, animales y gelatina), gomas (acacia y mezquite) carbohidratos (sacarosa, maltodextrina, almidón modificado, ciclodextrina y celulosa) lípidos, grasas, ceras, lecitinas (emulsionantes) y fibras.

Carbohidratos.

Los carbohidratos son extensamente usados como material de pared para encapsular ingredientes alimenticios debido a su habilidad para formar sólidos vídriosos amorfos que proveen soporte estructural al material de pared del sistema de liberación. Su habilidad para retener el ingrediente activo, es complementario a su diversidad, bajo costo y su extenso uso en el medio alimenticio es lo que lo hace el material de pared preferido para la encapsulación (Labuschagne, 2018).

La maltodextrina es un almidón hidrolizado comúnmente usado como un material para la pared en la microencapsulación en ingredientes alimenticios (Gharsallaoui et al, 2007), este ofrece ventajas como lo son bajo costo, aroma y sabor neutro, baja viscosidad a altas concentraciones de sólido y buena protección contra la oxidación. Aun así, el problema más grande de este material es su baja capacidad emulsionante. También puede ser usado en combinación con otros biopolímeros de superficie activa como la goma arábica, almidones modificados y proteínas con el objetivo de obtener una microencapsulación efectiva mediante secado por aspersion.

La hidroxipropilmetil celulosa (HPMC), soluble en agua, celulosa no iónica derivada ha sido ampliamente usada en productos alimenticios. La presencia de grupos hidroxipropil y metil hacen a las moléculas de celulosa hidrofóbicas y hace su superficie activa y adecuada para la encapsulación de aceites (Gharsallaoui et al., 2007). La mayoría de los estudios encontrados en la literatura sobre la microencapsulación de aceites han sido realizados usando aceites de pescados (Hogan, 2003). Los aceites de pescado son similares a los aceites de la nuez y de los ácidos grasos poliinsaturados, a pesar de que su composición es muy distinta. Algunos trabajos han reportado que la microencapsulación de aceites de pescado tiene aproximadamente 27%, 29%, 33% de ácidos grasos ω -3, los aceites de nuez

y chía contienen aproximadamente 15% y 60% respectivamente, de ácidos grasos α -linoleico (ω -3).

Hay muy poca información disponible sobre la microencapsulación del aceite de nuez o de chía y ninguno de los trabajos publicados reporta la influencia de maltodextrina combinada con hidroxipropilmetil celulosa y sus materiales de pared, en la estabilidad antioxidante de estos aceites (Rodea-González et al., 2012).

Proteínas

Las proteínas y aislados que contienen proteínas (sueros, soya, caseína, gelatina) consisten en un rango diverso de grupos funcionales que imparten propiedades anfifílicas por lo tanto, excelentes capacidades emulsificantes, esto las hace favorables para la disolución de ingredientes activos hidrofóbicos. Algunas de sus principales desventajas son sus altos costos, su pobre solubilidad en agua fría, las anteriores combinadas con su reportada baja eficiencia de encapsulación, hacen a las proteínas un material de pared más caro. Un enfoque común es combinar proteínas o gomas que contienen proteínas con carbohidratos, donde la fracción de proteína funciona como emulsificante y ayuda a formar la película, y el carbohidrato como el material formador de matriz. Una combinación muy popular en el secado por aspersión es la soya o el suero de proteína con maltodextrinas (Labuschagne, 2018).

Gomas

La goma más popular usada como material de pared es la goma Arábiga, también conocida como goma acacia. Su popularidad se debe a características favorables como: su capacidad para formar películas, solubilidad acuosa, baja viscosidad, buena retención de ingredientes activos volátiles y propiedades emulsificantes, todo originado de una pequeña fracción (+- 5 %) de proteína presente en la goma, sin embargo, su uso es limitado a varios factores como: altos costos, disponibilidad limitada (300g/planta/año) y la presencia de impurezas. Similar a las combinaciones proteína/maltodextrina, pero aún más populares es la combinación de gomas con

carbohidratos, más específicamente maltodextrinas. Los bajos costos y la diversidad de las maltodextrinas combinadas con sus favorables características permiten una gran libertad en la formulación del material de pared (Labuschagne, 2018).

3.9. Isotermas de sorción.

3.9.1 Adsorción.

La adsorción del agua en la superficie de un alimento puede tener origen físico o químico (Roge, 2003).

3.9.2 Actividad de acuosa (a_w).

El agua, el mayor constituyente de los alimentos naturales, tiene muchos roles en el procesamiento de los alimentos y, mientras su química es simple, el impacto que tiene en las reacciones y la calidad de los alimentos es mayor que el de cualquier otro componente químico (Hildar et al., 2018).

El estudio de las isotermas de adsorción permite a los usuarios con información específica saber cómo manejar un producto durante su almacenamiento y conservación. Este método de cálculo nos permite calcular el valor óptimo de la actividad de agua para la conservación. El concepto de actividad de agua puede ser definido como:

$$a_w = p/p_0 = \frac{\text{Humedad relativa}}{100} \quad (1)$$

Donde p es la presión parcial de agua en el alimento (atm), y p_0 es la presión de vapor de agua pura en a la misma temperatura (atm) (Hildar et al., 2018).

3.9.3 Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción que describen la distribución de un soluto entre la solución y el adsorbente en el equilibrio, pueden proveer información esencial sobre la capacidad del adsorbente y la interacción entre el adsorbente y el adsorbato (Stanciu, 2018).

El análisis de los datos de las isotermas de sorción por la aplicación de principios termodinámicos provee el calor isostérico de sorción, el cual da la medida de la interacción agua-sólido. El calor isostérico de sorción se necesita para estimar el requerimiento de energía para la concentración y proceso de secado y da información sobre el estado del agua (Mujumdar et al., 2007).

Los modelos matemáticos son muy útiles para describir y predecir isotermas de adsorción a diferentes condiciones experimentales, y por lo tanto para calcular todas las propiedades termodinámicas que pueden ser deducidas. Más de 77 ecuaciones que tienen dos o más parámetros han sido sugeridos para investigación matemática de la información de las isotermas de adsorción (Oswin et al., 1946). Estas ecuaciones son teóricas, semiempíricas o empíricas (Nurhene, 2008).

Modelos teóricos

Modelo B.E.T

La ecuación de sorción de Brunauer, Emmett y Teller representa un hito fundamental en la interpretación de isotermas de sorción en la multicapa, particularmente tipo II y tipo III. Esta provee una estimación de la cantidad de humedad en la monocapa adsorbida en la superficie (McMinn, 2002).

En casi todos los casos los gráficos B.E.T son solo lineales sobre valores de la región de presión relativa baja a_w del sorbato $0.05 < a_w < 0.35$ (McMinn, 2002).

$$M = \frac{M_0 * C_B * a_w}{(1-a_w)*(1-a_w+C_B+a_w)} \quad (2)$$

donde:

M = Contenido de humedad en el equilibrio $\left(\frac{KgH_2O}{100 Kg s.s.}\right)$

M_0 = Contenido de humedad en la monocapa $\left(\frac{KgH_2O}{100 Kg s.s.}\right)$

a_w = Actividad de agua

C_B = Constante relacionada con el calor neto de sorción

Modelo G.A.B

Es un modelo semi teórico, multimolecular, localizado y homogéneo modelo de adsorción (McMinn, 2002).

$$M = \frac{M_0 * C_G * K * a_w}{(1 - K * a_w) * (1 - K * a_w + C_G * K * a_w)} \quad (3)$$

donde:

M = Contenido de humedad en el equilibrio $\left(\frac{KgH_2O}{100 Kg s.s.}\right)$

M_0 = Contenido de humedad en la monocapa $\left(\frac{KgH_2O}{100 Kg s.s.}\right)$

a_w = Actividad de agua

C_G = Constante relacionada con las energías de interacción entre la primera y más lejanas moléculas en los sitios individuales de sorción.

K = Constante relacionada con las energías de interacción entre la primera y más lejanas moléculas en los sitios individuales de sorción.

El modelo G.A.B representa una extensión más refinada de la teoría B.E.T (McMinn, 2002).

Modelo Halsey.

Esta ecuación provee una expresión para la condensación de las multicapas a una distancia relativamente larga desde la superficie (McMinn, 2002).

$$M = \left(\frac{-A}{(\ln(a_w))} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (4)$$

donde:

M = Contenido de humedad en el equilibrio $\left(\frac{KgH_2O}{100 Kg s.s.} \right)$

A = Constante

a_w = Actividad de agua

B = Constante

Halsey demostró que esta ecuación se ajustaba bien a la representación de los datos de adsorción que conforman las isothermas tipo I, II o III (McMinn, 2002). Iglesias y Chirife reportaron que la ecuación de Halsey puede ser usada para describir 220 isothermas de adsorción de 69 diferentes comidas en el rango de $0.1 < a_w < 0.8$ (McMinn, 2002).

Modelo Smith

Smith desarrollo un modelo empírico para describir la porción curvada final de la isoterma de adsorción de agua de un biopolímero de alto peso molecular. El teorizo que hay dos fracciones de agua sorbidas en una superficie seca, la primera se esperaba que siguiera el modelo de Langmuir. Smith baso su modelo en la segunda fracción, la cual puede formarse solo después de que la primera fracción ha sido sorbida, el considero que la segunda fracción consistía en multicapas de moléculas condensadas de agua, las cuales previenen efectivamente la posible evaporización de la capa inicial (McMinn, 2002).

El modelo Smith puede escribirse como:

$$M = A + B \log(1 - a_w) \quad (5)$$

donde:

M = Contenido de humedad en el equilibrio ($\frac{KgH_2O}{100 Kg s.s.}$)

A = Cantidad de agua en la primera fracción sorbida.

a_w = Actividad de agua

B = Cantidad de agua en la fracción de humedad en la multicapa (McMinn, 2002).

Modelo Henderson

Uno de los modelos más ampliamente usados que relaciona la actividad de agua con la cantidad de agua sorbida es la ecuación o modelo Henderson y se escribe como:

$$M = \left(\frac{\ln(1 - a_w)}{-A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (6)$$

donde:

M = Contenido de humedad en el equilibrio ($\frac{KgH_2O}{100 Kg s.s.}$)

A = Constante

a_w = Actividad de agua

B = Constante (McMinn, 2002).

Modelo Oswin

Oswin desarrollo un modelo empírico que es una expansión de series para curvas con formas sigmoideas y se escribe de la siguiente manera:

$$M = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B \quad (7)$$

donde:

M = Contenido de humedad en el equilibrio ($\frac{KgH_2O}{100 Kg s.s.}$)

A = Constante

a_w = Actividad de agua

B = Constante

Se considera a la ecuación Oswin la más conveniente para describir las isothermas de comida almidonada, y con un ajuste relativamente bueno para carne y vegetales.

Esta ecuación también fue usada por Labuza et al. para relacionar el contenido de humedad de leche seca sin grasa con valores arriba de $a_w = 0.5$ (McMinn, 2002).

Lewicki

$$M = A\left(\frac{1}{a_w} - 1\right)^{B-1} \quad (8)$$

Pleg

$$M = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2} \quad (9)$$

Chung & Pfof

$$M = \frac{\ln\left(-\frac{\ln a_w}{A}\right)}{-B} \quad (10)$$

(Carvalho et al., 2015)

Chen

$$M = \frac{\ln\left(-\frac{\ln(-\ln a_w) - K}{C}\right)}{B} \quad (11)$$

Clasificación de Isotermas de adsorción.

Tipo I

Cinco tipos de isotermas son descritos por Brunauer, Deming, y Teller (1940). La isoterma tipo I es conocida como Isoterma de Langmuir, que se obtiene por la adsorción monomolecular de gas en poros sólidos en un volumen finito de vacíos.

Tipo II

La isoterma tipo II es la isoterma sigmoideal, la cual se obtiene de productos solubles y muestra tendencia asintótica ya que la actividad de agua tiende a 1.

Tipo III

La isoterma tipo III conocida como la isoterma Flory-Huggins, se ajusta para la adsorción de un solvente o un plastificante como el glicerol, por ejemplo, por encima de la temperatura de transición vítrea.

Tipo IV

La isoterma tipo IV describe la adsorción por un sólido hidrofílico hinchable hasta que un máximo de hidratación de sitios es alcanzado.

Tipo V

La isoterma número V es la isoterma B.E.T (Brunauer, Emmett & Teller, 1938) isoterma de adsorción en multicapa, observada en la adsorción de vapor de agua sobre carbón y relacionada con las isotermas tipo II y III (Roge, 2003).

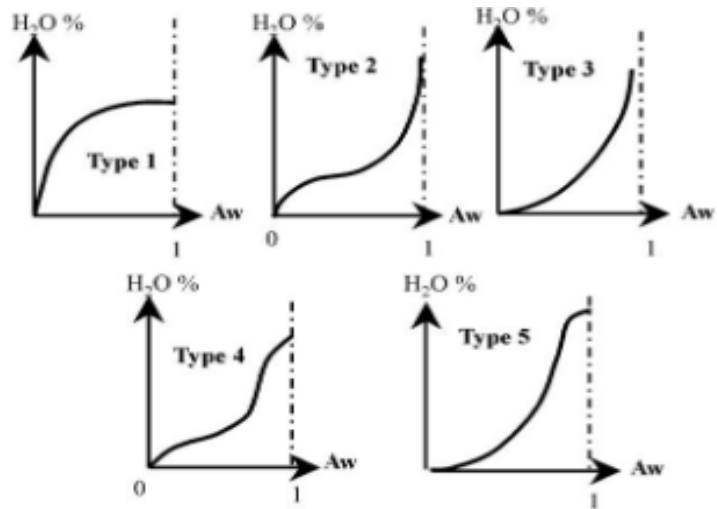


Fig. 1. Five types of isotherms (Brunauer, Emmett, & Teller, 1938).

*Fuente: Brunauer, 1938.

Figura 1: Tipos de isothermas.

4 Justificación, hipótesis, objetivos

4.1 Justificación

En los últimos años la sociedad ha optado por el consumo de productos de origen natural, libres de químicos en la mayor medida posible. Por tal motivo, ha habido un interés creciente en la industria alimentaria por buscar nuevas fuentes de alimentos que sean convenientes, seguras y que cumplan con el requerimiento del consumidor de que su origen sea natural. Actualmente existen diversos aceites comestibles naturales provenientes en gran parte de vegetales, como es el caso del aceite de semilla de chía. Este aceite en particular posee propiedades muy atractivas para el consumo humano pues es una fuente rica en ácidos grasos insaturados, siendo de especial importancia el ácido α -linolénico (Omega 3), que está relacionado con la disminución de triglicéridos en la sangre y funciones fisiológicas (Geranpour et al., 2020). No obstante, de tener un alto contenido de Omega-3, el aceite de chía es susceptible a degradarse por factores ambientales, sobre todo a la oxidación de sus ácidos grasos insaturados. Por tal motivo, se requiere de la aplicación de alguna tecnología para evitar o disminuir dicho deterioro. La respuesta se encuentra en la microencapsulación mediante secado por aspersion, proceso mediante el cual se envuelve con una película protectora al material sensible, disminuyendo considerablemente la incidencia de factores externos en la calidad del producto (Ye et al., 2018). Por otra parte, el concepto más utilizado para relacionar el contenido de agua y las propiedades de un alimento es la actividad acuosa. Se ha demostrado que es un factor clave para el crecimiento microbiano, producción de toxinas y resistencia al calor, también juega un papel importante en la estabilidad química y en la calidad de los alimentos. La relación entre la actividad acuosa y el contenido de humedad en equilibrio a una temperatura constante es llamada isoterma de sorción de humedad, la cual, hace referencia a procesos de adsorción (hidratación) o desorción (deshidratación). En el primer caso, la información obtenida es valiosa en el caso de estudios de almacenamiento de productos secos y para el caso de la

desorción, se utiliza en trabajos de investigación para procesos de secado, determinar condiciones óptimas de almacenamiento, predicción de vida útil y selección del material de empaque adecuado (Ramírez et al., 2014).

El interés de este trabajo es estudiar el fenómeno de adsorción de humedad en microcápsulas de aceite de chía empleando mezclas de goma de mezquite-concentrado de proteína de suero de leche (GM-WPC) como agentes encapsulantes a partir de la obtención de isothermas experimentales, y estableciendo diferentes parámetros matemáticos de ajuste entre el contenido de humedad en el equilibrio y la actividad acuosa en base a seis modelos de aplicación: Dos modelos teóricos (B.E.T. y G.A.B.), dos modelos semiempíricos (Lewicki y Halsey) y por último dos modelos empíricos (Oswin y Henderson) para finalmente obtener el área específica de adsorción y el radio de poro de los microencapsulados.

4.2 Hipótesis

Es posible establecer condiciones de estabilidad de microcápsulas de aceite de chía modelando el proceso de adsorción de humedad mediante expresiones cinéticas teóricas, semiempíricas y empíricas

4.3 Objetivo general

Analizar el proceso de adsorción de humedad en microcápsulas de aceite de chía mediante modelos cinéticos teóricos, semiempíricos y empíricos para establecer condiciones de estabilidad.

4.4 Objetivos específicos

- Extraer el aceite de chía mediante un proceso de prensado en frío.
- Formular emulsiones aceite en agua (O/W) empleando como agentes emulsionantes concentrado de proteína de suero de leche (WPC) y goma de mezquite (GM).
- Elaborar microcápsulas de aceite de chía mediante secado por aspersion.

Obtener isotermas de adsorción experimentalmente mediante el método gravimétrico de celdas en equilibrio.

- Ajustar los datos experimentales obtenidos mediante diferentes modelos cinéticos de adsorción.
- Obtener el área superficial de adsorción y el radio del poro de las microcápsulas de aceite de chía.

Establecer las condiciones de estabilidad de las microcápsulas de aceite de chía.

5. Metodología

5.1. Materiales

Para la extracción del aceite en estudio se utilizaron semillas de chía, que se obtuvieron de la región de Atlixco, Estado de Puebla.

Los agentes encapsulantes utilizados fueron: (1) Goma de mezquite (GM) (*Prosopis laevigata*), que fue recolectada del Estado de San Luis Potosí, México, en forma de lágrimas, que se purificó de acuerdo a Vernon-Carter et al. (1996); y (2) Concentrado de proteína de suero de leche (WPC), la cual fue adquirida en la compañía Hilmar Ingredients, Gilmar, CA, EUA.

Los disolventes empleados fueron: (1) Agua destilada, proporcionada por el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma del Estado de México; (2) Reactivos grado analítico, que se adquirieron de la compañía Sigma Aldrich S. A. de C. V., Toluca, México.

5.2. Métodos

5.2.1 Extracción del aceite de chía

Se recurrió al método de prensado en frío para la extracción del aceite. Se colocaron 300g de semillas de chía dentro de un émbolo de 40 cm de largo por 10 cm de diámetro, y este a su vez se puso en una prensa hidráulica Tamer (modelo PHT-20, Shangai, China). Se ejerció presión gradual sobre el pistón hasta alcanzar las 9 toneladas, a temperatura ambiente. El aceite extraído se recolectó en un vaso de precipitado, a continuación, fue envasado en frascos de vidrio color ámbar y almacenado a 4 °C.

5.2.2. Formulación de emulsiones aceite-en-agua (O/W)

Se formuló una emulsión O/W empleando como agentes encapsulantes WPC y GM. El procedimiento consistió en dos etapas: (1) Se formuló la fase continúa dispersando el biopolímero en agua; (2) La fase dispersa fue añadida gota a gota a la fase continua emulsionada en un homogeneizador Ultra-turrax T50 basic (IKA-WERKE Works Inc., Wilmington, NC, EUA), a una velocidad de 6400 rpm durante 10 min. La emulsión contuvo 30% de sólidos totales con una relación 1:3 de material activo a material de pared. La emulsión se mantuvo en un baño con hielo para mantener la temperatura por debajo de los 30 °C.

5.2.3. Obtención de microcápsulas a través de secado por aspersion

Se alimentó la emulsión O/W descrita anteriormente a un flujo de 40 mL/min por medio de un dosificador a un secador por aspersion Nichols/Niro a nivel planta piloto (Turbo Spray PLA, Nueva York, EUA), a una temperatura de entrada del aire de 135 ± 5 °C, inyectando aire comprimido a 4 bar. La temperatura del aire a la salida del secador se ajustó a 80 ± 5 °C (Pérez-Alonso et al., 2008).

5.2.4 Isotermas de adsorción de las microcápsulas

Las isotermas de adsorción de agua en las microcápsulas se determinaron a 25, 35 y 40 °C, utilizando el método descrito por Lang et al. (1981). Se pesó 1.0 g de microcápsulas en una balanza analítica marca Ohaus (modelo AP210, Nueva Jersey, EUA). Las muestras se colocaron en desecadores de vidrio de 10 cm de diámetro, previamente acondicionados, que contenían diferentes soluciones salinas saturadas en el fondo en el intervalo de actividad acuosa (a_w) de 0.1 a 0.9 (Labuza, 1985). Posteriormente los desecadores se introdujeron en estufas de convección forzada (marca Felisa) y se mantuvieron a las temperaturas ya mencionadas. Las muestras fueron pesadas cada 5 días en una balanza electrónica Ohaus (modelo AP210, Nueva Jersey, EUA) y su a_w se obtuvo con un medidor de actividad de agua Aqualab con compensador de temperatura (modelo series 3 TE, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EUA).

Los datos experimentales se ajustaron a los diferentes modelos descritos en la sección de antecedentes.

5.3. Área específica de adsorción

El área específica de adsorción (S_0) juega un papel importante en la determinación de los enlaces de agua en un material. Se calcula a partir de los valores de humedad en la monocapa (M_0) tal como se muestra en la ecuación 12 y 13 (Velázquez-Gutiérrez et al., 2015):

$$S_0 = M_0 * \left(\frac{1}{M_w}\right) * N_0 * A_{H_2O} \quad (12)$$

donde:

S_0 : área específica de adsorción ($\frac{m^2}{g}$)

M_w : peso molecular del agua ($0.018015 \frac{Kg}{mol}$)

N_0 : número de Avogadro ($6.023 \times 10^{23} \frac{moléculas}{mol}$)

A_{H_2O} : área de la molécula del agua ($1.06 \times 10^{-19} m^2$)

Por lo tanto,

$$S_0 = 3.5 \times 10^3 * M_0 \quad (13)$$

La ecuación de Kelvin se utilizó para calcular el radio crítico del poro. Esta ecuación se aplica principalmente en la región de condensación para la isoterma (Velázquez-Gutiérrez et al., 2015).

$$r_c = \frac{2 * \sigma * V_m}{R * T * \ln(a_w)} \quad (14)$$

donde:

r_c : radio crítico del poro (m)

σ : tensión superficial ($\frac{N}{m}$)

V_m : volumen molar del sorbato ($\frac{m^3}{mol}$)

R : constante universal de los gases ideales ($8.314 \times 10^{-3} \frac{KJ}{mol K}$)

T : temperatura (K)

a_w : actividad acuosa

A partir de la ecuación de Halsey se calculó el espesor de las multicapas de agua adsorbida:

$$t = 0.354 \left(\frac{-5}{\ln(a_w)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

donde:

t : espesor de la multicapas de agua adsorbida (nm)

Finalmente, el radio del poro (r_p) se puede obtener por la ecuación descrita en Velázquez-Gutiérrez et al. (2015), a partir de la suma del radio crítico (r_c) cuando se produce la condensación o evaporación capilar y el espesor de las multicapas (t):

$$r_p = r_c + t \quad (16)$$

6 Resultados y discusión.

6.1. Isotermas de adsorción

6.1.1 Modelo teórico G.A.B.

El modelo teórico G.A.B (ecuación 3) fue utilizada para ajustar los datos experimentales obtenidos (tabla 16, tabla 17 y tabla 18), los valores del módulo de desviación relativa media (E) encontrados fueron 3.0%, 3.72% y 2.71% a 25°C, 35°C y 40°C, respectivamente. Se observa que dicho valor se vuelve confiable a medida que aumenta la temperatura, los parámetros C_G , K y M_0 se obtuvieron a partir de una regresión no lineal con el software Polymath 6.0, los coeficientes de determinación R^2 fueron superiores a 0.994 para las tres temperaturas. El modelo G.A.B: es particularmente importante respecto a otros modelos ya que se puede conocer el parámetro M_0 (humedad en la monocapa), el cual se considera como el valor en el cual el alimento es estable durante el almacenamiento, ya que es la cantidad de agua que está fuertemente unida a todos los sitios activos de la fase sólida adsorbente del alimento, para este parámetro se obtuvieron los siguientes valores para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente: 4.99, 4.48 y 3.93, lo que indica que el valor de la monocapa va siendo menor a medida que aumenta la temperatura en este intervalo de temperatura

Tabla 3: Parámetros del modelo de G.A.B. para las isotermas de adsorción

Modelo G.A.B.	Temperatura		
Parámetros	25°C	35°C	40°C
Mo	4.99	4.48	3.93
K	0.77	0.78	0.81

Cg	5.32	4.61	3.22
R^2	1	1	1
Varianza	0.09	0.08	0.04
% Error	3	3.72	2.71

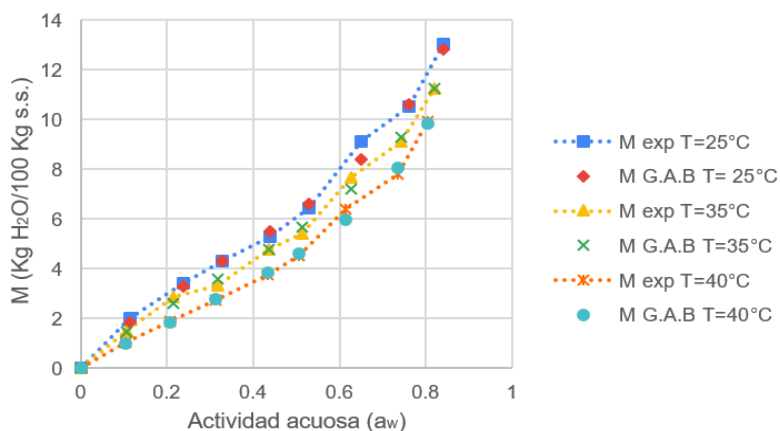


Figura 2: Isoterma de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de G.A.B.

6.1.2 Modelo teórico B.E.T.

Los coeficientes de determinación obtenidos con la ecuación B.E.T. fueron 0.86, 0.93 y 0.97 para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente, lo cual muestra que a mayor temperatura mayor es el coeficiente de determinación y por lo tanto el modelo teórico se ajusta más a los valores experimentales. Los valores del módulo de desviación relativa media (E) resultantes fueron 18.50%, 14.08% y 11.47% para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente.

Representa un hito en la interpretación de isothermas de sorción en multicapa, provee una estimación del valor de la humedad adsorbida en la monocapa de la superficie. En casi todos los casos los gráficos B.E.T. solo son lineales sobre una presión relativa más baja (a_w) del sorbato ($0.05 < a_w < 0.35$). La ecuación ha sido útil para definir un valor óptimo de humedad para el almacenamiento y secado de las comidas, y en la estimación del área de superficie de la comida (McMinn, 2002).

Las constantes obtenidas con la solución de este modelo son M_0 (contenido de humedad en la monocapa) y C_B (constante de energía) relacionada con el calor neto de sorción (McMinn, 2002).

Tabla 4: Parámetros del modelo de B.E.T. para las isothermas de adsorción

Modelo B.E.T	Temperatura		
Parámetros	25°C	35°C	40°C
Mo	2.15	2.28	2.11
Cg	81.8	58.1	15
R^2	0.86	0.94	0.97
Varianza	2.75	0.96	0.36
% Error	18.50	14.10	11.50

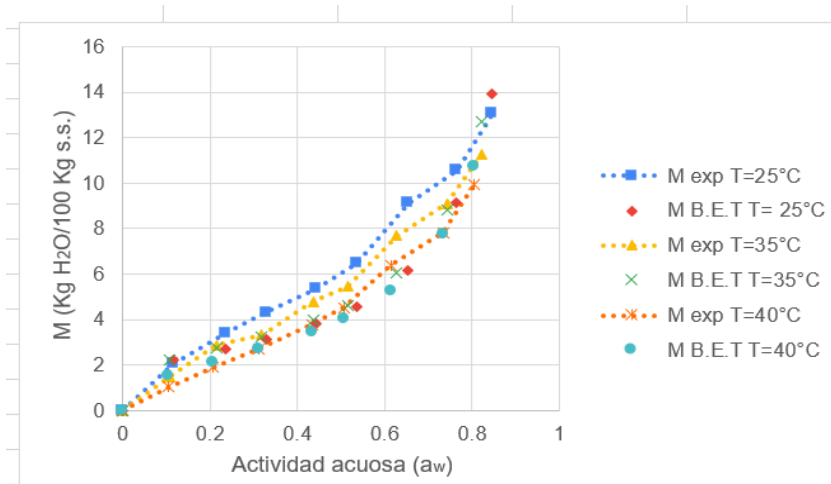


Figura 3: Isotherma de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de B.E.T.

6.1.3 Modelo semiempírico Halsey.

Para el modelo Halsey se obtuvieron valores de módulo de desviación relativa media de 9.37%, 11.50% y 12.90% correspondientes a las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente, por lo que en este caso a medida que sube la temperatura hay un mayor porcentaje de desviación; lo que significa que el modelo Halsey va siendo menos conveniente de usar a medida que la temperatura sube.

Es una expresión para explicar la condensación de multicapas de agua a una distancia relativamente larga desde la superficie, mediante los valores de los parámetros A y B, los cuales podemos observar que disminuyen a medida que la temperatura aumenta.

Tabla 5: Parámetros del modelo de Halsey para las isotermas de adsorción

Modelo Halsey	Temperatura		
Parámetros	25°C	35°C	40°C
<i>A</i>	13.8	8.34	4.71
<i>B</i>	1.69	1.52	1.32
R^2	0.97	0.97	0.97
<i>Varianza</i>	0.58	0.47	0.36
<i>% Error</i>	9.37	11.5	12.9

Halsey asumió que la energía potencial de una molécula varía como la potencia r th inversa de su distancia desde la superficie (McMinn, 2002).

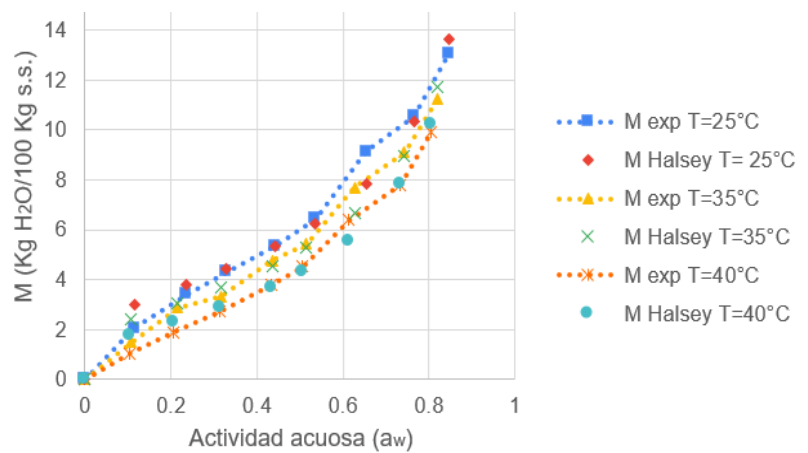


Figura 4: Isotherma de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de Halsey

6.1.4 Modelo empírico Henderson.

Uno de los modelos más usados que relaciona la actividad de agua y la cantidad de agua absorbida es la ecuación o modelo Henderson (McMinn, 2002).

Para este Modelo se obtuvieron los valores de las constantes matemáticas A y B las cuales muestran diferentes tendencias, en el caso de la constante A a subir a medida que aumenta la temperatura, mientras que en el caso de la constante B tiende a bajar a medida que aumenta la temperatura, los valores de coeficientes de determinación obtenidos con este modelo fueron de 0.995, 0.995 y 0.996 para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C, por lo que este modelo es muy recomendable para este intervalo de temperaturas, ya que el coeficiente de determinación es muy cercano a 1 y casi el mismo para las 3 temperaturas.

Los valores del módulo de desviación relativa media fueron de 4.10%, 4.44% y 3.74% para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente, por lo que el modelo se ajusta más a los datos experimentales y sin mucha variación a medida que sube la temperatura en este intervalo

Tabla 6: Parámetros del modelo de Henderson para las isotermas de adsorción

Modelo Henderson	Temperatura		
Parámetros	25°C	35°C	40°C
A	0.05	0.07	0.12
B	1.39	1.31	1.15
R^2	1	1	1

Varianza	0.09	0.07	0.04
% Error	4.10	4.44	3.74

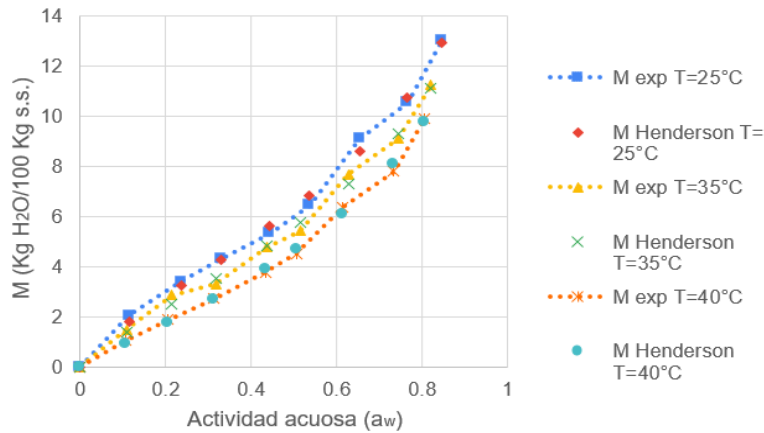


Figura 5: Isoterma de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de Henderson

6.1.5 Modelo empírico Oswin.

La ecuación o modelo de Oswin es una serie de expansión para curvas de forma sigmoidea. Esta ecuación es considerada la mejor para describir las isotermas de alimentos con almidón y de buen ajuste para vegetales y carnes (McMinn, 2002).

Se obtuvieron los valores de las constantes A y B con el programa Polymath mediante una regresión no lineal, los cuales muestran tendencias contrarias, ya que para el parámetro A sus valores disminuyen a medida que aumenta la temperatura, mientras que los valores de B aumentan a medida que la temperatura aumenta. Los valores de los coeficientes de determinación fueron de 0.99, 0.99 y 0.99 para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente, lo que indica que el modelo

tiene un gran nivel de ajuste respecto a los datos experimentales, lo que confirma que este modelo se ajusta bien a isothermas de vegetales.

Tabla 7: Parámetros del modelo de Oswin para las isothermas de adsorción

Modelo Oswin	Temperatura		
	25°C	35°C	40°C
Parámetros			
A	6.12	5.36	4.44
B	0.46	0.5	0.57
R^2	0.99	0.99	0.99
Varianza	0.16	0.12	0.07
% Error	4.47	5.77	5.45

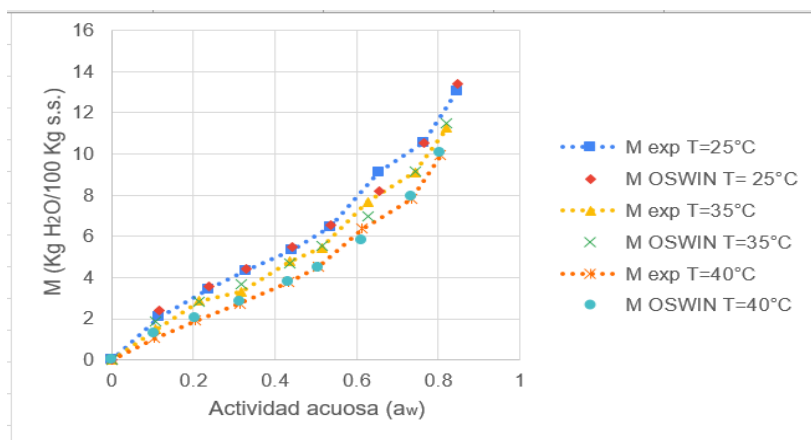


Figura 6: Isotherma de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsuladas con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de Oswin

6.1.6 Modelo Smith.

Los valores del coeficiente de determinación fueron de 0.98, 0.98 y 0.99 para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente. por lo que se demuestra que el modelo Smith se ajusta bien a los datos experimentales en este rango de temperatura y que se aproximan más a los valores experimentales a medida que incrementa la temperatura en este intervalo. Donde M es el contenido de agua, A la cantidad de agua absorbida en la primera fracción y B la cantidad de agua en la fracción de humedad en la multicapa (McMinn, 2002).

Tabla 8: Parámetros del modelo de Smith para las isotermas de adsorción

Modelo Smith	Temperatura		
Parámetros	25°C	35°C	40°C
A	1.24	0.86	0.4
B	-15.2	-14.4	-13.5
R^2	0.98	0.98	0.99
Varianza	0.44	0.25	0.07
% Error	4.96	5.23	2.95

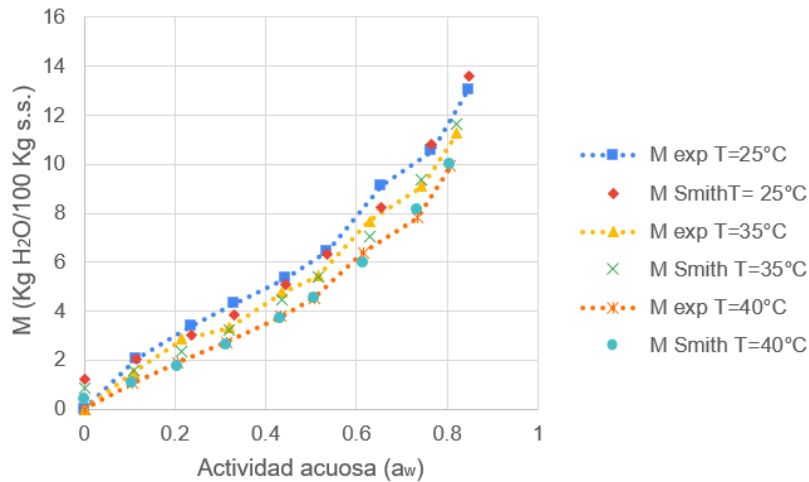


Figura 7: Isoterma de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de Smith

6.1.7 Modelo semiempírico Lewicki

Para este modelo los valores de sus parámetros matemáticos A y B muestran la misma tendencia de subir sus valores a medida que aumenta la temperatura en el intervalo estudiado, los valores obtenidos del coeficiente de determinación fueron 0.77, 0.77 y 0.80 para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente, lo que indica que el modelo se aproxima más a los datos experimentales a medida que aumenta la temperatura en este intervalo, también se observa que este modelo no tiene un coeficiente de determinación tan alto como otros modelos, por lo que el modelo no se ajusta tanto a los datos experimentales.

Tabla 9: Parámetros del modelo de Lewicki para las isotermas de adsorción

Modelo Lewicki	Temperatura		
Parámetros	25°C	35°C	40°C
A	5.18	4.53	3.72
B	0.44	0.39	0.3
R^2	0.77	0.77	0.80
Varianza	4.68	3.6	2.44
% Error	12.4	13.2	13.9

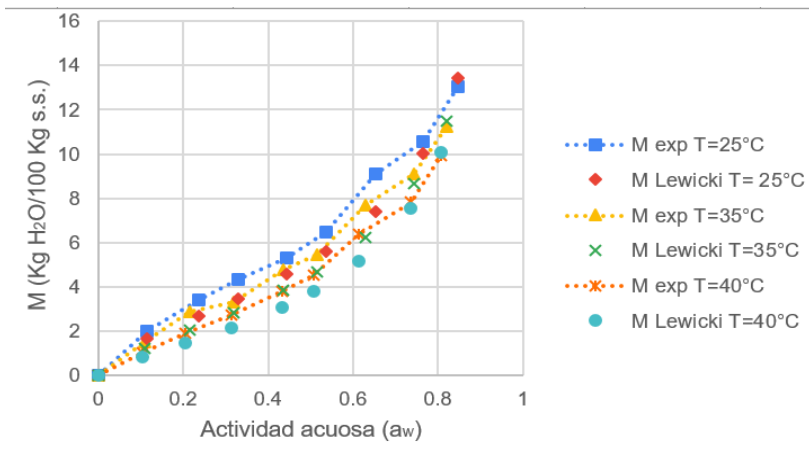


Figura 8: Isoterma de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsuladas con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de Lewicki

6.1.8 Modelo de Pleg

Para este modelo los valores de sus parámetros matemáticos, no mostraron una tendencia muy clara ya que K1 disminuye a medida que aumenta la temperatura, mientras que los valores de K2 bajaron y subieron en este mismo intervalo, los parámetros n1 y n2 si mostraron tener la misma tendencia a aumentar de valor a medida que aumenta la temperatura en este intervalo de temperatura; se obtuvieron valores de coeficiente de determinación mayores a 0.99 para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C y los valores de módulo de desviación relativa media de 2.58%, 4.18% y 2.14% para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente, por lo tanto este modelo se ajusta bien a los datos experimentales.

Tabla 10: Parámetros del modelo de Pleg para las isotermas de adsorción

Modelo Pleg	Temperatura		
Parámetros	25°C	35°C	40°C
k1	10.4	9.29	8.93
k2	7.47	7.05	7.34
n1	3.08	3.17	4.06
n2	0.59	0.67	0.87
R^2	1	1	1
Varianza	0.1	0.09	0.05
% Error	2.58	4.18	2.14

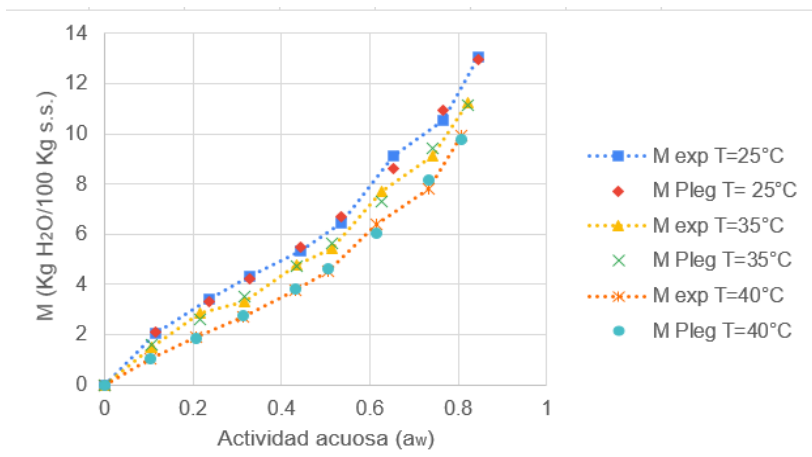


Figura 9: Isotherma de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de Pleg.

6.1.9 Modelo Chen.

Los resultados de los valores de sus parámetros matemáticos muestran tendencia a aumentar su valor a medida que aumenta la temperatura en este intervalo de temperatura, mientras que los valores obtenidos de coeficiente de determinación fueron 0.915, 0.910 y 0.909 para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente; mientras que los valores del módulo de desviación relativa media fueron de 22.70%, 25.90% y 28.70% para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente.

Tabla 11: Parámetros del modelo de Chen para las isothermas de adsorción

Modelo Chen	Temperatura		
	25°C	35°C	40°C
Parámetros			
K	0.77	0.8	0.81
C2	0.27	0.27	0.3
b1	0.19	0.23	0.24

R^2	0.92	0.91	0.91
Varianza	1.99	1.61	1.3
% Error	22.7	25.90	28.70

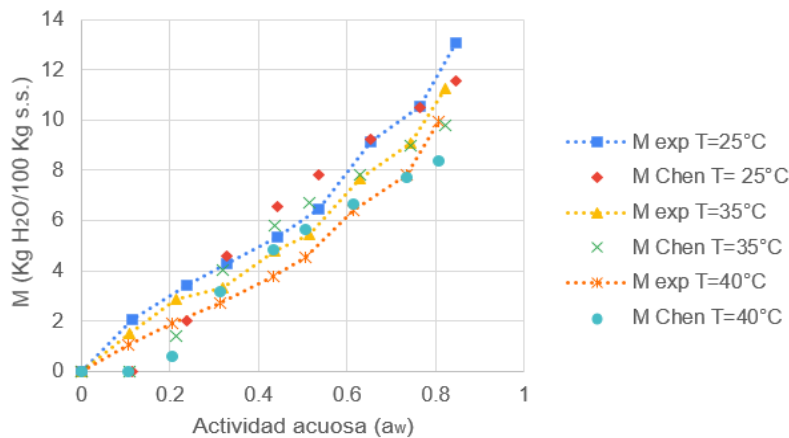


Figura 10: Isoterma de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de Chen

6.1.10 Modelo Chung y Pfof

Para este modelo los valores de sus parámetros matemáticos A y B muestran tendencias contrarias ya que mientras los valores de A disminuyen a medida que aumenta la temperatura, los valores de B aumentan a medida que aumenta también la temperatura en este intervalo de temperatura; se obtuvieron los valores de coeficiente de determinación fueron de 0.99, 0.99 y 0.99 para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente; mientras que los valores de módulo de desviación relativa media es de 6.24%, 8.44% y 11.40% para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente, lo que quiere decir que este modelo tiene un buen ajuste a los datos experimentales, pero diferente a los otros modelos este

modelo disminuye su coeficiente de determinación y aumenta sus valores de módulo de desviación relativa media a medida que sube la temperatura en este intervalo, lo que significa que tiene menor ajuste a los datos experimentales a medida que aumenta la temperatura en este intervalo.

Tabla 12: Parámetros del modelo de Chung & Pfof para las isotermas de adsorción

Modelo Chung & Pfof	Temperatura		
	25°C	35°C	40°C
Parámetros			
A	3.09	2.9	2.55
B	0.23	0.25	0.26
R^2	0.99	0.99	0.99
Varianza	0.16	0.15	0.17
% Error	6.24	8.44	11.4

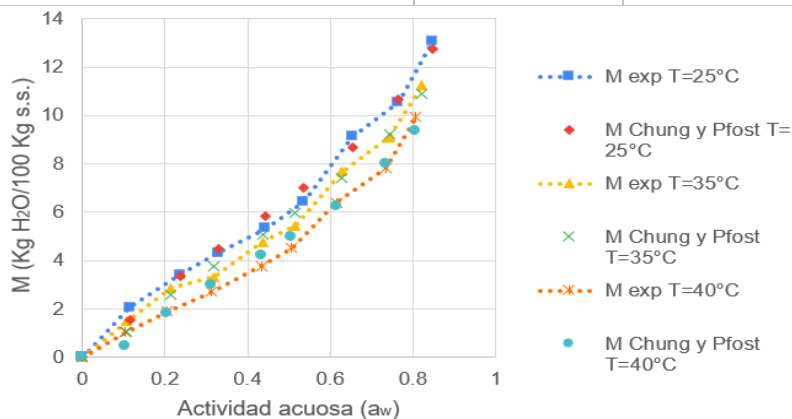


Figura 11: Isoterma de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche. Modelo de Chung & Pfof

6.2 Interpretación de los modelos de adsorción: modelo teórico de G.A.B.

Las isothermas de adsorción a 25°C, 35°C y 45°C obtenidas a partir del modelo teórico G.A.B (figura 9) se pueden dividir en 3 regiones principales con la finalidad de representar gráficamente las zonas de estabilidad del aceite de chía. Las figuras 14,15 y 16 muestran lo descrito anteriormente.

Isoterma de adsorción a 25°C:

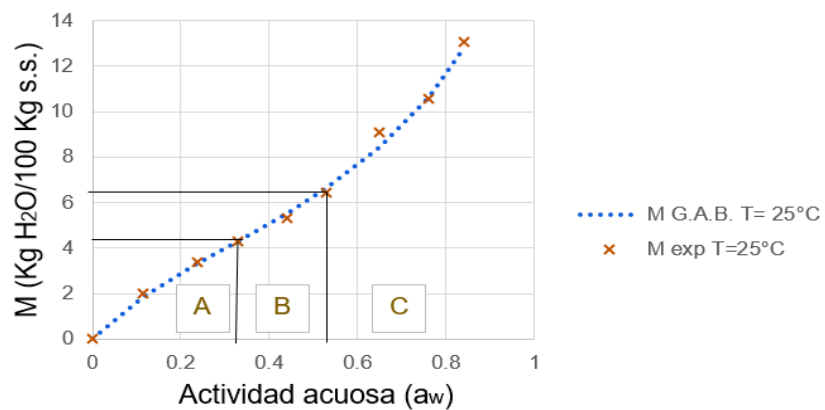


Figura 12: Regiones de la isoterma de adsorción a 25°C: modelo de G.A.B.

Isoterma de adsorción a 35°C:

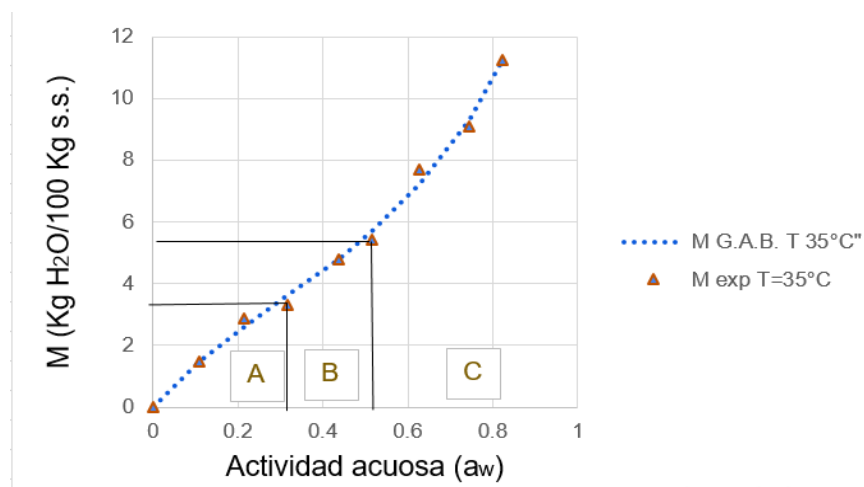


Figura 13: Regiones de la isoterma de adsorción a 35°C: modelo de G.A.B.

Isoterma de adsorción a 40°C:

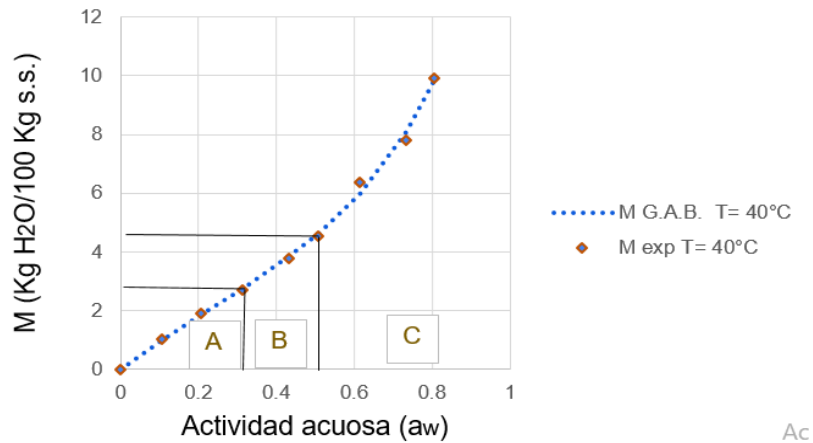


Figura 14: Regiones de la isoterma de adsorción a 40°C: modelo de G.A.B.

6.3 Área específica de adsorción

La estabilidad de los alimentos depende de la cantidad de agua absorbida en la superficie que interactúa con sus sitios activos. Algunas de las propiedades de estudio son el área específica de adsorción (S_0) y radio del poro (r_p). El modelo teórico de G.A.B. representa el mejor ajuste sobre los datos experimentales obtenidos debido a que los valores del módulo de desviación relativa media fueron menores al 4.0% y los coeficientes de determinación fueron superiores a 0.995. A partir de ello, se tomaron los valores del contenido de humedad en la monocapa (M_0) y se calculó el área específica de adsorción con la ecuación 13. La tabla 14 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 13: Áreas específicas de adsorción a 25°C, 35°C y 40°C

Temperatura	$M_0 \left[\frac{Kg H_2O}{100 Kgs.s.} \right]$	$S_0 \left[\frac{m^2}{g} \right]$
25°C	4.99	176.7957

35°C	4.48	158.7264
40°C	3.93	139.2399

Los resultados anteriores indican que a medida que la temperatura aumenta, la disponibilidad de los sitios activos disminuye para la unión hidrofílica. Dichas tendencias decrecientes revelan que las energías de unión asociadas con la adsorción en la monocapa y multicapa en las muestras de las microcápsulas de aceite de chía disminuyeron al aumentar la temperatura. Esto puede atribuirse a una reducción en la capacidad de adsorción total del aceite de chía, que a su vez puede reflejar modificaciones físicas y químicas inducidas por la temperatura. Labuza (1968) afirma que los valores de S_0 para los productos alimenticios están dentro del intervalo de 100-250 m²/g. Dichos valores están presentes en muchos biopolímeros debido a la existencia de una estructura microporosa intrínseca. La cantidad y el tamaño de los poros en la matriz de los carbohidratos determinan el área y las propiedades de la superficie, así como la velocidad y el grado de hidratación.

6.3.1 Radio del poro.

El radio de poro (r_p) de las microcápsulas de aceite de chía se determinó con base al modelo teórico de G.A.B. (ecuación 6) y utilizando la herramienta Solver en la hoja de cálculo de Microsoft Excel (2013). Con ello, se obtuvo la actividad acuosa para diferentes valores específicos de contenido de humedad en el equilibrio (tabla 20).

Tabla 14: Actividad acuosa para diferentes valores específicos de contenido de humedad en el equilibrio a 25°C, 35°C y 40°C

$M\left[\frac{\text{Kg } H_2O}{100 \text{ Kgs.s.}}\right]$	Actividad acuosa (a_w)		
	25°C	35°C	40°C
1	0.055	0.07	0.105
2.5	0.165	0.207	0.286
5	0.39	0.46	0.54
7.5	0.59	0.649	0.71
10	0.73	0.78	0.819
12.5	0.83	0.867	0.888
15	0.9	0.93	0.939
17.5	0.952	0.974	0.978
20	0.993	1.01	1.008
22.5	1.024	1.039	1.031
25	1.05	1.062	1.05
27.5	1.072	1.0814	1.0666
30	1.09	1.097	1.08

Finalmente, con los datos de la tabla 49 y las ecuaciones 14, 15 y 16 se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 15: Radio del poro las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C, 35°C y 40°C.

$\left[\frac{Kg H_2O}{100 Kgs.s.} \right]$	Radio del poro (nm)		
	25°C	35°C	40°C
1	0.424	0.436	0.461
2.5	0.497	0.520	0.561
5	0.617	0.658	0.711
7.5	0.749	0.800	0.865
10	0.889	0.962	1.035
12.5	1.059	1.158	1.231
15	1.281	1.451	1.521

7. Conclusiones.

- ❖ Las isothermas de adsorción construidas a partir de los datos experimentales son cóncavas respecto al eje de la presión relativa ($\frac{P}{P_0}$), luego aumenta linealmente y finalmente se vuelve convexa, por lo que las isothermas obtenidas son del tipo II y presentan una forma sigmoideal en el intervalo de temperatura estudiado.
- ❖ El modelo teórico de G.A.B. resultó ser la aplicación más satisfactoria para el ajuste matemático por regresión no lineal en comparación del modelo de B.E.T..
- ❖ Los modelos G.A.B y Pleg demostraron ser los modelos con mayor coeficiente de correlación y menor módulo de desviación relativa, sin embargo, el modelo G.A.B. fue seleccionado, porque sus parámetros representan un significado físico.
- ❖ Los modelos Chung & Pfof, Smith, Oswin, Henderson, Halsey y B.E.T son adecuados para el ajuste experimental, mientras que los modelos Chen y Lewicki tienen menor coeficiente de correlación y un mayor módulo de desviación relativa.
- ❖ Las condiciones de estabilidad del aceite de chía microencapsulado se establecen con base al valor del contenido de humedad en la monocapa (M_0) y la actividad acuosa (a_w), dichos valores se encuentran en un intervalo de $[4.99-3.93] \left(\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s} \right)$ y $[0.39-0.44] \left(\frac{P}{P_0} \right)$ entre 25°C y 40°C, respectivamente.

8. Glosario

Búlgaros: Son una unión simbiótica de varios micro organismos y levadura.

Coloides: Sistema físico-químico que se encuentra formado por dos fases: las partículas dispersas (fase dispersa) y el medio dispersante (fase continua).

Hidrocoloide: Son biopolímeros de origen natural, obtenidos a partir de distintos procesos como biofermentación y extracción ácida o alcalina, que ofrecen mucho más que viscosidad y textura en gel.

Desnaturalizar: Alterar las propiedades o condiciones de algo, desvirtuarlo.

Glutaraldehido: Compuesto químico de la familia de los aldehídos que se usa principalmente como desinfectante de equipos médicos, odontológicos y de laboratorio.

Transglutaminasa: Son enzimas que, en la naturaleza, catalizan la formación de un enlace isopeptídico entre el grupo γ -carboxamida [-NH₂] de una molécula de glutamina y el grupo ϵ -amino de las moléculas de lisina, dando como resultado una liberación de amoníaco.

Morfología: Estudio de los aspectos físicos (apariciencia externa), así como aspectos de la estructura interna.

Proceso por lotes: Sistema de producción donde se elabora una cantidad acotada de productos que tienen características idénticas.

Fosfolípido: Son lípidos anfipáticos. Pertenecen al grupo de lípidos derivados del glicerol, presentando una estructura similar a la de los triglicéridos (TGs).

Enzima: Proteínas complejas que producen un cambio químico específico en todas las partes del cuerpo.

Polisacárido: Carbohidratos complejos formados por un gran número de azúcares simples, los cuales se unen entre sí mediante los enlaces glucosídicos.

Aglomeración: Reunión o amontonamiento grande y desordenado de algo, especialmente de partículas reunidas en un lugar.

Polifenoles: Grupo de sustancias químicas encontradas en plantas caracterizadas por la presencia de más de un grupo fenol por molécula.

Antioxidantes: Compuestos químicos que interactúan con los radicales libres y los neutralizan, lo que les impide causar daño.

Hidrofóbico: Propiedad física de una molécula que es aparentemente repelida de una masa de agua.

Soluto: Sustancia que es disuelta en otra.

Solución: Mezcla homogénea a nivel molecular o iónico de dos o más sustancias puras que no reaccionan entre sí, cuyos componentes se encuentran en proporciones variables.

Adsorbente: Es un sólido que tiene la capacidad de retener sobre su superficie un componente presente en corrientes líquidas o gaseosas.

Adsorbato: Medio sólido sobre el que se realiza la adsorción.

Teórico: Que es verdadero por lógica matemática, pero no es real.

Empírico: Que está basado en la experiencia y en la observación de los hechos.

Semi-empírico: Método que contiene una parte basada en teoría y una parte basada en datos obtenidos experimentalmente.

Hito: Acontecimiento puntual y significativo que marca un momento importante en el desarrollo de un proceso o en la vida de una persona.

Cristalización: Es la técnica más simple y eficaz para purificar compuestos sólidos, en la cual se genera una disolución saturada que al enfriar se sobresatura y se produce la cristalización.

Maltodextrina: Es una mezcla de polímeros de glucosa que aparecen como resultado de la hidrólisis del almidón.

Almidón: Es una macromolécula que está compuesta por dos polímeros distintos de glucosa, la amilosa y la amilopectina

Goma arábiga: Es un polisacárido de origen natural. Se extrae de la resina de ciertas variedades de la Acacia.

Glucosa: Es un monosacárido con fórmula molecular $C_6H_{12}O_6$. Es una hexosa, es decir, contiene 6 átomos de carbono

Metilcelulosa: Es un compuesto químico derivado de la celulosa. $C_6H_7O_2(OH)_x(OCH_3)$

Gelación: Es la formación de un gel a partir de un sistema con polímeros.

Solventes orgánicos: Compuestos orgánicos volátiles que se utilizan solos o en combinación con otros agentes, para disolver materias primas, productos o materiales residuales.

Ácidos grasos poliinsaturados: Son ácidos grasos que poseen más de un doble enlace entre sus carbonos.

Ácidos grasos insaturados: Son ácidos carboxílicos de cadena larga con uno o varios dobles enlaces entre sus átomos de carbono.

Metabolitos: Sustancia que el cuerpo elabora o usa cuando descompone los alimentos.

Hidroperóxidos: Son compuestos que contienen el grupo funcional hidroperóxido (ROOH).

Temperatura: En física, se define como una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico,

Presión: La presión es una magnitud física que mide la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie.

PH: Medida de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa.

Humedad: La humedad es la cantidad de vapor de agua que hay en el aire. Se denomina "humedad o vapor de agua" al agua que impregna un cuerpo o al vapor presente en la atmósfera.

Partícula: Pequeño objeto localizado al que se le pueden atribuir varias propiedades físicas o químicas, como volumen, densidad o masa.

Biopolímeros: Macromoléculas de diferentes orígenes, derivados del petróleo, de origen vegetal y muchos son de origen sintético. En este último caso, la mayoría son derivados de la silicona, pudiendo incluir otros materiales como metacrilato o colágeno entre otros.

Polímero: Sustancia compuesta por grandes moléculas, o macromoléculas formadas por la unión mediante enlaces covalentes de una o más unidades simples llamadas monómeros.

Proteína: Moléculas grandes y complejas que desempeñan muchas funciones críticas en el cuerpo.

Carbohidrato: Moléculas de azúcar. Junto con las proteínas y las grasas, los carbohidratos son uno de los tres nutrientes principales que se encuentran en alimentos y bebidas.

Lípido: Biomoléculas orgánicas formadas básicamente por carbono e hidrógeno y generalmente también oxígeno; pero en porcentajes mucho más bajos.

Polvo: Partículas sólidas con un diámetro menor a los 500 micrómetros

Liofilización: Es la deshidrocongelación o criodesecación, es un proceso de deshidratación usado generalmente para conservar un alimento perecedero o hacer el material más conveniente para el transporte.

Sublimación: Es la transición de una sustancia directamente del estado sólido al estado gaseoso

Probióticos: Son alimentos o suplementos que contienen microorganismos vivos destinados a mantener o mejorar las bacterias "buenas" (microbiota normal)

Patente: Es un conjunto de derechos exclusivos concedidos por un Estado al inventor de un nuevo producto o tecnología

9. Referencias.

[1] Ayers R.(1995), "Oil content and fatty acid composition of chía (Salvia hispanica L) from five north western locations in Argentina, JAOCS vol.72 no.9, Argentina, 1079-1081.

[2] Brunauer, S., Deming, L., S., Deming, W., E., & Teller, E. (1940), "In a theory of the Van der Waals Adsorption of gases", Journal of the American Chemical Society, 62(7), 1723-1732.

[3] Brunauer, S., Emmett, P., H., & Teller, E. (1938), " Adsorption of gases in multimolecular layers", Journal of the American Chemical Society, 60, 309-319.

[4] Bruneel, C., Lemahieu, C., Fraeye, I., Ryckebosch, E., Muylaert, K., Buyse, J., & Foubert, I. (2013). "Impact of microalgal feed supplementation on omega-3 fatty acid enrichment of hen eggs". Journal of functional foods, 5, 897-904.

[5] Barrow, C.J., Nolan, C., & Jin, Y.L., (2007) "Stabilization of highly unsaturated fatty acids and delivery into foods", Lipid Technology, 19, 108-111.

[6] Carvalho C., Zapata C., (2015), "Thermodynamic analysis of sorption isotherms of dehydrated yacon (smallanthus sonchifolius) bagasse", Food Bioscience 12, Brazil, 26-33.

[7] Desai KGH., Jin Park H., (2005). "Recent developments in microencapsulation of food ingredients, Drying Technology, 23:13, 61-94.

[8] Drusch, S., & Schwarz, K. (2006) "Microencapsulation properties of two different types of n-octenylsuccinate-derivatised starch", European Food Research Technology, 222, 155-164.

[9] Fuchs M., Turchiu C., Bohin M., Cuvelier M. E., Ordonaud C., Peyrat-Maillard M. N., Dumoulin E. (2006), "Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidized bed agglomeration", Journal of Food Engineering, 75, 27-35.

- [10] Geranpour, M., Assadpour, E., Madhi, S. (2020), "Recent advances in the spray drying encapsulation of essential fatty acids and functional oils", *Trends in Food Science and Technology*, 102, 71-90.
- [11] Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., Saurel, R. (2007), "Applications of spray drying in microencapsulation of food ingredients: an overview", *Food Research International*, 40(9), 1107-1121.
- [12] Guindani C., Podestá R. (2016), "Valorization of chia (*Salvia hispanica*) seed cake by means of supercritical fluid extraction", *Journal of Supercritical Fluids*, 112, Brazil, 676-683.
- [13] Hildar N., Duhammou M., Idlimam A., (2018), Investigation of water adsorption and thermodynamic properties of stevia powder", *Journal of Food Measurement and Characterization*, 123, 2615-2625.
- [14] Hogan, S.A., O'Riordan, E.D., O'Sullivan, M. (2003) "Microencapsulation and oxidative stability of spray-dried fish oil emulsions", *Journal of Microencapsulation*, 20(5), 675-688.
- [15] Jiménez D., Liébanes M.D., Aragón J. M., Palancar M.C., Areválo G., (2006), "Equilibrium moisture isotherms of two-phase solid olive oil by-products: adsorption process thermodynamics", *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 282-283, 298-306.
- [16] Julio L.M., Ixtaina V.Y. (2015), Chía seed oil-in-water emulsions as potential delivery systems of w-3 fatty acids, *Journal of Food Engineering*, 162, 48-55.
- [17] Kaushik P., Dowling Key, Barrow C.J., Adhikari Benu, (2014). Microencapsulation of omega-3 fatty acids: a review of microencapsulation and characterization methods, *Journal of Functional Foods*, 19, 868-881.

- [18] Klaypradit, W., Huang, Y.-W. (2008), "Fish oil encapsulation with chitosan using ultrasonic atomizer", *LWT – Food Science Technology*, 41, 1133-1139.
- [19] Klikerson, U., Sophanodora, P., Chimacheti, Mclements, D.J., Decker, E.A., (2005) "Stability of spray-dried tuna emulsions encapsulated with two-layered interfacial membranes". *Journal Agricultural of Food Chemistry*, 53, 8365-8371.
- [20] Kolanowski, W., Swidrski, F., & Berger, S.,(1999)," Possibilities of fish oil application for food products enrichment with omega-3 PUFA, *International journal of food sciences and nutrition* 50(1), 39-49.
- [21] Labuschagne P.,(2018),"Impact of wall material physicochemical characteristics on the stability of encapsulated phytochemicals". *Food Research International*, 107, South Africa, 227-247.
- [22] Labuza, T.P., Kaanane, A. and Chen, J. Y., (1985) "Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods, *Journal of Food Science*, 50, 385-391
- [23] Lang, K.W., McCune, T.D., & Steinberg, M.P. (1981), "A proximity equilibration cell for determination of sorption isotherm", *Journal of Food Science*, 46, 670-672, 680.
- [24] Legako, J., & Dunford, N.T. (2010) "Effect of spray nozzle design on fish oil-whey protein microcapsule properties", *Journal of Food Science*, 75(6), E394-E400.
- [25] Lomauro, C. J., Bakshi, A.S. & Labuza, T.P. (1985), "Evaluation of food moisture sorption isotherm equations", Part I. fruit, vegetable and meat products, *Lebensm-Wiss-Technology*, 18, 111-117.
- [26] Martínez M.L., Bodoira R.M., (2014), "Oxidative stability of walnut (*Juglans Regia* L.) and chia (*Salvia hispanica* L.) oils microencapsulated with spray drying", *Powder Technology*, 270, 271-277.
- [27] McMinn W.A.M., Al- Muhtaseb A.H., (2002), "Moisture sorption isotherms characteristics of food products: a review", *Trans IChemE*, vol.8 Part C, Inglaterra, 118-128.

- [28] Morato P., Rodriguez J. (2015), "Omega-3 enriched chocolate milk: a functional drink to improve health during exhaustive exercise", *Journal of Functional Foods* 14, 676-683.
- [29] Mujumdar A. S., Shiv hare U. S., Basus L., (2007), "Moisture adsorption isotherms and glass transition temperature of Xantham gum", *Drying Technology*, 1581-1586.
- [30] Nourhéne B., Bahloul L., (2008), "sorptions isotherms and isosteric heat of sorption of olive lives (chemlali variety): experimental and mathematical investigation", *Food and Bioproducts Processing* 86, 167-175.
- [31] Oswin, C.R. (1946), "The kinetics of package life III isotherm", *Journal of Chemical Industry*, 65, 419- 421.
- [32] Pérez Alonso C., Cruz olivares J., Barrera Pichardo J.B., Rodriguez Hueso M.E., Baéz González J.G., Vernon-Carter E.J., (2008), "DSC thermo-oxidative stability of red chili oleoresin microencapsulated in blended biopolymers matrices", *Journal of Food Engineering*, 85, 613-624
- [33] Ponginebbi, L., Publisi, C., (2008), "Coating for oxygen sensitive materials, EP1920633 & US2008112987.
- [34] Ramírez, M., Cruz, M., Vizcarra, M., & Anaya, I. (2014), "Determinación de las isoterms de sorción y las propiedades termodinámicas de harina de maíz mixtamalizada", *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(1), 165-178.
- [35] Ré M.I., (1998), "Encapsulation by spray drying", *Drying Technology*, 6(16), 1195-1236.
- [36] Rodea D., Cruz J., (2012), "Spray-dried encapsulation of chia essential oil (*Salvia hispanica* L.) in whey protein concentrate - polysaccharide matrices", *Journal of Food Engineering*, 111, 102-109.
- [37] Rogé B., Mathlouthi M., (2003), "Water vapour sorption isotherms and the cacking of food powders", *Food Chemistry*, 82, 61-71.

[38] Saleeb, F.Z., & Arora, V.K., (1999), US5972395,1999, 10(26)

Schmid, G., Harrison, M., & Polchinski, P., (2001), "Process of stabilization of acylglycerols comprising high amounts of omega-3 polyunsaturated fatty acids by means of gamma cyclodextrin", EP1041136, US20030087879 & US6878696.

[39] Sergio, T.-G., Antonio, M.-A., Maria, J.O., & José, M.L. (2010), "Stabilization of a nutraceutical omega-3 fatty acid by encapsulation in ultrathin electrosprayed zein prolamine", Journal of Food Science, 75(6), 69-79.

[40] Skelbaek T., & Andersen, S. (1994), WO94/01001.1994.01.20. Soottiitawat, A., Yoshii, H., Furuta, T., Ohkawara, M., & Linko, P., (2003), "Microencapsulation by spray drying: influence of emulsion size on the retention of the volatile compounds, Journal of Food Science, 68(7), 2256-2262.

[41] Stanciu M. C., (2018), "Influence of dextran hydrogel characteristics on adsorption capacity for anionic dyes" Institute of molecular chemistry", Romania, 75-83.

[42] Velázquez-Gutiérrez, S., Figueira, A., Rodríguez-Huezo, M., Román-Guerrero, A., Carrillo-Navas, H. y Pérez-Alonso, C., (2015), "Sorption isotherms thermodynamic properties and glass transition temperature of mucilage extracted from chia seeds (*Salvia hispanica* L.)", Carbohydrate Polymers, 121, 411-419.

[43] Yé, Q., Georges, N., Selomulya, C. (2018), "Microencapsulation of active ingredients in functional foods: from research stage to commercial food products", Trends Food Science and Technology, 78, 167-179

[44] Zhang L., Qui J., Xoej C., (2009), "Drying methods, carrier materials and length of storage affect the quality of xylooligosaccharides", Food Hydrocolloids, 94, 439-450.

10 Anexos.

10.1. Anexo I: Datos experimentales de las isotermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C, 35°C y 40°C

Tabla 16: Datos experimentales de las isotermas de adsorción para para las microcápsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C

Temperatura: 25°C	
aw (experimental)	M (experimental)
0	0
0.115	2.005
0.237	3.41
0.329	4.31
0.44	5.3
0.53	6.45
0.65	9.11
0.76	10.55
0.84	13.05

Tabla 17: Datos experimentales de las isotermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C

Temperatura: 35°C	
aw (experimental)	M (experimental)
0	0

0.108	1.492
0.215	2.869
0.318	3.318
0.436	4.779
0.515	5.443
0.628	7.689
0.743	9.107
0.821	11.26

Tabla 18: Datos experimentales de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C

Temperatura: 40°C	
aw (experimental)	M (experimental)
0	0
0.105	1.049
0.206	1.902
0.313	2.721
0.433	3.776
0.506	4.523
0.614	6.387
0.734	7.811
0.806	9.934

10.2. Anexo II: datos ajustados de las isothermas de adsorción con los modelos matemáticos para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C, 35°C y 40°C

Modelo teórico de B.E.T.

Tabla 19: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de B.E.T.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.115	2.05574	2.21942	0.07962
0.237	3.41338	2.70985	0.20611
0.329	4.31416	3.12476	0.2757
0.443	5.33674	3.79976	0.288
0.536	6.45082	4.58296	0.28955
0.654	9.11841	6.17107	0.32323
0.765	10.5525	9.11046	0.13665
0.846	13.0563	13.9236	0.06642
			0.18503

Tabla 20: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de B.E.T.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0

0.108	1.4918	2.23773	0.5
0.215	2.8691	2.73262	0.04757
0.318	3.3179	3.22402	0.02831
0.436	4.7787	3.95445	0.17248
0.515	5.4426	4.626	0.15004
0.628	7.6885	6.06713	0.21088
0.743	9.1066	8.81906	0.03157
0.821	11.2587	12.6898	0.1271
			0.14088

Tabla 21: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de B.E.T.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.105	1.0492	1.50474	0.43421
0.206	1.9016	2.11533	0.11237
0.313	2.7213	2.68019	0.01511
0.433	3.7755	3.42329	0.09329
0.506	4.5229	4.0109	0.1132
0.614	6.3869	5.247	0.17847
0.734	7.8114	7.74569	0.00841
0.806	9.9344	10.705	0.07757
			0.11474

Modelo teórico de Chen.

Tabla 22: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Chen.

<i>a_w</i> (experimental)	<i>M</i> (experimental)	<i>M</i> (teórico)	%Error
0	0	0	0
0.115	2.0557	0	1
0.237	3.4134	2.01968	0.40831
0.329	4.3142	4.58183	0.06204
0.443	5.3367	6.57294	0.23164
0.536	6.4508	7.8219	0.21254
0.654	9.1184	9.21367	0.01045
0.765	10.5525	10.5005	0.00492
0.846	13.0563	11.55	0.11537
			0.22725

Tabla 23: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Chen.

<i>a_w</i> (experimental)	<i>M</i> (experimental)	<i>M</i> (teórico)	%Error
0	0	0	0
0.108	1.4918	0	1
0.215	2.8691	1.39743	0.51294
0.318	3.3179	4.01776	0.21092
0.436	4.7787	5.78465	0.21051

0.515	5.4426	6.69709	0.23049
0.628	7.6885	7.84378	0.02019
0.743	9.1066	8.96572	0.01546
0.821	11.2587	9.78954	0.13049
			0.259

Tabla 24: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Chen.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.105	1.0492	0	1
0.206	1.9016	0.62824	0.66963
0.313	2.7213	3.20033	0.17603
0.433	3.7755	4.85326	0.28546
0.506	4.5229	5.63001	0.24478
0.614	6.3869	6.642	0.03994
0.734	7.8114	7.71265	0.01264
0.806	9.9344	8.39743	0.15471
			0.28702

Modelo teórico de Chung & Pfof.

Tabla 25: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Chung & Pfof.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.115	2.0557	1.55849	0.24188
0.237	3.4134	3.3375	0.02223
0.329	4.3142	4.46765	0.03558
0.443	5.3367	5.82909	0.09226
0.536	6.4508	6.99466	0.08431
0.654	9.1184	8.67445	0.04869
0.765	10.5525	10.6884	0.01288
0.846	13.0563	12.7478	0.02363
			0.06238

Tabla 26: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Chung & Pfof.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.108	1.4918	1.07021	0.28262
0.215	2.8691	2.56916	0.10454

0.318	3.3179	3.75936	0.13304
0.436	4.7787	5.06426	0.05976
0.515	5.4426	5.97101	0.09708
0.628	7.6885	7.40936	0.03631
0.743	9.1066	9.22598	0.01311
0.821	11.2587	10.8846	0.03323
			0.08441

Tabla 27: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para las microcápsulas de aceite de chía encapsulados con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Chung & Pfof.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.105	1.0492	0.46332	0.5584
0.206	1.9016	1.81084	0.04775
0.313	2.7213	2.97752	0.09415
0.433	3.7755	4.22035	0.11783
0.506	4.5229	5.00156	0.10583
0.614	6.3869	6.26863	0.01852
0.734	7.8114	7.99703	0.02376
0.806	9.9344	9.36395	0.05742
			0.11374

Modelo teórico G.A.B

Tabla 28: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de G.A.B

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>% Error</i>
0	0	0	0
0.115	2.005	1.865	0.069
0.237	3.41	3.313	0.028
0.329	4.31	4.300	0.002
0.44	5.3	5.521	0.041
0.53	6.45	6.624	0.027
0.65	9.11	8.411	0.076
0.76	10.55	10.615	0.006
0.84	13.05	12.812	0.018
			Promedio 0.02

Tabla 29: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de G.A.B

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>% Error</i>
0	0	0	0
0.108	1.491	1.463	0.019
0.215	2.869	2.603	0.092
0.318	3.317	3.610	0.088
0.436	4.778	4.802	0.004
0.515	5.442	5.692	0.045
0.628	7.688	7.216	0.061
0.743	9.106	9.296	0.020
0.821	11.258	11.239	0.001
			Promedio 0.037

Tabla 30: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de G.A.B

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>% Error</i>
0	0	0	0
0.105	1.049	0.994	0.052
0.206	1.901	1.857	0.022
0.313	2.721	2.763	0.015
0.433	3.775	3.864	0.023
0.506	4.522	4.629	0.023
0.614	6.386	5.993	0.061
0.734	7.811	8.074	0.033
0.806	9.934	9.827	0.010
			Promedio 0.027

Modelo teórico Halsey

Tabla 31: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Halsey

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	#iNUM!	0
0.115	2.0557	2.99887	0.45878
0.237	3.4134	3.81641	0.11807
0.329	4.3142	4.44801	0.03103
0.443	5.3367	5.34919	0.00233

0.536	6.4508	6.26445	0.02889
0.654	9.1184	7.86575	0.13738
0.765	10.5525	10.3338	0.02072
0.846	13.0563	13.6603	0.04626
			0.09372

Tabla 32: Datos ajustados para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Halsey

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.108	1.4918	2.38475	0.59855
0.215	2.8691	3.04226	0.06035
0.318	3.3179	3.69119	0.1125
0.436	4.7787	4.56278	0.04518
0.515	5.4426	5.28691	0.02861
0.628	7.6885	6.6785	0.13137
0.743	9.1066	8.97107	0.01488
0.821	11.2587	11.7452	0.04321
			0.11496

Tabla 33: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Halsey

<i>a_w</i> (experimental)	<i>M</i> (experimental)	<i>M</i> (teórico)	%Error
0	0	0	0
0.105	1.0492	1.74448	0.66271
0.206	1.9016	2.28129	0.19964
0.313	2.7213	2.87779	0.0575
0.433	3.7755	3.68572	0.02378
0.506	4.5229	4.30596	0.04796
0.614	6.3869	5.54152	0.13236
0.734	7.8114	7.81767	0.0008
0.806	9.9344	10.2629	0.03307
			0.12865

Modelo teórico Henderson

Tabla 34: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Henderson

<i>a_w</i> (experimental)	<i>M</i> (experimental)	<i>M</i> (teórico)	%Error
0	0	0	0
0.115	2.0557	1.8299	0.10986
0.237	3.4134	3.236	0.05197
0.329	4.3142	4.27629	0.00878

0.443	5.3367	5.62815	0.0546
0.536	6.4508	6.83894	0.06017
0.654	9.1184	8.62573	0.05403
0.765	10.5525	10.7795	0.02152
0.846	13.0563	12.9526	0.00794
			0.04099

Tabla 35: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Henderson

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.108	1.4918	1.41469	0.0517
0.215	2.8691	2.50533	0.12679
0.318	3.3179	3.55109	0.07027
0.436	4.7787	4.82676	0.01006
0.515	5.4426	5.76774	0.05974
0.628	7.6885	7.31629	0.04841
0.743	9.1066	9.3189	0.02332
0.821	11.2587	11.1538	0.00932
			0.0444

Tabla 36: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Henderson

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.105	1.0492	0.94304	0.10117
0.206	1.9016	1.78035	0.06378
0.313	2.7213	2.71713	0.00154
0.433	3.7755	3.88869	0.02998
0.506	4.5229	4.69652	0.03839
0.614	6.3869	6.09336	0.04596
0.734	7.8114	8.11533	0.03891
0.806	9.9344	9.77002	0.01655
			0.03736

Modelo Lewicki

Tabla 37: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Lewicki.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.115	2.005	1.6538	0.1752
0.237	3.41	2.6926	0.2104
0.329	4.31	3.476	0.1935

0.443	5.3	4.5561	0.1404
0.536	6.45	5.6139	0.1296
0.654	9.11	7.3942	0.1883
0.765	10.55	10.022	0.05
0.846	13.05	13.43	0.0291
			0.1241

Tabla 38: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Lewicki.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.108	1.4918	1.2427	0.167
0.215	2.8691	2.0483	0.2861
0.318	3.3179	2.837	0.145
0.436	4.7787	3.8661	0.191
0.515	5.4426	4.6954	0.1373
0.628	7.6885	6.2364	0.1889
0.743	9.1066	8.669	0.0481
0.821	11.259	11.499	0.0214
			0.1316

Tabla 39: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Lewicki.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.105	1.0492	0.8288	0.2101
0.206	1.9016	1.4449	0.2402
0.313	2.7213	2.1434	0.2124
0.433	3.7755	3.0776	0.1849
0.506	4.5229	3.7802	0.1642
0.614	6.3869	5.1451	0.1944
0.734	7.8114	7.5673	0.0312
0.806	9.9344	10.079	0.0145
			0.1391

Modelo Oswin

Tabla 40: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Oswin.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.115	2.0557	2.38984	0.16252
0.237	3.4134	3.56957	0.04576
0.329	4.3142	4.40444	0.02093
0.443	5.3367	5.50312	0.03118

0.536	6.4508	6.5349	0.01303
0.654	9.1184	8.19781	0.10096
0.765	10.5525	10.5292	0.00221
0.846	13.0563	13.3975	0.02613
			0.04475

Tabla 41: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Oswin.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.108	1.4918	1.85928	0.24632
0.215	2.8691	2.79997	0.0241
0.318	3.3179	3.65637	0.102
0.436	4.7787	4.71167	0.01402
0.515	5.4426	5.52483	0.01511
0.628	7.6885	6.97122	0.09329
0.743	9.1066	9.13047	0.00263
0.821	11.2587	11.5086	0.02219
			0.05774

Tabla 42: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Oswin.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.105	1.0492	1.30056	0.2396
0.206	1.9016	2.04942	0.07771
0.313	2.7213	2.82979	0.03986
0.433	3.7755	3.80441	0.00766
0.506	4.5229	4.50148	0.00473
0.614	6.3869	5.79281	0.09302
0.734	7.8114	7.94273	0.01681
0.806	9.9344	10.0416	0.01079
			0.05446

Modelo Pleg

Tabla 43: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Pleg.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.115	2.0557	2.11085	0.02681
0.237	3.4134	3.3291	0.02469
0.329	4.3142	4.2238	0.02095

0.443	5.3367	5.47064	0.02509
0.536	6.4508	6.69111	0.03725
0.654	9.1184	8.61432	0.05528
0.765	10.5525	10.9124	0.03411
0.846	13.0563	12.9497	0.00816
			0.02582

Tabla 44: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Pleg.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.108	1.4918	1.59973	0.07233
0.215	2.8691	2.5941	0.09585
0.318	3.3179	3.52444	0.06224
0.436	4.7787	4.71849	0.0126
0.515	5.4426	5.66112	0.04015
0.628	7.6885	7.29658	0.05098
0.743	9.1066	9.40939	0.03326
0.821	11.2587	11.1575	0.009
			0.04182

Tabla 45: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Pleg.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0	0
0.105	1.0492	1.03363	0.01483
0.206	1.9016	1.87069	0.01628
0.313	2.7213	2.75076	0.01082
0.433	3.7755	3.84056	0.01723
0.506	4.5229	4.61803	0.02104
0.614	6.3869	6.03188	0.05558
0.734	7.8114	8.14961	0.0433
0.806	9.9344	9.80062	0.01347
			0.02139

Modelo Smith

Tabla 46: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 25°C. Modelo de Smith.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	1.23566	0
0.115	2.0557	2.04406	0.00568
0.237	3.4134	3.02558	0.11361

0.329	4.3142	3.87582	0.10161
0.443	5.3367	5.10796	0.04287
0.536	6.4508	6.31679	0.02078
0.654	9.1184	8.25857	0.0943
0.765	10.5525	10.8185	0.02521
0.846	13.0563	13.6151	0.0428
			0.04965

Tabla 47: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 35°C. Modelo de Smith.

<i>aw (experimental)</i>	<i>M (experimental)</i>	<i>M (teórico)</i>	<i>%Error</i>
0	0	0.86087	0
0.108	1.4918	1.57631	0.05663
0.215	2.8691	2.37621	0.17179
0.318	3.3179	3.25669	0.01846
0.436	4.7787	4.44592	0.06963
0.515	5.4426	5.39057	0.00956
0.628	7.6885	7.05104	0.08291
0.743	9.1066	9.36606	0.0285
0.821	11.2587	11.6302	0.03299
			0.05228

Tabla 48: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para las microcapsulas de aceite de chía encapsulado con goma de mezquite y proteína de suero de leche a 40°C. Modelo de Smith.

a_w (experimental)	M (experimental)	M (teórico)	%Error
0	0	0.39528	0
0.105	1.0492	1.04418	0.00477
0.206	1.9016	1.7446	0.08258
0.313	2.7213	2.59131	0.04777
0.433	3.7755	3.71427	0.01622
0.506	4.5229	4.52048	0.00053
0.614	6.3869	5.96354	0.06628
0.734	7.8114	8.14155	0.04227
0.806	9.9344	9.98788	0.00538
			0.02953

10.3. Anexo III: densidad, tensión superficial y volumen molar del agua a 25°C, 35°C y 40°C

Tabla 49: Densidad, tensión superficial y volumen molar del agua a 25°C, 35°C y 40°C

Temperatura (°C)	Densidad ($\frac{g}{cm^3}$)	Tensión superficial($\frac{N}{m}$)	Volumen molar($\frac{m^3}{mol}$)
25	0.997	0.0717	1.8054×10^{-5}
35	0.994	0.0697	1.8108×10^{-5}

40	0.992	0.0686	1.8145×10^{-5}
----	-------	--------	-------------------------

10.4 Anexo IV: Clasificación de los poros de acuerdo a su dimensión transversal (w)

Tabla 50: Clasificación de los poros de acuerdo a su dimensión transversal (w)

Clasificación	Dimensión transversal (w)
Microporo	Menor a 0.20 nm
Mesoporo	Entre 0.20 nm y 0.50 nm
Macroporo	Mayor a 0.50 nm