



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA

**ANÁLISIS DE DIFERENTES MODELOS DE PARÁMETROS AJUSTABLES  
PARA ENTENDER EL PROCESO DE ADSORCIÓN DE HUMEDAD EN  
MICROCAPSULAS DE SABORIZANTE DE NUEZ**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:

LILIAN ALEJANDRA JIMÉNEZ MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. CÉSAR PÉREZ ALONSO**

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, MARZO 2022



# Índice

1.	Resumen .....	9
2.	Introducción.....	10
3.	Antecedentes.....	11
3.1	Nuez .....	11
3.2	Saborizantes .....	12
3.3	Microencapsulación .....	14
3.4	Métodos de microencapsulación.....	16
3.4.1	Coacervación .....	17
3.4.2	Extrusión.....	18
3.4.3	Secado por aspersion .....	18
3.5	Agentes encapsulantes .....	20
3.6	Estabilidad de los agentes encapsulantes.....	23
3.7	Isotermas de adsorción.....	25
3.7.1	Modelos teóricos .....	26
3.7.2	Semiempíricos .....	28
3.7.3	Modelos Empíricos.....	30
4.	Justificación, pregunta de investigación y objetivos .....	34
4.1	Justificación .....	34
4.2	Pregunta de investigación .....	35
4.3	Objetivo general.....	35

4.4	Objetivos específicos .....	35
5.	Metodología.....	36
5.1	Materiales.....	36
5.2	Formulación de emulsiones .....	36
5.3	Formación de microcápsulas.....	37
5.4	Isotermas de adsorción.....	37
6.	Resultados y discusión .....	40
6.1	Modelos teóricos.....	40
6.2	Modelos semi empíricos .....	47
6.3	Modelos empíricos.....	52
7.	Conclusiones.....	57
8.	Referencias .....	58
9.	Anexos.....	67
9.1	Anexo I: datos experimentales ajustados con los modelos matemáticos para microcápsulas de saborizante de nuez con los tres materiales de pared a tres temperaturas 25°C, 35°C y 40°C. ....	67
9.2	Anexo II: gráficas de residuales de los datos experimentales ajustados con los modelos matemáticos para microcápsulas de saborizante de nuez con los tres materiales de pared a tres temperaturas 25°C, 35°C y 40°C. ....	80

## Índice de Figuras

Figura 1. Morfología de diferentes tipos de microcápsulas .....	15
Figura 2. Configuración común del secado por aspersión.....	20
Figura 3. Fenómeno de adsorción .....	25
Figura 4. Fenómenos de superficie.....	25
Figura 5. Diferentes tipos de isoterma de adsorción en sistemas gas/sólido, de acuerdo con la clasificación de Brunauer .....	32
Figura 6. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de BET para microcápsulas de saborizante nuez.....	44
Figura 7. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de GAB para microcápsulas de saborizante de nuez.....	44
Figura 8. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Caurie para microcápsulas de saborizante de nuez.....	46
Figura 9. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Lewicki (dos parámetros) para microcápsulas de saborizante de nuez.....	50
Figura 10. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Peleg para microcápsulas de saborizante de nuez.....	50
Figura 11. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Halsey para microcápsulas de saborizante de nuez.....	51
Figura 12. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Henderson para microcápsulas de saborizante de nuez.....	55
Figura 13. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Smith para microcápsulas de saborizante nuez.....	55
Figura 14. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Oswin para microcápsulas de saborizante de nuez.....	56
Figura 15. Residuales de ajuste al modelo de BET.....	81

Figura 16. Residuales de ajuste al modelo de GAB .....	81
Figura 17. Residuales de ajuste al modelo de Caurie .....	81
Figura 18. Residuales de ajuste al modelo de Lewicki.....	81
Figura 19. Residuales de ajuste al modelo de Peleg.....	81
Figura 20. Residuales de ajuste al modelo de Halsey .....	81
Figura 21. Residuales de ajuste al modelo de Henderson .....	81
Figura 22. Residuales de ajuste al modelo de Smith .....	81
Figura 23. Residuales de ajuste al modelo de Oswin .....	81

## Índice de tablas

Tabla 1. Distribución de la nuez a diferentes áreas de aprovechamiento (Núñez,2011).....	12
Tabla 2. Formulación de emulsiones .....	36
Tabla 3. Actividad de agua de las soluciones saturadas de las sales a diferentes temperaturas .....	38
Tabla 4. Parámetros del modelo de BET para las isothermas de adsorción de las microcápsulas de nuez .....	41
Tabla 5. Parámetros de modelos semi empíricos para las isothermas de adsorción de las microcápsulas de nuez .....	48
Tabla 6. Parámetros de modelos empíricos para las isothermas de adsorción de las microcápsulas de nuez .....	54
Tabla 7. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 25°C.....	67
Tabla 8. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 35° .....	67
Tabla 9. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 40°C.....	68
Tabla 10. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 25°C .....	68
Tabla 11. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 35°C .....	69
Tabla 12. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared como material de pared a 40°C.....	69
Tabla 13. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con proteína de suero de leche como material de pared a 25°C .....	70

Tabla 14. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con proteína de suero de leche como material de pared a 35°C .....	70
Tabla 15. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con proteína de suero de leche como material de pared a 40°C .....	71
Tabla 16. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 25°C .....	71
Tabla 17. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 35°C .....	72
Tabla 18. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 40°C .....	72
Tabla 19. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 25°C .....	73
Tabla 20. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 35°C .....	73
Tabla 21. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 40°C .....	74
Tabla 22. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con proteína de suero de leche como material de pared a 25°C.....	74
Tabla 23. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con proteína de suero de leche como material de pared a 35° .....	75
Tabla 24. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con proteína de suero de leche como material de pared a 40°C.....	75
Tabla 25. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 25°C.....	76
Tabla 26. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 35°C.....	76

Tabla 27. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma mezquite como material de pared a 40°C.....	77
Tabla 28. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 25°C .....	77
Tabla 29. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 35°C .....	78
Tabla 30. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 40°C .....	78
Tabla 31. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 25°C.....	79
Tabla 32. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 25°C.....	79
Tabla 33. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 25°C.....	80



## 1. Resumen

El objetivo de este trabajo fue analizar el proceso de adsorción de vapor de agua en microcápsulas de saborizante de nuez obtenidas mediante secado por aspersión y, establecer condiciones de estabilidad de almacenamiento de estos productos en polvo. Para ello se produjeron tres tipos de microcápsulas empleando goma de mezquite, suero de leche y una mezcla de ambos biomateriales como agentes encapsulantes. El proceso de adsorción se analizó a partir de la generación de isothermas experimentales a tres temperaturas 25°C, 35°C y 40°C para cada tipo de microcápsula. Se emplearon nueve modelos matemáticos para describir el fenómeno de adsorción: tres modelos teóricos (B.E.T, G.A.B. y Caurie), tres modelos semi empíricos (Lewicki dos parámetros, Peleg y Halsey) y tres modelos empíricos (Henderson, Smith y Oswin).

Inicialmente se formularon tres emulsiones del tipo aceite en agua para incorporar el saborizante en las matrices biopoliméricas, y posteriormente estas fueron alimentadas a un secador por aspersión para ser deshidratadas a  $150 \pm 5$  °C. A partir de los microencapsulados producidos se obtuvieron las isothermas de adsorción empleando el método gravimétrico de celdas en equilibrio. Después, las isothermas se ajustaron a los diferentes modelos matemáticos descritos anteriormente. Los resultados mostraron que todas las isothermas experimentales tienen un comportamiento sigmoideal en todo el intervalo de actividad de agua y sin importar la temperatura de almacenamiento. El modelo propuesto por Peleg correlaciona los datos experimentales apropiadamente, así como el modelo de G.A.B, este modelo tiene relevancia por el significado físico que posee su parámetro  $M_0$  (contenido de humedad en la monocapa), el cual indica la cantidad de agua que se adsorbe y satura sitios específicos de las cápsulas y es considerado como el valor óptimo en el que un alimento es más estable.

Para este trabajo los valores óptimos de humedad para almacenar microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material en el intervalo de temperatura estudiado están entre 4.687 y 5.520 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s., asimismo los valores para la mezcla de goma de mezquite con proteína de suero de leche como material de pared se encontraron entre 4.148 y 4.846 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s., y por último, los valores para la proteína de suero de leche como material de pared se tuvieron entre 4.156 y 5.068 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.

## 2. Introducción

El sabor a nuez da una sensación de ser un buen alimento a muchos de los productos que existen en el mercado, pues los beneficios que la nuez brinda ubican en la mente del consumidor como productos saludables. México es el segundo productor de nuez más importante del mundo, el 62.5% de la producción se exporta en forma de granel sin procesar a Estado Unidos de Norteamérica con eso alcanza un 98.2% de la producción total mundial lista para ser exportada (Núñez, 2011), por lo que puede existir una posibilidad de explorar nuevos productos que le puedan dar valor al sabor de la nuez.

El sabor de los alimentos es una de las variables más importantes que influye fuertemente en la decisión de compra del consumidor, y éste define en gran medida el ciclo de vida de un producto alimenticio.

Dado que los saborizantes son sensibles a factores ambientales como luz, oxígeno, temperatura y humedad es importante prestar atención al manejo y a las condiciones de almacenamiento de los saborizantes para retardar procesos deteriorativos y alargar su vida de anaquel. Por lo que es necesario brindarles una protección funcional, es decir que sea estable durante su procesamiento y su uso, que sea insípida y no interfiera en la percepción del consumidor respecto al sabor del saborizante, que sea de grado alimenticio y claro a un costo bajo.

Una manera de proteger a los saborizantes es mediante alguna tecnología de encapsulación, entre las que destaca el secado por aspersion, cuya técnica se basa en brindarle una membrana interfacial al saborizante empleando algún tipo de biopolímero que retrase efectos deteriorativos al producto como son las reacciones químicas, enzimáticas y microbiológicas, así como cambios físicos. Adicionalmente, poder establecer condiciones de almacenamiento adecuados son un factor clave para determinar la calidad de las microcápsulas.

Por lo anterior, en este proyecto se trabajó con dos biopolímeros, la goma de mezquite y la proteína de suero de leche, así como una mezcla entre ellos como agentes encapsulantes de saborizante de nuez y analizando el proceso de adsorción de humedad en las microcápsulas empleando diferentes modelos matemáticos de isothermas de adsorción se establecieron condiciones de almacenamiento de estos productos en polvo.

### **3. Antecedentes**

#### **3.1 Nuez**

El nogal es uno de los árboles de frutas comestibles más antiguo del mundo. La nuez tiene sus orígenes en la prehistoria, ya que se han encontrado rastros fósiles en el norte de México y en Texas, indicando su existencia desde antes que los americanos nativos habitaran ahí (Ojeda-Barrios *et al.*, 2009).

Se han demostrado múltiples beneficios para la salud, como las propiedades antioxidantes que poseen, por su alto contenido en taninos, muchos estudios han apoyado un vínculo entre el consumo de taninos y las bajas tasas de cáncer, así como una reducción de la presión arterial, una disminución de los niveles de lípidos séricos y una respuesta inmunitaria mejorada (Brendan, 2016).

En este sentido a nivel mundial las nueces de nogal son muy apreciadas, sus beneficios las ubican en la mente del consumidor como productos saludables. En vista de aprovechar las oportunidades de mercado, los principales países productores difunden la composición química y los beneficios para la salud que acarrea su ingesta (Errecart, 2015).

Como señala Núñez (2011), México y Estados Unidos son los dos principales productores de nuez en el mundo los cuales alcanzan un 98.2% de la producción total. En México se exporta el 62.5% de la producción de nuez principalmente a los Estados Unidos, el resto 37.5% se utiliza en el mercado nacional donde aún muchos productores venden principalmente a granel y alguien más la procesa hasta llegar a un consumidor final para que sea aprovechada en diferentes áreas (Tabla 1).

*Tabla 1. Distribución de la nuez a diferentes áreas de aprovechamiento (Núñez, 2011)*

<b>Destino</b>	<b>Porcentaje</b>
Industria del pan	20.3%
Menudeo	17.9%
Mayoreo	11.4%
Exportación	10.2%
Confituras y dulces	9.7%
Con cáscara	8.6%
Empacados regalos	8.1%
Helados	5.7%
Servicios de alimento	3.2%
Otros	4.9%

### **3.2 Saborizantes**

La Organización Internacional de la Industria de los Sabores (2020) define a los saborizantes como productos que se añaden a los alimentos para impartirles, modificar o acentuar el sabor de los alimentos. Los saborizantes no incluyen las sustancias que tienen un sabor exclusivamente dulce, amargo o salado (por ejemplo, el azúcar, el vinagre y la sal de mesa).

Si bien, la investigación sobre el sabor existe desde hace más de 100 años, la gran mayoría de las primeras investigaciones sobre el sabor se mantuvieron en secreto principalmente dentro de empresas farmacéuticas (Gutiérrez-Rosales, 2010). Para el saborista de aquellos tiempos, la tarea de hacer saborizantes era puramente creativa, se sabía muy poco de su naturaleza y solo se conocían los componentes principales de los aceites esenciales y un número limitado de productos químicos que habían aislado e identificado con éxito. Muchas de las sustancias químicas nuevas que se sintetizaron fueron el punto de partida para la creación de nuevos sabores, y estos con el tiempo se convirtieron en sabores estándares (Wright, 2010).

Hoy en día la demanda por alimentos y bebidas con menos contenido de azúcar, grasa o sal se ha incrementado. Sin embargo, a menudo los desafíos de sabor vienen acompañados de mejores productos. Hay ingredientes saborizantes con características que pueden ayudar a mejorar la experiencia del consumidor de estos productos "light", por ejemplo, al disminuir el amargor, enmascarar las notas extrañas y restaurar la sensación en la boca (IOFI, 2020).

Las percepciones de los consumidores sobre los alimentos son de gran interés para las organizaciones comerciales en la medida en que afectan a la compra y al consumo de alimentos. También son de preocupación desde el punto de vista del bienestar y la regulación: si difieren significativamente a partir de la verdad científica, podrían alterar el consumo de alimentos en una forma que comprometa la seguridad o el estado nutricional de los consumidores o podrían invitar al fraude (Drew, 1994).

Por lo tanto, la Organización Internacional de la Industria de los Sabores (2020) considera que los saborizantes son críticos en los alimentos porque:

- Las preferencias de los consumidores por los alimentos, y su reconocimiento como los alimentos que esperan, se basan en gran medida en la percepción del sabor.
- La adición de saborizantes puede ser necesaria para compensar la pérdida del sabor durante el procesamiento y almacenamiento de alimentos tal es el caso de los alimentos pasteurizados.
- Los saborizantes pueden ayudar a equilibrar los perfiles de sabor de los alimentos procesados. Esto es cada vez más importante a medida que aumenta la demanda de alimentos con menos azúcar, sal y grasa.
- Los saborizantes ayudan a mantener los perfiles de sabor deseados y equilibrar las variaciones naturales estacionales o geográficas en los cultivos. El uso de saborizantes puede compensar las limitaciones de suministro al ayudar a obtener el perfil de sabor deseado que los consumidores reconocerán.

En la literatura podemos encontrar que los saborizantes se pueden clasificar según las características de sus componentes como (Bringas-Lantigua & Pino, 2012):

- ***Saborizantes naturales:*** Pueden aislarse de las frutas y plantas mediante procesos de destilación, maceración, concentración y extracciones con disolventes, que sean capaces de recuperar todos los componentes volátiles que definen el olor y sabor de material del que proceden. Un ejemplo concreto lo constituyen los aceites esenciales.
- ***Saborizantes similares a los naturales:*** Son los que se obtienen de mezclas de compuestos sintéticos, en la proporción en que se encuentran en la fruta, especia, hierba o planta natural de la cual se quiere imitar su sabor.
- ***Saborizantes artificiales:*** Son creados por la imaginación del saborista, su olor y sabor completos no existen en ningún elemento de la naturaleza.

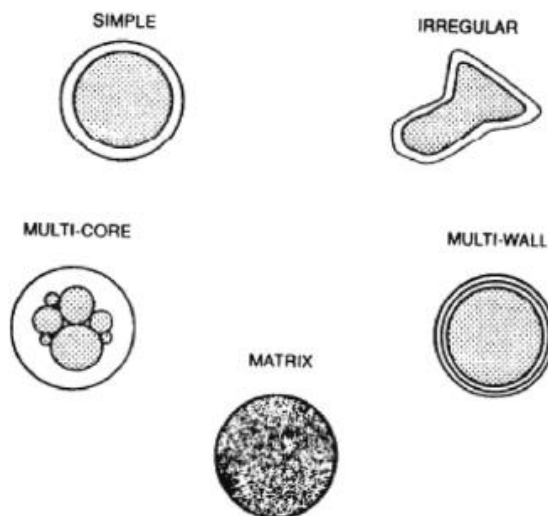
También se pueden clasificar según su presentación comercial (Wright, 2010):

- ***Saborizantes líquidos solubles en agua:*** Estos son, los tipos de sabores más comunes, los saborizantes químicos y naturales. Los componentes se disuelven en un solvente simple, comúnmente propilenglicol, triacetina o etanol, con la posible adición de agua
- ***Saborizantes líquidos solubles en aceite:*** Se necesitan sabores solubles en aceite cuando el producto final es un aceite o una grasa. También se utilizan donde el producto final no puede tolerar el agua, como el chocolate.
- ***Saborizantes a base de emulsión:*** Las emulsiones, basadas por ejemplo en aceite de naranja, se utilizan a menudo para dar turbidez a una bebida, pero también pueden ser una forma económica y eficaz de ofrecer un sabor.
- ***Saborizantes secados por aspersión:*** El secado por aspersión es el método de elección para los saborizantes en polvo. El saborizante se emulsiona típicamente en una solución de goma acuosa, y luego se seca por aspersión en una cámara caliente.

### 3.3 Microencapsulación

En la actualidad existe una mayor necesidad de alargar la vida útil de la mayoría de los alimentos en sistemas de distribución más amigables con el medio ambiente; para la mayoría de los alimentos tradicionales y manufacturados existe tecnología disponible para que estos procesos de deterioro, si no se detienen por completo, pueden al menos controlarse en un grado suficiente (Jansen, 2015).

La microencapsulación se define como una tecnología para empacar sólidos, líquidos, gases o materiales en miniatura, cápsulas selladas que pueden liberar su contenido en tasas controladas bajo condiciones específicas. Los paquetes en miniatura, llamados microcápsulas, pueden variar desde micras a varios milímetros de tamaño y tienen una amplia variedad de formas, dependiendo de los materiales y los métodos utilizados para prepararlos (Figura 1) (Shahidi & Han, 2009).



*Figura 1. Morfología de diferentes tipos de microcápsulas (Gibbs et al., 1999)*

En una microcápsula, la sustancia que es encapsulada puede llamarse material núcleo, agente activo, fase interna o fase de carga útil y puede ser un material sólido, líquido o gaseoso. La sustancia que encapsula puede ser llamada recubrimiento, membrana, concha, material portador, material pared, fase externa o matriz (Zuidam & Shimoni, 2010).

De esta manera la microencapsulación ofrece múltiples beneficios a los ingredientes microencapsulados en la industria alimentaria como (Desai & Park, 2005):

1. La encapsulación puede proteger el material del núcleo de la degradación al reducir su reactividad a su entorno exterior (por ejemplo, calor, humedad, aire y luz)
2. La tasa de evaporación o transferencia del material del núcleo al exterior el ambiente es retardado

3. Las características físicas del material original se pueden modificar y pueden ser más fáciles de manipular
4. El producto se puede adaptar para que se libere lentamente con el tiempo o en un momento determinado (es decir, para controlar la liberación del material del núcleo para lograr la propiedad retrasar hasta el estímulo correcto)

Dichos beneficios deberían superar los siguientes posibles aspectos negativos (Zuidam & Shimoni, 2010):

- Costos adicionales
- Mayor complejidad del proceso de producción y / o cadena de suministro
- Percepción indeseable al consumidor (visual o táctil) de los encapsulados en los productos alimenticios
- Problemas de estabilidad de los encapsulados durante el procesamiento y almacenamiento de los alimentos producto

### 3.4 Métodos de microencapsulación

Se han desarrollado numerosas técnicas para la fabricación de microcápsulas que se pueden utilizar para encapsular ingredientes alimentarios. La tecnología general para formar microcápsulas se divide en tres grupos, métodos físicos, métodos químicos, y métodos fisicoquímicos (Shahidi & Han, 2009):

- a. **Procesos físicos:** Secado por aspersión, enfriamiento por aspersión, recubrimiento de lecho fluidizado, extrusión, cocrystalización, secado en frío.
- b. **Procesos químicos:** Inclusión molecular, polimerización interfacial
- c. **Procesos fisicoquímicos:** Coacervación, separación de fases orgánicas, atrapamiento en liposomas

La selección de un método depende de los costos, la sensibilidad del núcleo, el tamaño de la microcápsula, propiedades físicas / químicas deseadas de ambos núcleos y recubrimiento, aplicaciones para el ingrediente alimentario, y mecanismos de liberación (Shahidi & Han, 2009).



Algunos métodos de encapsulación utilizados en la industria de alimentos son:

### **3.4.1 Coacervación**

La coacervación es la separación de un sistema coloidal en dos fases líquidas. El proceso de coacervación se puede clasificar en dos tipos: coacervación simple o compleja, dependiendo del número de polímeros involucrados. La coacervación compleja se produce principalmente a través de interacciones electrostáticas, entre dos o más soluciones poliméricas cargadas de manera opuesta. El método está controlado principalmente por la densidad de carga de los biopolímeros, que está influenciado principalmente por pH y fuerza iónica de la dispersión. La dilución promueve la coacervación compleja, que es una propiedad única que lo distingue de otros fenómenos de separación de fases de polímeros (Yan & Zhang, 2014).

El complejo proceso de coacervación consta principalmente de tres pasos básicos: emulsificación, coacervación y cáscara formación o endurecimiento (Zhan *et al.*, 2012). En la primera etapa, se forma un sistema de tres fases que consta de una fase de vehículo de fabricación líquida, una fase de material del núcleo y una fase de material de revestimiento mediante una técnica de adición directa. Después, la deposición del revestimiento de polímero líquido alrededor del material del núcleo se logra mediante la mezcla física controlada del material de revestimiento (mientras está líquido) y el material del núcleo en el vehículo de fabricación en la fase líquida. Finalmente, la solidificación del recubrimiento se logra mediante técnicas térmicas, de reticulación o desolventización y forma una microcápsula autosostenida (King, 1995).

La coacervación tiene una larga historia de uso en la industria del papel, y debido a la necesidad de controlar la liberación de componentes encapsulados los investigadores han hecho esfuerzos por desarrollar la técnica en la industria de los alimentos para encapsular aditivos o nutrientes reactivos, sensibles o volátiles, como los saborizantes (Reineccius, 2007). Esta tecnología ofrece ventajas sobre el método de secado por aspersión pues las condiciones de preparaciones son suaves (no se requieren solventes orgánicos ni temperaturas drásticas), alta eficiencia de encapsulación y excelentes características de liberación controlada (Yan & Zhang, 2014). Sin embargo, el proceso es muy caro, bastante

complejo y muy largo por lo que se eligen otras técnicas de microencapsulamiento (Desai & Park, 2005).

### **3.4.2 Extrusión**

La encapsulación a través de la extrusión se utiliza para sabores volátiles e inestables. La principal ventaja de este proceso es la vida útil larga dada a los compuestos de sabor normalmente propensos a la oxidación, como los aceites provenientes de cítricos (Madene *et al.*, 2006).

Se han reportado hasta 5 años de vida útil para aceites aromatizantes extruidos, en comparación con típicamente 1 año para sabores secados por pulverización y unos meses para los aceites cítricos no encapsulados (Poshadri & Aparna, 2010).

El proceso consiste en una masa fundida de hidratos de carbono en caliente a través de un sistema de tornillo simple o doble para extruir una especie de masa que se endurece en contacto con disolventes fríos. Previamente el material del núcleo se dispersa en la masa fundida antes de la extrusión para la encapsulación de la matriz, finalmente se seca y muele el material extruido (Oxley, 2014).

La tecnología de extrusión tiene un gran potencial para su uso en la industria de encapsulación de sabores y otros materiales sensibles debido a que es un proceso continuo y robusto, una planta puede producir productos las 24 horas del día, los 7 días de la semana, utilizando muy poca agua y secado mínimo. Varias empresas de saborizantes han desarrollado sus propios ingredientes activos o aceites aromatizantes volátiles y encapsulados utilizando tecnología de extrusión como: *FlavorCells* de McCormick, *Caplocks* de International Flavors & Fragrances, *Evoglasss* de Symrise, *Duraromes* de Firmenich, así como muchos otros productos comerciales (Harrington & Schaefer, 2014).

### **3.4.3 Secado por aspersion**

La encapsulación por secado por aspersion se ha utilizado en la industria alimentaria desde finales de la década de 1950 para proporcionar a los saborizantes cierta protección contra la degradación /oxidación y para convertir líquidos en polvos (Desai & Park, 2005). El secado

por atomización es la técnica de microencapsulación más común utilizada en la industria alimentaria. Esto se debe al bajo costo, la disponibilidad de equipo para el proceso, buena retención de volátiles y buena estabilidad del producto terminado (Madene *et al.*, 2006).

Una de las limitaciones de esta tecnología es el número limitado de materiales encapsulantes, puesto que casi todos los procesos de secado por aspersión en la industria alimentaria se llevan a cabo a partir de agua, por lo tanto, el material debe tener un nivel de solubilidad en agua aceptable (Desai & Park, 2005).

El secado por aspersión es un método mediante el cual un líquido o suspensión se convierte en un polvo seco mediante atomización en una corriente fluida de gas caliente. El aire es generalmente el gas caliente, aunque si el líquido contiene solventes inflamables como etanol o tóxicos solventes como el cloruro de metileno, se utiliza nitrógeno en lugar de aire como gas de secado (Jacobs, 2014).

El líquido se atomiza en gotas en la parte superior de la cámara, después las gotas viajan hacia el flujo turbulento de aire caliente en la parte superior de la cámara con el aire caliente y las gotas fluyendo en la misma dirección, lo que se conoce como flujo paralelo. La fase líquida se calienta rápidamente y las moléculas del líquido se mueven a la superficie de la gota y se transfieren a la fase gaseosa. A medida que las gotas se solidifican, son arrastradas por el flujo de gas calentado y se mueven a una cámara de flujo ciclónico donde los sólidos salen de la cámara y el gas se expulsa a la atmósfera (Figura 2) (Jacobs, 2014).

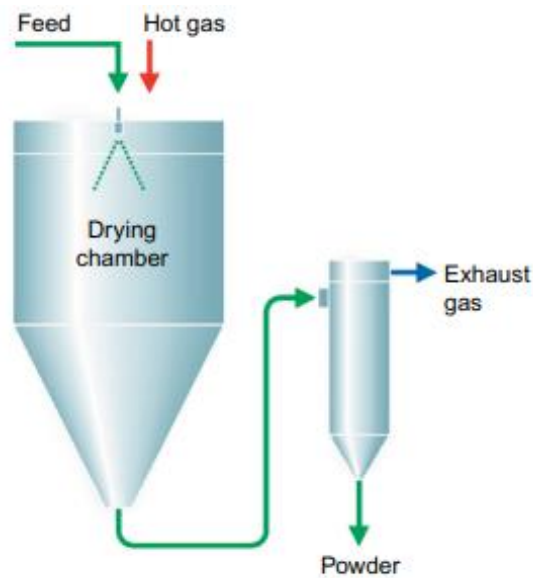


Figura 2. Configuración común del secado por aspersión (Jacobs, 2014)

### 3.5 Agentes encapsulantes

La selección de materiales de pared tradicionalmente involucra procedimientos de prueba y error en los que se forman las microcápsulas y luego se caracterizan (Pérez-Alonso *et al.*, 2003); dado que la composición del material pared es el principal determinante de las propiedades funcionales de la microcápsula y cómo se puede utilizar para mejorar el rendimiento de un determinado ingrediente un buen material de pared debe presentar las siguientes características (Desai & Park, 2005):

1. Buenas propiedades reológicas a alta concentración y fácil trabajabilidad durante el encapsulado.
2. La capacidad de dispersar o emulsionar el material activo y estabilizar la emulsión producida.
3. No reactividad con el material a encapsular durante el proceso y el almacenamiento.
4. La capacidad de sellar y mantener el material activo dentro de su estructura.
5. Solubilidad en solventes aceptables en la industria alimentaria (por ejemplo, agua, etanol).
6. Sabor insípido
7. Costo bajo y grado alimenticio.

Existe un número limitado de métodos de encapsulación, pero se puede utilizar una enorme variedad de diferentes agentes encapsulantes (Madene *et al.*, 2006), algunos de los materiales encapsulantes comúnmente utilizados son (Desai & Park, 2005):

- Carbohidratos: Almidón y derivados, maltodextrinas, jarabes de maíz, ciclodextrinas.
- Celulosas: Carboximetil celulosa, metilcelulosa, etilcelulosa.
- Gomas: Arábica, mezquite, agar, alginato de sodio.
- Lípidos: Ceras, parafinas, grasas, diglicéridos, aceites, cera de abejas
- Proteínas: Gelatina, caseína, suero de leche, gluten

**Carbohidratos:** Entre la clase de matrices hidrófilas utilizadas en el campo de la microencapsulación, los carbohidratos son los más comunes pues son económicos. Los carbohidratos presentan grandes propiedades únicas de solubilidad, reparto y barrera al ingrediente alimentario activo; específicamente los monosacáridos y disacáridos ofrecen baja viscosidad en solución y un medio eficaz de microencapsulación del sabor (Vasisht, 2014).

**Celulosas:** Los derivados de polímeros de celulosa se conocen y utilizan desde hace muchas décadas en formulaciones de aderezos para ensaladas, alimentos dietéticos, alimentos fritos, productos de panadería, alimentos precocidos, postres congelados, bebidas y productos de confitería. Estos polímeros proporcionan una variedad de atributos funcionales útiles y únicos en los productos alimenticios. Entre éstos, por ejemplo, la gelificación térmica de los éteres celulósicos, limita la penetración de aceite cuando se fríen alimentos como las papas. Esta propiedad también es útil para fortalecer la estructura de productos horneados preparados con harinas bajas en gluten (Wallick, 2014).

**Gomas:** La goma arábica, también conocida como goma de acacia, es un exudado vegetal que se origina en algunas plantas de la familia acacia. Es uno de los hidrocoloides más estudiados y populares como material de pared debido a sus propiedades emulsificantes, alta solubilidad en agua y una viscosidad baja por lo que es un material mucho muy fácil de trabajar (Burnside, 2014).

La goma arábica es una sustancia natural que implica variaciones debido a las edades de los árboles y la ubicación de los mismos; muchos productores venden una variedad de mezclas

de goma arábica por lo que la inconsistencia en el producto a menudo se menciona como un inconveniente. Además de la calidad variable del producto, los principales países de producción (Sudán, Nigeria y Chad) han tenido históricamente problemas con la estabilidad de precios debido a condiciones ambientales desfavorables o disturbios políticos (Burnside, 2014).

Según el Observatorio de la Complejidad Económica (2019), en el 2019 México importó \$7.37M en goma Arábica, convirtiéndose en el importador número 9 en el mundo. Por lo que los investigadores buscan alternativas como sustituto de la goma arábica, una alternativa es la goma de mezquite. Sin embargo, a la fecha es un recurso que no se aprovecha. Algunas de las barreras técnicas y económicas que deben vencerse antes de que la goma de mezquite sea aprovechada a nivel industrial incluyen la autorización para obtener el estatus GRAS (*Generally Regarded As Safe*) por parte del FDA (*Food and Drug Administration*) en EEUU para uso en alimentos, el aseguramiento de la producción y la instrumentación de criterios de calidad y de clasificación que permitan elaborar un sistema de precios (López-Franco *et al.*, 2006).

**Lípidos:** Se eligen a menudo por sus propiedades de fusión y sus propiedades de barrera contra la humedad. Por ejemplo, los acidulantes son aditivos alimentarios que se utilizan para proporcionar modificar el sabor prevenir el crecimiento microbiano y la textura en el procesamiento de masa para hornear; si el acidulante no está protegido, puede reducir prematuramente el pH de la formulación, provocando que el gluten pierda su extensibilidad y se necesite mayor energía para trabajar la masa. También, se ha demostrado que el ácido fumárico recubierto de lípidos se puede usar para extender la vida útil de las tortillas sin afectar la extensibilidad de la masa y la textura o apariencia de la tortilla terminada (Toublan, 2014).

**Proteínas:** La propiedad emulsionante es importante para los materiales de pared, especialmente para la microencapsulación de ingredientes solubles en aceite, como aceite aromatizante, vitaminas solubles en aceite y aceite de pescado, etc. Debido a su naturaleza anfifílica, la proteína se puede orientar en la interfase aceite-agua con los grupos hidrófilos orientados hacia la fase acuosa y los grupos hidrófobos orientados hacia la fase oleosa para

reducir la tensión interfacial y formar la emulsión. La proteína también tiene una menor permeabilidad al oxígeno, lo que lo hace un buen agente micro encapsulante para saborizantes, pues el oxígeno está involucrado en muchas reacciones de degradación en los alimentos, como la rancidez de grasas y aceites (Meng & Cloutier, 2014).

### **3.6 Estabilidad de los agentes encapsulantes**

Las propiedades como la permeabilidad, la estabilidad de la temperatura, la estabilidad mecánica y la estabilidad de los ingredientes (por ejemplo, pH y sales) son críticas para tener aplicaciones exitosas de encapsulación. En consecuencia, el control de las propiedades críticas de la cápsula es muy importante (King, 1995).

Para verificar su calidad se realizan análisis como: cenizas, humedad, higroscopicidad, solubilidad, actividad acuosa, rendimiento de proceso, morfología y tamaño de las microcápsulas, estabilidad de color, análisis sensorial, peso, densidad, unitaria del encapsulado y distribución celular (Rivas Reyes, 2010).

La estabilidad del producto final está influenciada por varios factores ambientales que provocan cambios físicos, químicos y microbiológicos durante su almacenamiento y procesamiento, se ha demostrado que la actividad acuosa ( $a_w$ ) es un factor clave que provoca estos cambios y juega un papel importante en la estabilidad química y en la calidad de los alimentos (Ramírez-Miranda *et al.*, 2014).

Desde un punto de vista termodinámico, el concepto de actividad acuosa ( $a_w$ ) ha servido como un parámetro que indica el control del agua dentro de los alimentos, ya que se ha demostrado que existe un intervalo aleatorio óptimo de humedad correspondiente a un amplio intervalo de actividad acuosa, donde los productos muestran una estabilidad máxima a los procesos deteriorativos (oxidación, reacciones enzimáticas, reacciones de oscurecimiento, entre otros) (Alpizar & Villavicencio, 2013). Por ejemplo, la actividad de agua de ingredientes alimenticios microencapsulados estimulan las energías de activación del proceso de oxidación que puede provocar la rancidez en el producto terminado (Carrillo-Navas *et al.*, 2010).

El concepto matemático de actividad del agua, que es utilizado más comúnmente por investigadores en la industria alimentaria, se define como (Contreras, 2019):

$$a_w = \frac{p}{p_0} = \frac{\text{Húmedad relativa}}{100}$$

(Ec. 3.1)

Donde  $p$  es la presión parcial del agua en el alimento ( $atm$ ) y  $p_0$  la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura ( $atm$ ).

Cuando los alimentos se mantienen a diferentes contenidos de humedad adsorben o desorben humedad, dependiendo de la actividad acuosa, si la  $a_w$  es menor a la humedad del ambiente, el producto adsorberá y en el caso opuesto la desorberá. El máximo valor de  $a_w$  es 1.0. Cuando a un alimento se le retira parte del agua su  $a_w$  disminuye. Si esta disminución es en un porcentaje elevado, el alimento adquiere un valor de  $a_w$  relativamente bajo ( $< 0.5$ ) y se le podrá denominar alimento de humedad intermedia (Alpizar & Villavicencio, 2013).

Asimismo, Ramírez-Miranda *et al.*, (2014) define la actividad acuosa  $a_w$  como la fracción de contenido de agua de un producto que está libre y disponible para el crecimiento de microorganismos y para llevar a cabo diversas reacciones químicas que afectan a su estabilidad, y es el concepto comúnmente empleado para correlacionar el contenido de agua con la calidad de un alimento

La buena comprensión de la relación termodinámica entre el agua y los alimentos permite a los ingenieros alimentarios estimar los requisitos de calor para ciertos procesos y predecir las condiciones óptimas de almacenamiento para la máxima estabilidad de los productos alimenticios (Beristain *et al.*, 1996).



### 3.7 Isotermas de adsorción

La adsorción puede definirse como la tendencia de un componente del sistema a concentrarse en la interfase, donde la composición interfacial es diferente a las composiciones correspondientes al seno de las fases (Viades, 2013).

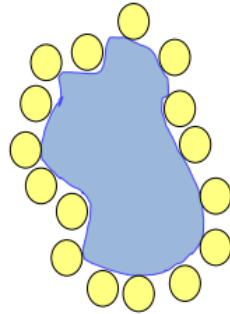


Figura 3. Fenómeno de adsorción

Hay una clara diferencia entre el fenómeno de adsorción y el de absorción, en el segundo existe una penetración física de una fase en la otra; sin embargo, es factible que ambos sucedan simultáneamente, y en este caso puede ser muy difícil separar los efectos de ambos fenómenos, inclusive un fenómeno puede afectar al otro (Viades, 2013).

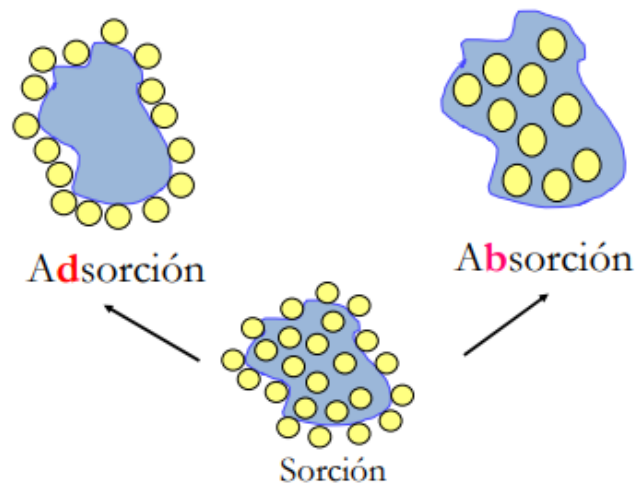


Figura 4. Fenómenos de superficie

Las isotermas de adsorción describen la relación entre la actividad de agua ( $a_w$ ) y el equilibrio del contenido de humedad de un producto (Martinelli *et al.*, 2007). Por lo que se han propuesto diversos modelos matemáticos para describir la absorción de humedad basados en

criterios empíricos y / o teóricos. En la literatura hay una larga lista de modelos de isothermas disponibles, que se pueden dividir en: empíricos, semiempíricos y teóricos (Goula *et al.*, 2008). Los criterios utilizados para seleccionar el modelo de sorción más apropiado es el grado de ajuste a los datos experimentales y el significado físico del modelo (Martinelli *et al.*, 2007).

### 3.7.1 Modelos teóricos

#### **Modelo BET**

El modelo más utilizado para determinar el valor del contenido de humedad en la monocapa de alimentos es la ecuación desarrollada, a partir de la isoterma de Langmuir, por Stephen Brunauer, Paul Emmet y Edward Teller (B.E.T.) en 1938 (Moraes *et al.*, 2008):

$$M = \frac{M_0 \cdot C_B \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 - a_w + C_B \cdot a_w)}$$

(Ec. 3.2)

donde:

- $M$ : contenido de humedad en el equilibrio [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.]
- $M_0$ : contenido de humedad en la monocapa (contenido de agua correspondiente a la saturación de todos los sitios primarios por una molécula de agua) [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.].
- $C_B$ : parámetro de energía
- $a_w$ : actividad acuosa (adimensional)

Sin embargo, el modelo se ajusta las isothermas dentro de un intervalo limitado de valores de  $a_w$ , que es de 0 a 0.55 no obstante, el concepto del valor de monocapa de BET, se acepta como punto de referencia del contenido de humedad de mayor estabilidad para los alimentos secos (Ramírez-Miranda *et al.*, 2014).

### **Modelo GAB**

Las limitaciones del modelo de BET a altos niveles de  $a_w$ , produjeron el desarrollo de otros modelos, como el de Guggenheim, Anderson y De Boer (G.A.B.), para la región de multicapas (Moraes *et al.*, 2008):

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

(Ec. 3.3)

donde:

- $M$ : contenido de humedad en el equilibrio [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.]
- $M_0$ : contenido de humedad en la monocapa (contenido de agua correspondiente a la saturación de todos los sitios primarios por una molécula de agua) [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.].
- $C_G$ : constante de Guggenheim
- $K$ : parámetro de corrección para las propiedades de las moléculas en la multicapa con respecto al líquido
- $a_w$ : actividad acuosa (adimensional)

El modelo de GAB tiene un número razonablemente reducido de tres parámetros, y representa adecuadamente los datos experimentales en un intervalo de  $a_w$  de 0 a 0.95 para la mayoría de los alimentos, de interés práctico.

El modelo de GAB introduce un grado de libertad adicional (la constante  $K$ ) que le otorga gran versatilidad, puesto que en el modelo de BET asume que la adsorción física se localiza en las multicapas sin interacciones laterales. Con la incorporación del parámetro  $K$ , el modelo de GAB asume que las moléculas en multicapas tienen interacciones con el adsorbente en valores energéticos similares a los que tienen las moléculas de la monocapa (Ramírez-Miranda *et al.*, 2014).

### **Modelo Caurie**

Caurie presentó en 1970 la siguiente ecuación (Choque-Quispe *et al.*, 2018):

$$M = e^{\left(a_w \ln(r) - \frac{1}{4.5 - x_s}\right)}$$

(Ec. 3.4)

donde:

- $M$ : contenido de humedad en el equilibrio [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.]
- $X_s$ : contenido de humedad de seguridad que proporciona la máxima estabilidad al alimento deshidratado durante el almacenamiento (g/g m.s)
- $r$ : constante característica del material
- $a_w$ : actividad acuosa

El modelo de Caurie es principalmente utilizado para alimentos deshidratados, y asume que el contenido máximo de agua que afecta a la estabilidad de los alimentos deshidratados es aproximadamente 22% (Caurie, 1970).

Sin embargo, los modelos mencionados no siempre son compatibles con el fenómeno de sorción, por lo que han surgido modelos empíricos y semi empíricos para modelar las isotermas de sorción de alimentos (Ramírez-Miranda *et al.*, 2014).

### **3.7.2 Semiempíricos**

#### **Modelo de Lewicki (dos parámetros)**

Martinelli *et al.* (2007) menciona la ecuación:

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

(Ec. 3.5)

donde:

- $M$ : contenido de humedad en el equilibrio [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.]
- $A$  y  $B$ : parámetros matemáticos para la ecuación (adimensional)
- $a_w$ : actividad acuosa (adimensional)

### Modelo de Peleg

Goula *et al.* (2008) presenta la ecuación:

$$M = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2}$$

(Ec. 3.6)

donde:

- $M$ : contenido de humedad en el equilibrio [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.]
- $K$  y  $n$ : parámetros de ajuste (adimensional)
- $a_w$ : actividad acuosa (adimensional)

### Modelo de Hasley

Pahlevanzadeh & Yazdani (2005) presenta la ecuación:

$$M = \left[ -\frac{A}{T \cdot \ln a_w} \right]^{1/B}$$

(Ec. 3.7)

donde:

- $M$ : contenido de humedad en el equilibrio [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.]
- $A$  y  $B$ : parámetros matemáticos (adimensional)
- $T$ : temperatura en grados K
- $a_w$ : actividad acuosa (adimensional)

Este modelo es una buena representación de los datos de adsorción con respecto a las isoterms de tipo I, II o III. Además, esta ecuación describe el comportamiento de sorción de los productos alimenticios que contienen almidón (Andrade *et al.* 2011).

### 3.7.3 Modelos Empíricos

#### Modelo de Henderson

Martinelli *et al.* (2007) presenta la ecuación:

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

(Ec. 3.8)

donde:

- $M$ : contenido de humedad en el equilibrio [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.]
- $A$  y  $B$ : parámetros matemáticos
- $a_w$ : actividad acuosa

#### Modelo de Smith

Goula *et al.* (2008) presenta la ecuación:

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

(Ec. 3.9)

donde:

- $M$ : contenido de humedad en el equilibrio [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.]
- $A$  y  $B$ : parámetros matemáticos
- $a_w$ : actividad acuosa

### Modelo de Oswin

Martinelli *et al.* (2007) presenta la ecuación:

$$M = A \cdot \left[ \frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^B$$

(Ec. 3.10)

donde:

- $M$ : contenido de humedad en el equilibrio [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.]
- $A$  y  $B$ : parámetros matemáticos
- $a_w$ : actividad acuosa (adimensional)

En general, las isothermas de adsorción presentan curvas características, que responden a procesos basados en los distintos fenómenos y mecanismo que controlan el proceso de adsorción de un gas por un sólido. Empíricamente, Brunauer ha clasificado las isothermas en cinco tipos estándar que se muestran en la (Figura 5) donde presentan el volumen adsorbido ( $V_{ad}$ ) frente a la presión parcial del gas adsorbato  $\left(\frac{P}{P_0} \quad P_0: \text{presión de saturación}\right)$  (Hitzky-Ruiz, 1993).

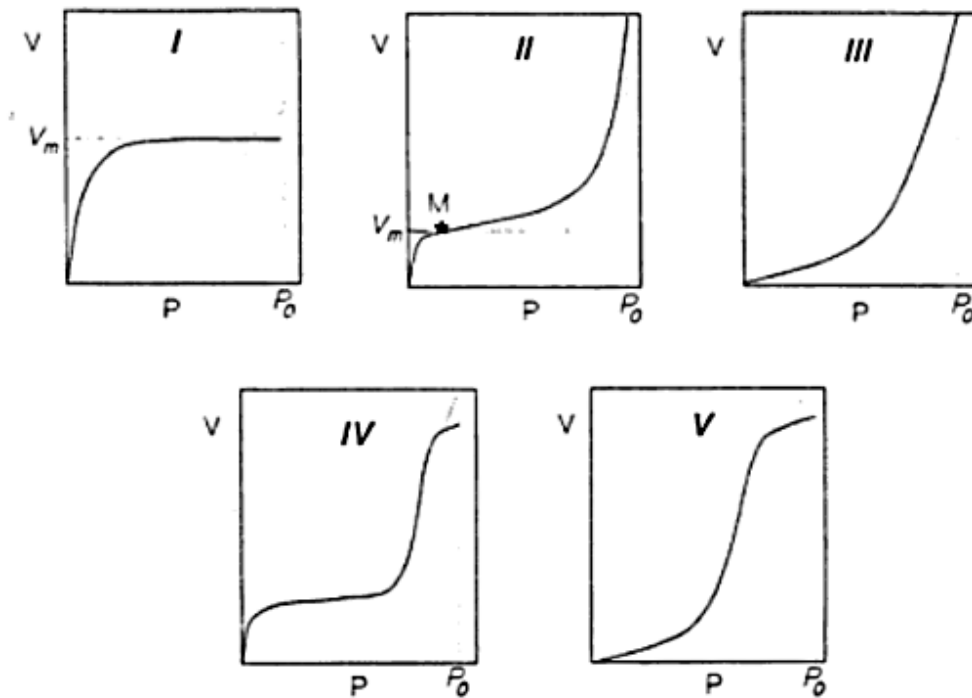


Figura 5. Diferentes tipos de isoterma de adsorción en sistemas gas/sólido, de acuerdo con la clasificación de Brunauer (Hitzky-Ruiz, 1993)

- **Isotermas del tipo I:** muestran un fuerte aumento de la cantidad adsorbida con el correspondiente aumento de la presión, alcanzándose un valor límite. Este tipo de isotermas, que corresponden a procesos de adsorción en monocapa, se conocen como isotermas de Langmuir. La formación de una capa mono molecular de gas adsorbido, alcanzándose una región de saturación, que representa el equilibrio entre el fenómeno de adsorción y el de desorción en la monocapa. Este tipo de isotermas se obtienen en procesos de adsorción física en sólidos que tienen una estructura porosa muy fina.
- **Isotermas del tipo II:** Son las que más frecuentemente se observan experimentalmente, siendo características de fenómenos de adsorción física en multicapas sobre sólidos porosos. Presenta forma sigmoidal, correspondiendo la formación de la monocapa a un punto singular (M). Cuando se obtiene isotermas de este tipo en procesos de adsorción en sólidos micro porosos, el punto M corresponde no solo a la formación de la monocapa en la superficie sino también a fenómenos de



condensación en los microporos. En ambos casos, el resto de la curva representa la adsorción en multicapa.

- **Isotermas de otro tipo (III, IV, V):** son muchos menos frecuentes que las anteriores. En las de tipo II se observa una respuesta significativa a la adsorción solo a partir de un rango de presión del gas; en las que tipo IV se observa un comportamiento parecido, en general, a las tipo II pero a presiones próximas a la presión de saturación el volumen adsorbido permanece constante, lo que atribuye a una condensación capilar en los microporos del sólido adsorbente; en cuanto a las isotermas de tipo V también se aprecia este último comportamiento si bien a presiones bajas tiene lugar un comportamiento similar al de las isotermas de tipo III.

## **4. Justificación, pregunta de investigación y objetivos**

### **4.1 Justificación**

Cada vez más los consumidores de alimentos procesados se documentan y analizan las diferentes variables que existen y que influyen en la decisión de compra de un producto determinado basado en su precio, disponibilidad, embalaje, etc. En la industria de los alimentos y bebidas, el sabor es la variable más importante, pues en muchas ocasiones define el ciclo de vida de los productos. Se pueden ofrecer productos de origen natural, orgánicos, nutritivos, sin aditivos químicos, pero si el consumidor no tiene una buena experiencia con el sabor, este decidirá que las características del producto alimentario no son suficientes para seguirlo adquiriendo.

De aquí la importancia de prestar atención al manejo y a las condiciones de almacenamiento de los saborizantes para retardar procesos deteriorativos y alargar su vida de anaquel. Uno de los métodos más populares para proteger saborizantes naturales, es la microencapsulación, pues esta técnica proporciona una barrera protectora contra ambientes deteriorativos que promueve reacciones químicas, enzimáticas y microbiológicas, así como cambios físicos, por lo que es de interés para los tecnólogos en alimentos poder establecer condiciones de almacenamiento adecuados para este tipo de insumos que se emplean en el procesamiento de alimentos y que se ha señalado como un factor clave en la calidad de estos.

Por lo anterior, en este trabajo se analiza el fenómeno de adsorción de humedad en microcápsulas de saborizante de nuez obtenidos mediante secado por aspersion empleando goma de mezquite y proteína de suero de leche como agentes encapsulantes y, a partir de diferentes ajustes de modelos matemáticos de isotermas de adsorción poder establecer condiciones de almacenamiento del saborizante.

## **4.2 Pregunta de investigación**

¿Se pueden establecer condiciones de estabilidad de almacenamiento de microcápsulas de saborizante de nuez a partir de isothermas de adsorción de vapor de agua experimentales utilizando modelos teóricos de parámetros ajustables?

## **4.3 Objetivo general**

Establecer condiciones de estabilidad de almacenamiento de microcápsulas de saborizante de nuez a partir de isothermas de adsorción de vapor de agua experimentales utilizando modelos teóricos de parámetros ajustables.

## **4.4 Objetivos específicos**

- Obtener microcápsulas de saborizante de nuez mediante secado por aspersión.
- Obtener isothermas de adsorción experimentales a diferentes temperaturas mediante el método gravimétrico de celdas en equilibrio.
- Ajustar los datos experimentales obtenidos mediante diferentes modelos matemáticos por regresión no lineal.
- Establecer condiciones de estabilidad de almacenamiento para microcápsulas de saborizante de nuez obtenidas mediante secado por aspersión.

## 5. Metodología

### 5.1 Materiales

El material activo a encapsular fue saborizante de nuez, adquirido en la compañía Sigma-Aldrich S. A de C. V. (Toluca, Estado de México). Goma de mezquite (GM) (*Prosopis laevigata*) fue recolectada en el Estado de San Luis Potosí, México, en forma de lágrimas y purificada de acuerdo con Vernon-Carter *et al.* (1996) y concentrado de proteína de suero de leche con 80% de proteína en base seca fue adquirida en la compañía Hilmar Ingredients (Hilmar<sup>TM</sup> 8000, Hilmar Ingredients, Hilmer, CA, EUA). El agua utilizada en todos los experimentos fue agua destilada proporcionada por el Laboratorio de Ingeniería Química de la Unidad El Cerrillo de la Facultad de Química de la UAEMéx. Las sales empleadas para el estudio de adsorción se compraron en Sigma-Aldrich S. A de C. V. (Toluca, Estado de México).

### 5.2 Formulación de emulsiones

Se elaboraron tres emulsiones aceite en agua con los dos tipos de biopolímeros, goma de mezquite (GM) y concentrado de proteína de suero de leche (PSL) en una relación de material de pared:material a encapsular de 2:1, con un contenido de sólidos totales del 30% w/w de acuerdo con las siguientes proporciones (Tabla 2):

*Tabla 2. Formulación de emulsiones*

Material de pared	GM (% w/w)	PSL (% w/w)
GM100	100	0
GM50 – PSL50	50	50
PSL100	0	100

GM = goma de mezquite, PSL = proteína de suero de leche.

El procedimiento que se siguió para elaborar las emulsiones fue el siguiente:

- Se prepararon soluciones acuosas de cada agente encapsulante puro y su mezcla a temperatura ambiente ( $\sim 20$  °C) respecto a la tabla 5.1 en una proporción 20% peso del agente y 70% peso de agua con agitación mecánica mediante un caframo a 200 r.p.m. por 24 h para permitir una rehidratación completa de los materiales de pared.
- Posteriormente, la fase oleosa (10% peso de saborizante de nuez) fue añadida por completa gota a gota a la fase acuosa usando un homogeneizador Ultra-Turrax T50 basic (IKA<sup>®</sup>-WERKE Works Inc., Wilmington, NC, EUA) a 5200 r.p.m. durante 10 min manteniendo la temperatura de la emulsión por debajo de los 30 °C mediante un baño de hielo para evitar que se desestabilizará la emulsión.

### **5.3 Formación de microcápsulas**

Después de la preparación de las emulsiones, estas se alimentaron por medio de un dosificador a un secador por aspersión a nivel planta piloto Nichols/Niro (Turbo Spray PLA, NY, EUA) a una temperatura de entrada del aire de  $150 \pm 5$  °C, una temperatura de salida del aire de  $85 \pm 5$  °C, inyectando aire comprimido a 4 bar y un flujo de alimentación de 40 mL/min.

### **5.4 Isotermas de adsorción**

Las microcápsulas obtenidas se colocaron en cajas petri y se colocaron en desecadores de vidrio a temperatura ambiente conteniendo P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> durante 3 semanas para reducir al mínimo su contenido de humedad ( $\sim 2\%$  en base seca). Las isotermas de adsorción de vapor de agua de las microcápsulas se determinaron a 25, 35 y 40 °C, utilizando el método gravimétrico de celdas de equilibrio en el intervalo de humedad entre 0.11 a 0.85 descrito por Lang *et al.* (1981).

Se pesó un gramo de muestra en una balanza analítica (Ohaus mod AP-210S) y se colocaron en pequeños desecadores de vidrio de 10 cm de diámetro conteniendo soluciones saturadas de diferentes sales en el fondo de los desecadores (5 desecadores por solución) en el intervalo

de actividad acuosa ( $a_w$ ) de 0.11 a 0.85 (Labuza *et al.*, 1985) (Tabla 3), colocando papel filtro Whatman No. 1 para permitir la transmisión de humedad.

*Tabla 3. Actividad de agua de las soluciones saturadas de las sales a diferentes temperaturas*

<b>Sales / T (°C)</b>	<b>25</b>	<b>35</b>	<b>40</b>
LiCl	0.115	0.108	0.105
KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	0.237	0.215	0.206
MgCl <sub>2</sub>	0.329	0.318	0.313
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.443	0.436	0.433
MgNO <sub>3</sub>	0.536	0.515	0.506
NaNO <sub>2</sub>	0.654	0.628	0.614
NaCl	0.765	0.743	0.734
KCl	0.846	0.821	0.806

Los desecadores se colocaron en estufas de convección forzada (marca Riossa, México) a las temperaturas de operación antes citadas y se pesaron las muestras cada 5 días en una balanza analítica (Ohaus mod AP-210S) hasta que alcanzaron el estado de equilibrio. Finalmente se midió la actividad de agua mediante un medidor de actividad acuosa Aqualab (mod. Series 3TE con compensador de temperatura, Decagon, Wilmington, EUA) y se determinó el contenido de humedad de las muestras por diferencia de peso después de secarlas en una estufa a 60 °C por 24 h usando perclorato de magnesio como desecante.

Los datos experimentales de los isoterms fueron ajustados por las ecuaciones de los modelos teóricos de B.E.T (Ec. 3.2), G.A.B (Ec. 3.3) y Caurie (Ec. 3.4), los modelos semiempíricos de Lewicki dos parámetros (Ec. 3.5), Peleg (Ec. 3.6) y Hasley (Ec. 3.7) y los modelos empíricos de Henderson (Ec. 3.8), Smith (Ec. 3.9) y Oswin (Ec. 3.10). Los parámetros de ajuste de estos modelos cinéticos se determinaron mediante un análisis de regresión no lineal con el software Polymath 6.10.

Para los nueve casos se ajustaron utilizando la diferencia porcentual relativa entre los valores del experimento y los valores estimados del contenido de humedad, es decir, utilizando el módulo de desviación relativa media ( $E$ ) (Ec.5.1), que en general se considera un buen ajuste cuando  $E \leq 5\%$  (Pérez-Alonso et al., 2006):

$$E = \frac{100}{N} \sum \frac{|M_i - M_{Ei}|}{M_i}$$

*Ec. 5.1*

donde:

$M_i$ : contenido de humedad en la observación  $i$

$M_{Ei}$ : contenido de la humedad previsto en esa observación

$N$ : es el número de observaciones

## 6. Resultados y discusión

### 6.1 Modelos teóricos

Los datos experimentales de los tres sistemas microencapsulantes a 25°, 35° y 40°C fueron ajustados mediante una regresión no lineal con tres modelos teóricos, los datos obtenidos se presentan en la Tabla 4.

Primeramente, el modelo teórico que mejor se ajusta a los datos experimentales es el modelo de GAB pues los coeficientes de determinación  $r^2$  son más cercanos a la unidad que los coeficientes del modelo de BET y el de Caurie, además el modelo de GAB tiene una desviación relativa media ( $E$ ) inferior para los tres tipos de microcápsulas (GM25°C: 4.072%, GM35°C: 4.100%, GM40°C: 2.992% ; GM-SL25°C: 3.160%, GM-SL35°C: 4.730%, GM-SL40°C: 4.681%; SL25°C: 4.977%, SL35°C: 5.619%, SL40°C: 4.794%) respecto a los obtenidos por BET (GM 25°C: 9.672%, 35°C: 8.832%, 40°C: 3.035%; GM-SL 25°C: 7.928%, 35°C: 9.399%, 40°C: 4.980%; SL 25°C: 10.635%, 35°C: 9.759%, 40°C: 3.790%) y para Caurie ocho de los nueve datos están por encima del 6% de error. Esta tendencia se refuerza con los valores de la varianza ( $\sigma^2$ ) del ajuste al modelo de GAB son inferiores a los ajustes de BET y Caurie.

En vista del buen ajuste con el modelo de GAB es importante resaltar que la importancia de este modelo que se debe principalmente al valor de la monocapa ( $M_0$ ), porque indica la cantidad de agua que se adsorbe fuertemente en sitios específicos y es considerada como el valor óptimo en el que un alimento es más estable (Pérez-Alonso et al., 2006), con este modelo se obtuvieron valores de  $M_0$  para las microcápsulas con goma de mezquite 25°C: 5.52, 35°C: 5.091 y 40°C: 4.687 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s., para la mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche 25°C: 4.846, 35°C: 4.669 y 40°C: 4.148 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s., y para las microcápsulas con proteína de suero de leche 25°C: 4.923, 35°C: 4.156 y 40°C: 5.068 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.



Tabla 4. Parámetros del modelo de BET para las isotermas de adsorción de las microcápsulas de nuez

Material	Temperatura (°C)	Parámetros															
		BET					GAB						Caurie				
		M <sub>0</sub>	C <sub>B</sub>	r <sup>2</sup>	σ <sup>2</sup>	E	M <sub>0</sub>	C <sub>G</sub>	k	r <sup>2</sup>	σ <sup>2</sup>	E	r	x <sub>s</sub>	r <sup>2</sup>	σ <sup>2</sup>	E
GM	25	4.115	102.000	0.976	1.691	9.672	5.52	14.538	0.929	0.997	0.258	4.072	13.541	1.199	0.981	1.187	6.894
	35	4.230	52.200	0.987	0.728	8.832	5.091	15.072	0.947	0.995	0.337	4.100	13.207	1.164	0.973	1.277	7.157
	40	4.651	14.950	0.997	0.142	3.035	4.687	14.425	0.998	0.997	0.165	2.922	16.854	1.018	0.984	0.724	7.497
GM-SL	25	3.973	79.088	0.989	0.720	7.928	4.846	14.162	0.953	0.998	0.169	3.160	16.588	0.991	0.979	1.273	8.331
	35	3.808	46.690	0.981	0.840	9.399	4.669	13.276	0.942	0.990	0.511	4.730	13.190	1.059	0.969	1.206	7.225
	40	4.394	5.637	0.998	0.085	4.980	4.148	6.819	1.014	0.998	0.086	4.681	26.112	0.604	0.994	0.261	7.092
SL	25	3.666	11.862	0.988	0.739	10.635	4.923	4.348	0.937	0.996	0.262	4.977	23.892	0.610	0.987	0.747	6.558
	35	3.506	9.374	0.993	0.300	9.759	4.156	5.455	0.959	0.996	0.208	5.619	21.892	0.574	0.982	0.671	8.339
	40	4.440	2.449	0.998	0.089	3.790	5.068	1.919	0.972	0.998	0.090	4.794	43.137	0.168	0.998	0.094	4.811

Los valores obtenidos de  $M_0$  presentan una tendencia a disminuir cuando la temperatura aumenta, Pascual-Pineda et al. (2017) señala que se debe a que la adsorción de vapor de agua es un proceso exotérmico en donde el incremento de la temperatura causa una reducción en el número de sitios activos en donde las moléculas de agua podrían unirse, es decir que el material se vuelve menos higroscópico.

Por otro lado, los valores del parámetro  $C_G$  no muestran una tendencia clara, pues para la mezcla GM-SL disminuye conforme aumenta la temperatura, pero para GM y SL solo muestra un valor máximo a una temperatura de 35°C. En teoría este parámetro está relacionado con el calor de adsorción de la monocapa sobre la superficie del alimento, y se asume que la fuerza de interacción agua-alimento se favorece a bajas temperaturas en vista de lo mencionado anteriormente (Pascual-Pineda et al., 2017).

De modo similar, en Pérez-Alonso et al. (2006) se informó que se han estudiado más de 30 alimentos y que se ha encontrado que en el 74% de ellos el parámetro  $C_G$  no aumentó a medida que disminuyó la temperatura, probablemente debido a cambios irreversibles asociados con aumentos de temperaturas tales como reacciones enzimáticas y desnaturalización de proteínas por lo que es posible que  $C_G$  carezca de un significado físico, y solo sea el resultado de una compensación matemática entre parámetros, lo que ocurre en cualquier procedimiento de ajuste de curvas.

Ahora, el parámetro  $k$  proporciona una medida de la interacción de las moléculas en las multicapas con respecto al agua pura y el adsorbente (los tres materiales de pared) es decir que con base en los resultados de la Tabla 4 en donde encontramos menos interacciones es en las microcápsulas almacenadas a 25°C.

Se considera que el modelo de GAB describe apropiadamente a la isoterma de adsorción si los valores se encuentran en el intervalo de  $0.24 \leq k \leq 1$ . Cuando  $k = 1$  las moléculas de agua en la multicapa se comportan como agua pura, las cuales no tienen interacción alguna con la superficie (Pascual-Pineda et al., 2017). Para el experimento los valores de  $k$  están por debajo de la unidad (entre 0.929 y 0.998) excepto para GM-SL a 40°C ( $k = 1.014$ ) y se puede explicar como un resultado de ajuste matemático del modelo. Resultados similares han sido

reportados por varios autores y han comprobado que el parámetro de  $M_0$  aún puede utilizarse para estimar el contenido de humedad para almacenar el alimento deshidratado (Pascual-Pineda et al., 2017).

Las isothermas de adsorción experimentales y ajustadas al modelo de GAB a 25°C, 35°C y 40°C para las microcápsulas de saborizante de nuez con los diferentes materiales de pared se muestran en la Figura 7 que representan isothermas sigmoidales del tipo II según la clasificación de Brunauer (Hitzky-Ruiz, 1993).

Es posible visualizar que los datos experimentales tienen un buen ajuste con el modelo de GAB, también se aprecia que con los tres biomateriales a medida que la temperatura aumenta, el contenido de humedad disminuye, esta tendencia es explicada por el estado de excitación de las moléculas puesto que las fuerzas atractivas entre las moléculas de agua son menores debido a un aumento en la energía cinética lo que conduce a una mayor distancia entre sí, en consecuencia las moléculas de agua con movimiento lento (menor energía) pueden unirse fácilmente en la superficie (Alpizar-Reyes et al., 2017).

Con respecto al modelo de BET este puede presentar esos porcentajes de error debido a que se ajusta bien solo a valores de  $a_w$  menores a 0.5 (Goula et al., 2008) y en el experimento se trabajaron  $a_w$  de 0 a 0.846.

Sin embargo, del ajuste del modelo de BET se obtienen dos constantes que son el contenido de humedad de la monocapa ( $M_0$ ) y la constante de energía ( $C_B$ ) que es un parámetro similar que nos permite clasificar las isothermas de sorción según la clasificación de Brunauer, cuando los valores de  $C_B > 2$ , las isothermas de sorción obtenidas pueden clasificarse como tipo II como lo podemos observar en la Figura 6 (Goula et al., 2008).

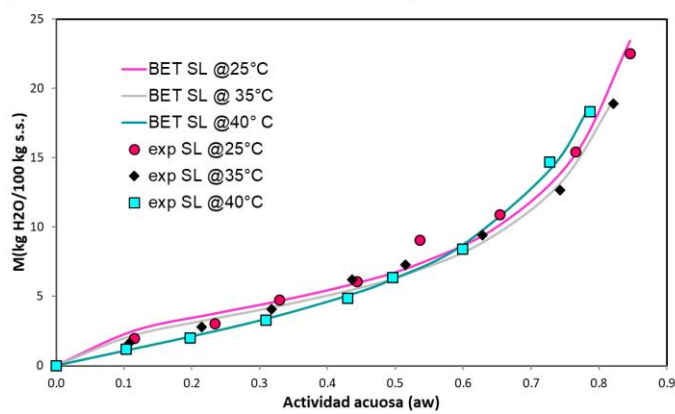
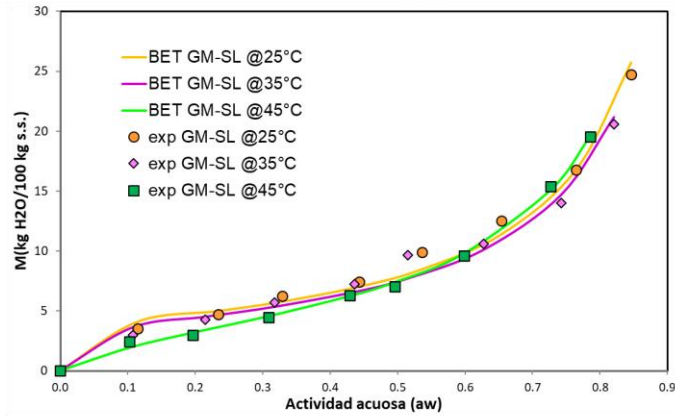
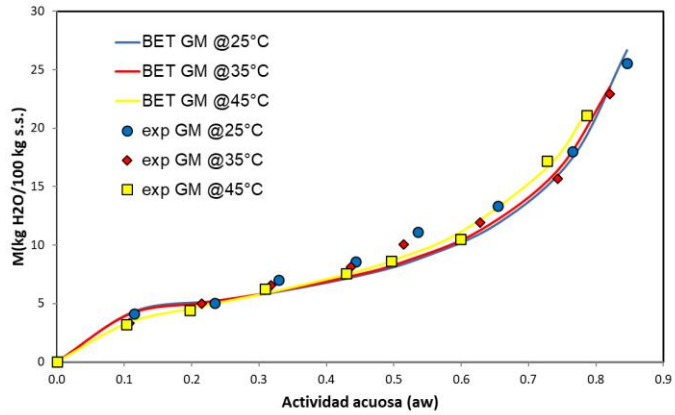


Figura 6. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de BET para microcápsulas de saborizante nuez.

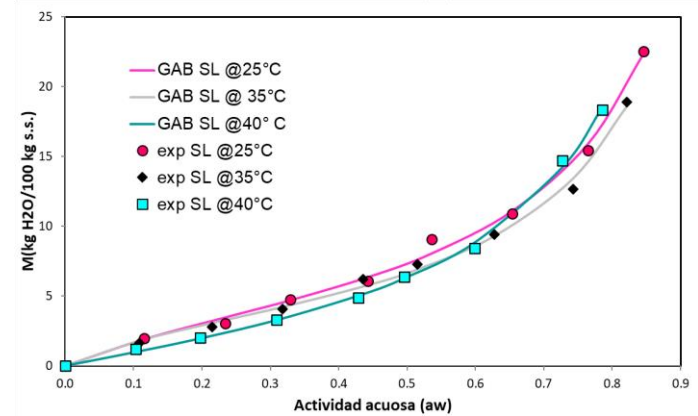
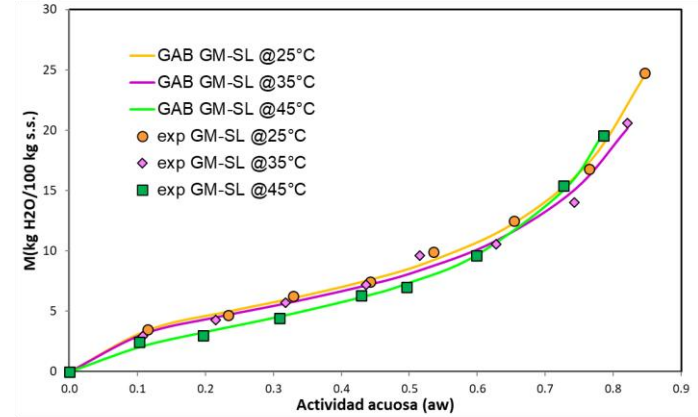
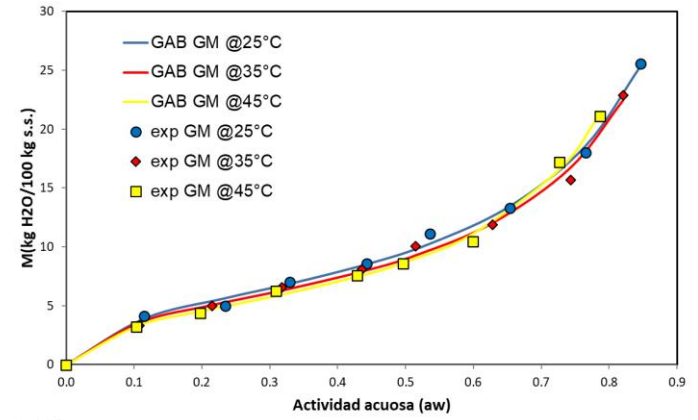


Figura 7. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de GAB para microcápsulas de saborizante de nuez.

Las isothermas BET GM-SL a 40°C, BET SL 40°C y GAB SL 40°C presentan más una clasificación tipo III, esto debido que Brunauer en 1940 planteó que las curvas de sorción obtenidas son tipo II a 20°C y tipo III a mayores temperaturas, aunque también existe un patrón similar con el modelo de GAB y Caurie a presentarse como tipo III (Figura 8) Mulet et al. (2002) señalan que esto es característico de alimentos con alto contenido de azúcar.

Ahora bien, el modelo de Caurie contempla el fenómeno de adsorción desde un nuevo enfoque y abandona la idea que asume el modelo de BET de que la adsorción de humedad en los alimentos se organiza en un número infinito de capas de agua, convencido de que esta posee carácter unimolecular (Sapailla, 2020). Con este modelo los coeficientes de determinación  $r^2$  son superiores (GM 25°C: 0.981, GM 35°C: 0.973; GM-SL 35°C: 0.969; SL 25°C: 0.987, SL 35°C: 0.982) a los del modelo de BET, es decir, el modelo de Caurie se ajusta mejor que el modelo de BET a temperaturas inferiores a 40°C, en donde se presenta el menor  $E$ . Aunque de los tres modelos teóricos tienen los coeficientes de determinación  $r^2$  más bajos, Abramovic y Klotufar (2006) le atribuyen validez a este modelo para cualquier valor de  $a_w$  inferior a 0.98.

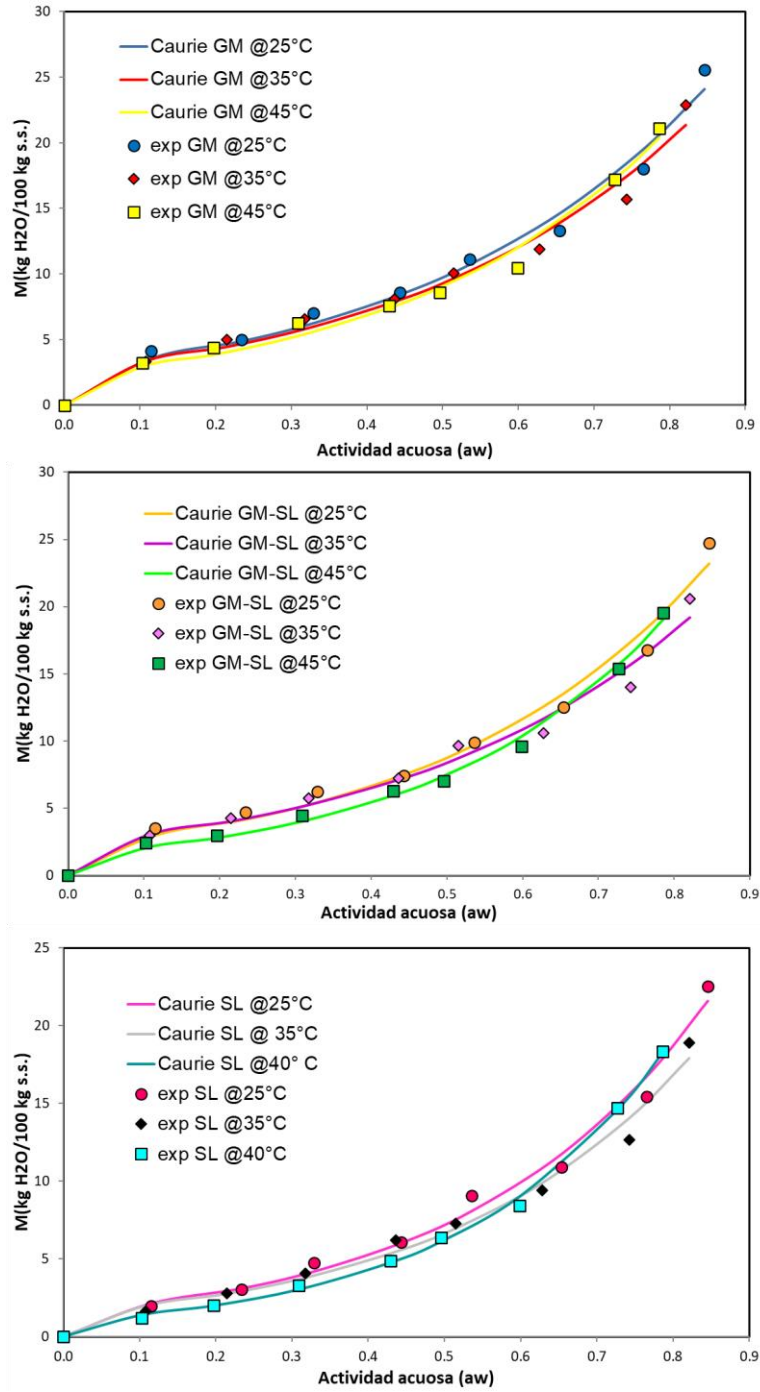


Figura 8. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Caurie para microcápsulas de saborizante de nuez

## 6.2 Modelos semi empíricos

Los datos obtenidos mediante ajustes no lineales con los tres modelos semi empíricos Halsey, Peleg y Lewicki (dos parámetros) para las tres temperaturas y los tres tipos de microcápsulas se encuentran en la Tabla 5.

El modelo de cuatro parámetros desarrollado por Peleg tiene mejores desviaciones relativas medias ( $E$ ) y varianzas que el modelo de GAB a una temperatura mayor a 25°C y entre los nueve modelos Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6 tiene los ajustes más robustos para las isotermas con las microcápsulas de GM a 35°C y 40°C (3.100% y 2.395% respectivamente), GM-SL a 35°C y 40°C (4.903% y 3.661%) y SL a 40°C (2.734%), sin embargo con base en los datos de los Anexos (Tabla 7- Tabla 24) el modelo de GAB muestra una tendencia a tener mejores ajustes con actividades acuosas menores a 0.3 para temperatura 25° y 35°C, además el modelo de Peleg no se basa en el supuesto de existe una monocapa bien definida de agua absorbida, y sus constantes no tienen un significado físico (Stavros & Blahovec, 2009).

De los tres modelos semi empíricos, el modelo de Halsey dio las predicciones menos precisas para las cápsulas con proteína de suero de leche como material de pared (25°C: 11.585%, 35°C: 12.056%, 40°C:9.964%) y tiende a incrementar el valor de  $E$  a temperaturas de 35°C de los tres materiales estudiados, pero a 40°C tienen un buen ajuste, un comportamiento similar encontraron Cassini et al. (2006) a altas temperaturas en alimentos ricos en proteínas.

También, Chirife e Iglesias (1978), encontraron que la ecuación de Halsey podría usarse para describir razonablemente bien el comportamiento de sorción de doscientos veinte materiales alimenticios diferentes en el intervalo aproximado de actividad de agua 0,10 a 0,80.

Los ajustes de los datos experimentales de la goma de mezquite y la mezcla de goma de mezquite con proteína de suero de leche presentan las desviaciones relativas medias

Tabla 5. Parámetros de modelos semi empíricos para las isotermas de adsorción de las microcápsulas de nuez

Material	Temperatura (°C)	Parámetros																
		Lewicki (dos parámetros)					Peleg							Halsey				
		A	B	$r^2$	$\sigma^2$	$E$	k1	n1	k2	n2	$r^2$	$\sigma^2$	$E$	A	B	$r^2$	$\sigma^2$	$E$
GM	25	9.887	0.457	0.993	0.408	5.672	16.067	0.723	44.022	8.151	0.997	0.307	5.658	5342.744	1.444	0.996	0.242	4.046
	35	9.414	0.446	0.987	0.608	5.955	15.945	0.752	80.806	11.058	0.999	0.097	3.000	4416.774	1.378	0.992	0.368	5.223
	40	9.218	0.379	0.986	0.625	9.062	11.583	0.566	45.604	5.834	0.998	0.116	2.395	3004.277	1.207	0.995	0.210	3.360
GM-SL	25	8.906	0.417	0.993	0.426	6.528	14.451	0.733	45.609	8.052	0.997	0.255	5.335	3786.981	1.352	0.997	0.156	3.546
	35	8.466	0.446	0.983	0.654	6.207	15.242	0.810	105.558	13.334	0.996	0.232	4.903	3813.717	1.378	0.986	0.533	6.368
	40	7.594	0.282	0.995	0.233	7.817	9.303	0.634	38.906	5.039	0.999	0.055	3.661	1789.557	1.062	0.999	0.046	2.754
SL	25	7.377	0.350	0.996	0.242	4.536	16.975	1.139	49.685	10.554	0.997	0.237	6.608	2289.470	1.224	0.990	0.608	11.585
	35	6.760	0.343	0.994	0.237	3.668	15.188	1.093	95.037	13.491	0.999	0.037	3.797	1943.593	1.181	0.991	0.355	12.056
	40	6.345	0.176	0.998	0.084	3.824	9.482	0.923	35.260	4.897	0.999	0.057	2.734	1183.913	0.938	0.995	0.228	9.964



más altas con el modelo de Lewicki de dos parámetros (GM25°C: 5.672%, GM35°C: 5.995%, GM40°C: 9.062%; GM-SL25°C: 6.528%, GM-SL35°C: 6.207%, GM-SL40°C: 7.817%); mientras que, de los seis modelos analizados, el modelo de Lewicki es el que mejor describe el fenómeno de adsorción para las microcápsulas con proteína de suero de leche como material de pared (SL25°C: 4.536%, SL35°C: 3.668%, SL40°C:3824%).

Aunque no se pueden atribuir significados físicos a los parámetros de la ecuación de Lewicki, en contraste con el modelo de GAB o el modelo de Peleg que predicen una adsorción finita cuando la actividad acuosa es igual a la unidad aun cuando no hay indicios de que el contenido de humedad adsorbido se estabilice en actividades acuosas muy altas, la ecuación de Lewicki se puede utilizar para describir isothermas de sorción en actividades acuosas cercanas a 1 (Lewicki, 1998).

Las isothermas de sorción de los modelos semi empíricos Figura 9, Figura 10 y Figura 11 muestran que el contenido de humedad en equilibrio aumenta cuando la actividad del agua incrementa a temperatura constante y tienen forma sigmoideal para las tres temperaturas examinadas y los tres materiales de pared, también se observa que las isothermas de sorción para los modelos Lewicki y Peleg obedecen un tipo III para los tres tipos de microcápsulas, mientras que para el modelo de Halsey la forma del tipo II predomina en los tres sistemas microencapsulantes.

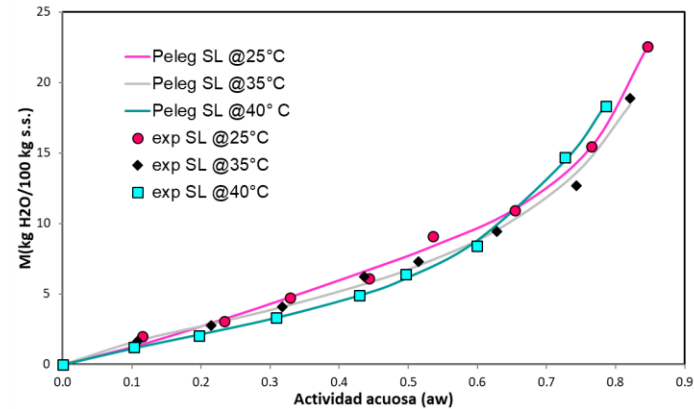
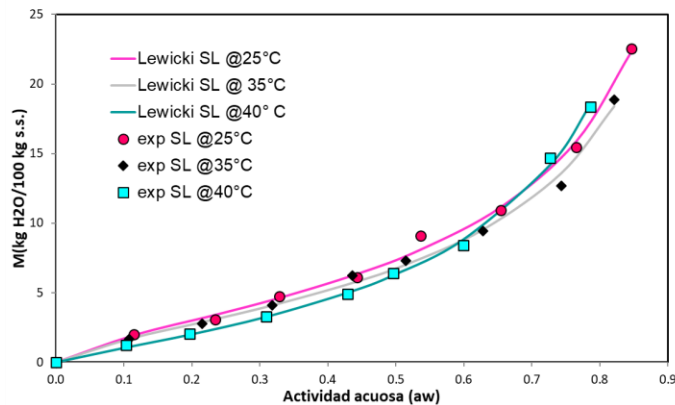
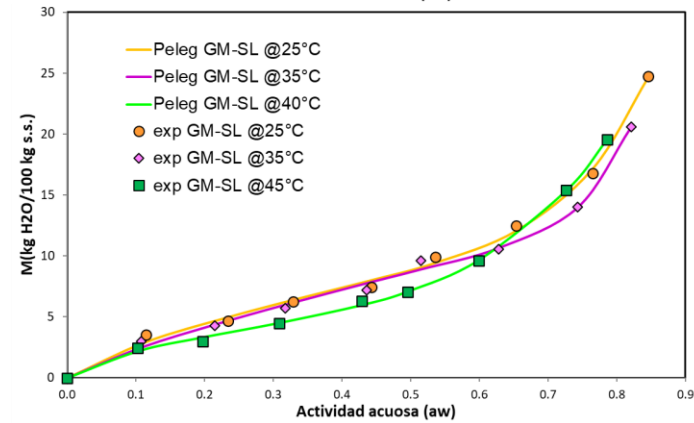
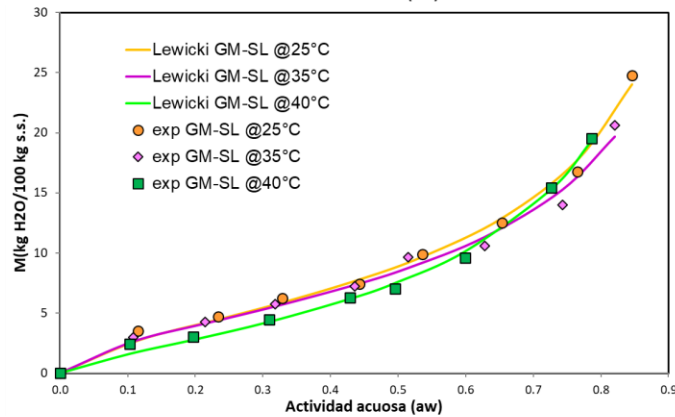
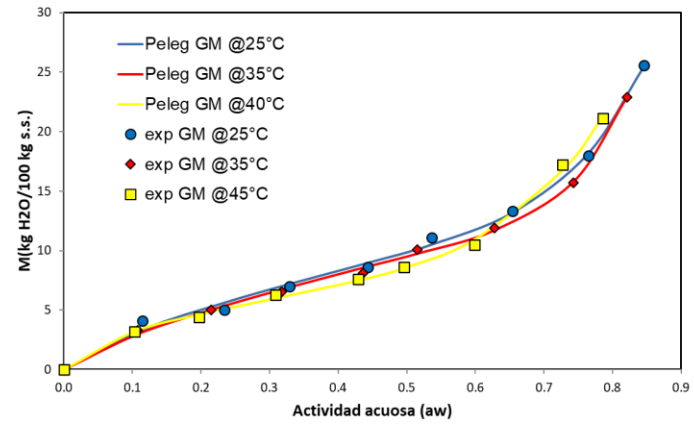
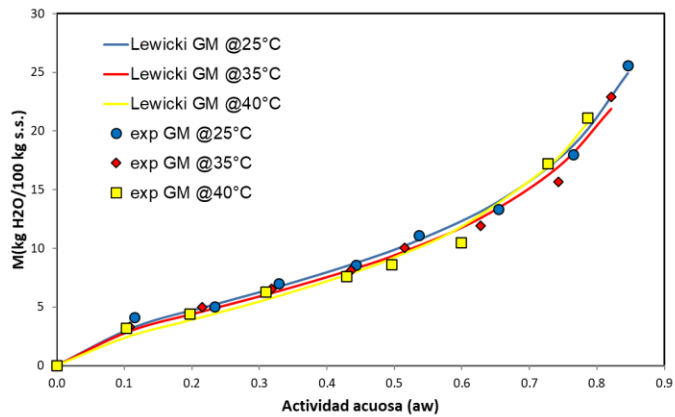


Figura 9. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Lewicki (dos parámetros) para microcápsulas de saborizante de nuez

Figura 10. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Peleg para microcápsulas de saborizante de nuez

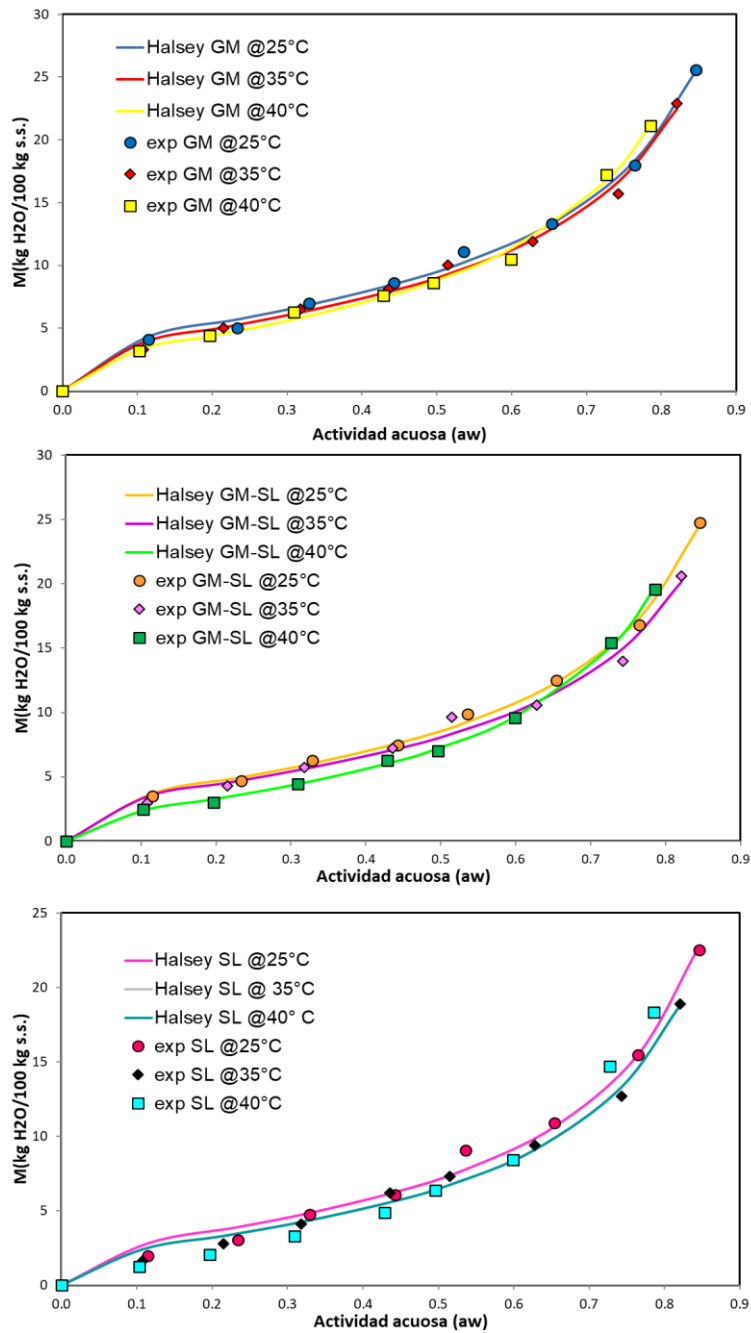


Figura 11. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Halsey para microcápsulas de saborizante de nuez

### 6.3 Modelos empíricos

Los datos obtenidos de los ajustes de datos experimentales con modelos empíricos se presentan en la Tabla 7, el peor ajuste para los datos experimentales en las tres temperaturas se obtuvo con el modelo de Henderson (GM25°C:11.266%, GM35°C:12.037%, GM40°C: 15.345%; GM-SL25°C: 13.936%, GML-SL35°: 12.125%, GM-SL40°C: 15.340%; SL25°C: 11.355%, SL35°C: 10.657%, SL40°C: 12.993%), de los nueve modelos es el más deficiente para describir las isotermas de sorción de microcápsulas de saborizante de nuez con los tres materiales de pared empleados, sobre todo en actividades acuosas de entre 0.103 y 0.115 donde presenta porcentajes de error de hasta el 58.052% (Tablas 25-33) además tiene los valores de varianza más altos para GM y GM-SL a las tres temperaturas.

Esto es seguido por el modelo de Smith (GM25°C:6.128%, GM35°C:6.137%, GM40°C: 10.269%; GM-SL25°C: 8.926%, GML-SL35°: 6.664%, GM-SL40°C: 12.605%; SL25°C: 9.356%, SL35°C: 7.391%, SL40°C: 19.849%). Aunque Smith le da significado a los parámetros de su modelo en el que teoriza que hay dos fracciones de agua que se adsorben en la superficie seca; la primera fracción exhibe un calor de condensación más alto que el normal y la segunda, que solo se puede formar después de que se haya adsorbido la primera fracción, que está formada por multicapas de moléculas de agua condensada, que previenen eficazmente cualquier posible evaporación de la capa inicial, el parámetro A teóricamente representa la cantidad de agua en la primera fracción sorbida y B la cantidad de agua en la fracción de humedad multicapa (Andrade et al., 2011), en este caso de acuerdo a la Tabla 7 no muestra una tendencia clara.

En adición, respecto a los otros ocho modelos, Smith tiene los ajustes más deficientes de ajustes en actividades acuosas entre 0.785 y 0.846 alcanzando porcentajes de error de hasta 7.174%.

Ahora, aunque el modelo de Oswin es solo una relación empírica basada en la distribución de Pearson Tipo XII y no considera el efecto de la temperatura (Mulet et al., 2002; Shimizu y Matubayasi, 2021) el ajuste de los datos (GM25°C: 5.672%, GM35°C: 5.955%, GM40°C: 9.062%; GM-SL25°C: 6.528%, GML-SL35°: 6.207%, GM-SL40°C: 7.817%; SL25°C:

4.5336%, SL35°C: 3.668%, SL40°C: 3.824%) son aceptables y se puede observar que tiene los mismos valores  $E$  que los ajustes con el modelo de Lewicki (dos parámetros), un comportamiento similar se ve reflejado en el trabajo de tesis de Alpizar y Villavicencio (2013).

Las isothermas de Henderson (Figura 12) tienden a obedecer isothermas del tipo III al igual que las isothermas de Smith (Figura 13) (GM-SL y SL) y las isothermas ajustadas con el modelo de Oswin (Figura 14).

Como se puede observar en los distintos modelos, ninguno se ajusta en todo el intervalo de actividad de agua y esto se vuelve más complejo para cada uno de los alimentos, pues como indica Singh et al. (2006), las diferentes propiedades de los alimentos obedecen diferentes mecanismos.

Tabla 6. Parámetros de modelos empíricos para las isotermas de adsorción de las microcápsulas de nuez

Material	Temperatura (°C)	Parámetros														
		Henderson					Smith					Oswin				
		A	B	r <sup>2</sup>	σ <sup>2</sup>	E	A	B	r <sup>2</sup>	σ <sup>2</sup>	E	A	B	r <sup>2</sup>	σ <sup>2</sup>	E
GM	25	0.046	1.169	0.979	1.446	11.266	1.931	-27.287	0.985	0.350	6.128	9.887	0.543	0.995	0.917	5.672
	35	0.046	1.190	0.973	1.469	12.037	1.833	-25.968	0.977	0.521	6.137	9.414	0.554	0.990	1.086	5.955
	40	0.060	1.082	0.973	1.386	15.345	1.227	-27.920	0.975	0.535	10.269	9.218	0.621	0.990	1.139	9.062
GM-SL	25	0.064	1.075	0.977	1.501	13.936	1.256	-26.757	0.979	0.366	8.926	8.906	0.583	0.994	1.229	6.528
	35	0.052	1.189	0.972	1.258	12.125	1.612	-23.438	0.974	0.560	6.664	8.466	0.554	0.987	1.018	6.207
	40	0.106	0.913	0.985	0.718	15.340	0.041	-27.266	0.977	0.200	12.605	7.594	0.718	0.996	1.001	7.817
SL	25	0.102	0.946	0.990	0.613	11.355	-0.044	-26.195	0.986	0.207	9.356	7.377	0.650	0.997	0.800	4.536
	35	0.104	0.975	0.986	0.580	10.657	0.160	-23.293	0.982	0.203	7.391	6.760	0.657	0.995	0.678	3.668
	40	0.161	0.780	0.995	0.236	12.993	-1.089	-27.491	0.980	0.072	19.849	6.345	0.824	0.998	0.902	3.824

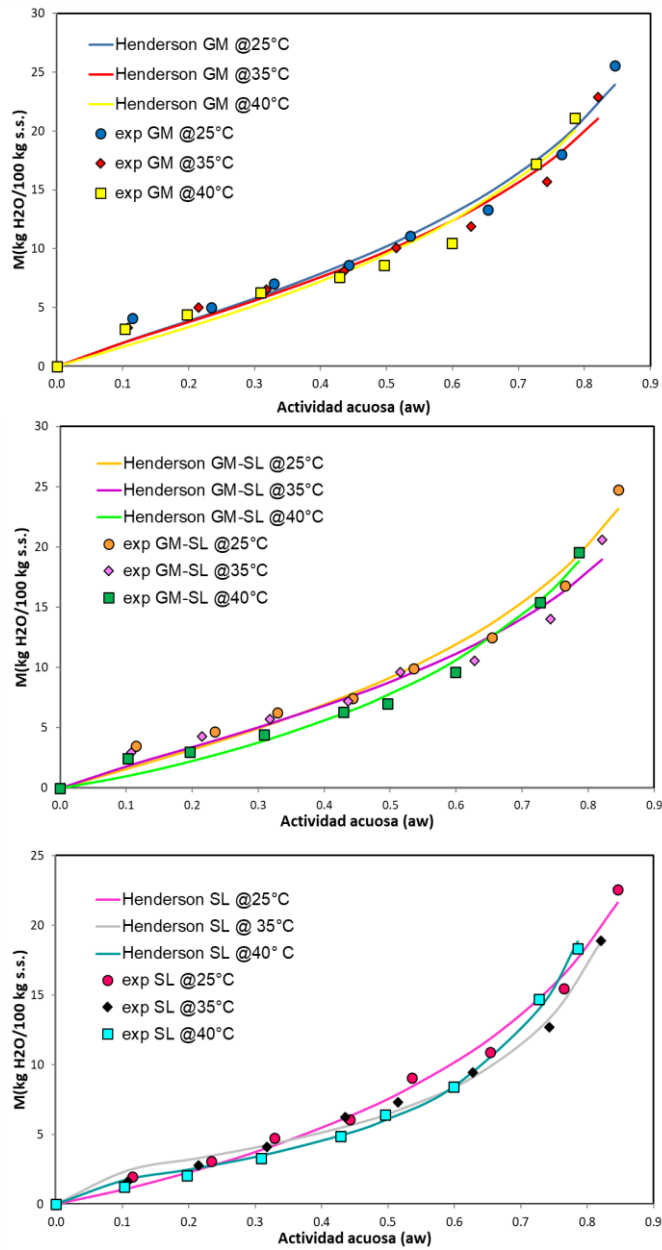


Figura 12. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Henderson para microcápsulas de saborizante de nuez

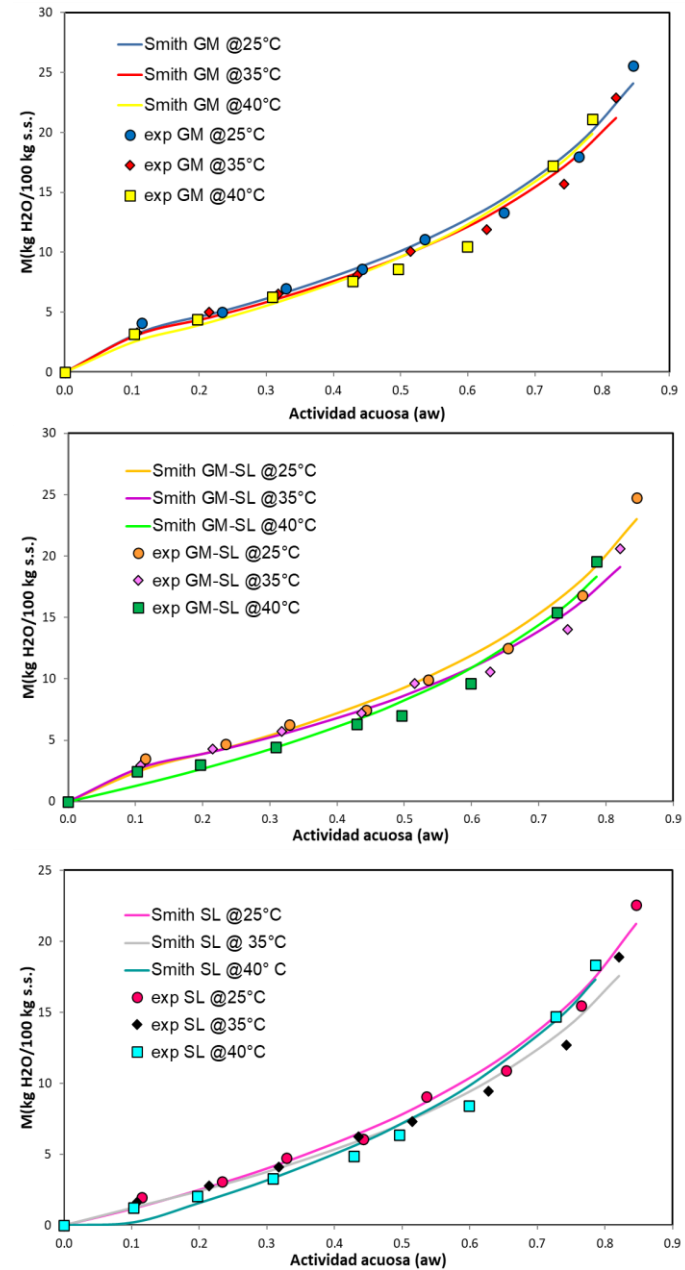


Figura 13. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Smith para microcápsulas de saborizante nuez

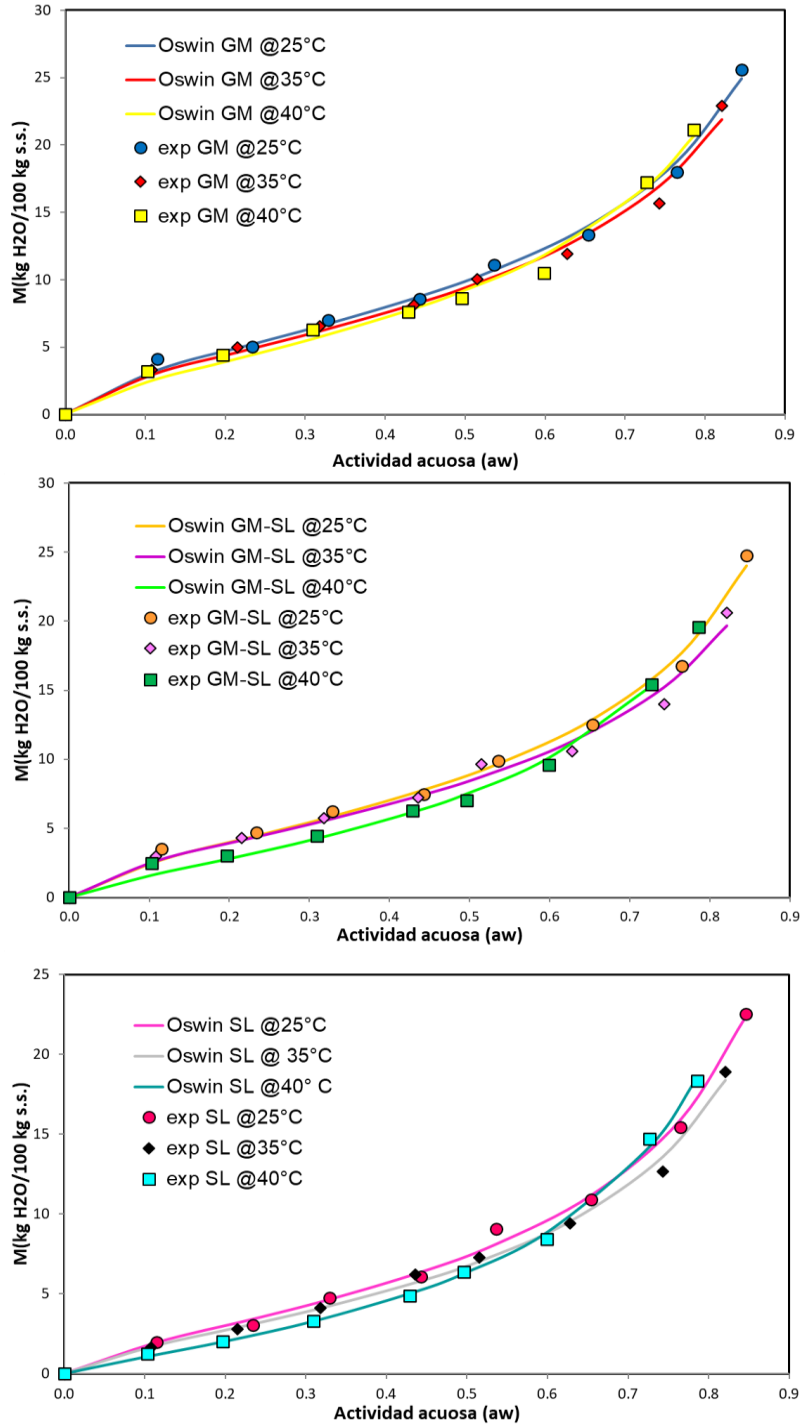


Figura 14. Isotermas de adsorción experimentales y ajuste al modelo de Oswin para microcápsulas de saborizante de nuez



## 7. Conclusiones

- Las isothermas de adsorción construidas a partir de los datos experimentales presentan una forma sigmoideal del tipo II para la goma de mezquite y la mezcla de goma de mezquite con proteína de suero de leche en el intervalo de temperatura estudiado.
- Las isothermas de adsorción construidas a partir de los datos experimentales para la proteína de suero de leche como material de pared tiene tendencia a presentarse como una isoterma del tipo III en el intervalo de temperatura estudiado.
- El modelo teórico de G.A.B. junto con el modelo semi empírico de Peleg presentaron los ajustes matemáticos por regresión no lineal más robustos en comparación con los otros siete modelos analizados. Además, los tres parámetros del modelo de GAB poseen un significado físico en el proceso de adsorción en comparación de los cuatro parámetros del modelo de Peleg que no poseen ningún significado físico.
- Las condiciones de estabilidad de las microcápsulas de saborizante de nuez se establecen con base en el valor del contenido de humedad en la monocapa ( $M_0$ ) descrito por el modelo de G.A.B., que para las microcápsulas con goma de mezquite como material de pared en el intervalo de temperatura estudiado se encuentra entre 4.687 y 5.52 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s., los valores para la mezcla de goma de mezquite con proteína de suero de leche como material de pared se encuentra entre 4.148 y 4.846 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s., y por último, los valores para la proteína de suero de leche como material de pared se encuentran entre 4.156 y 5.068 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.

## 8. Referencias

- Abramovic, H., & Klofutar, C. (2006). Water adsorption isotherms of some gellan gum samples. *Journal of Food Engineering*, 514-520.
- Alpizar, E., & Villavicencio, F. (2013). Efecto de la actividad de agua y temperatura de transición vítrea en la estabilidad de microcápsulas de jugo de betabel (*Beta vulgaris* L.). (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Autónoma del Estado de México.
- Andrade, R., Lemus, R., & Pérez, C. (2011). Models of sorption isotherms for food: uses and limitations. *Vitae, revista de la facultad de química farmacéutica*, 18(3), 325-334.
- Andrade, R., Lemus, R., & Perez, C. (2011). Models of sorption isotherms for food: Uses and limitations. *Vitae*, 18(3), 325-334.
- Beristain, C. I., Garcia, H. S., & Ebner, A. (1996). Enthalpy-Entropy Compensation in Food Vapor Adsorption. *Journal of Food Engineering*, 30(3-4), 405-415.  
doi:doi:10.1016/s0260-8774(96)00011-8
- Brendan, K. T. (2016). Identification and exploration of the components of a desirable pecan flavor. (*Master Thesis*). Miami University-Oxford, Manhattan.
- Bringas-Lantigua, M., & Pino, J. A. (2012). Microencapsulación de saborizantes mediante secado por atomización. (J. S. Ramírez-Navas, Ed.) *Revisiones de la Ciencia, Tecnología e Ingeniería de los Alimentos*, 11(2), 36-68. Obtenido de [https://books.google.com.mx/books?id=E7x7K4A00OoC&lpg=PA34&ots=TYHCmrzjOf&dq=Bringas-Lantigua%2C%20M.%2C%20%26%20Pino%2C%20J.%20A.%20\(2012\).%20Microencapsulaci%C3%B3n%20de%20saborizantes%20mediante%20secado%20por%20atomizaci%C3%B3n.%20La%20Habana%3A%20ReC](https://books.google.com.mx/books?id=E7x7K4A00OoC&lpg=PA34&ots=TYHCmrzjOf&dq=Bringas-Lantigua%2C%20M.%2C%20%26%20Pino%2C%20J.%20A.%20(2012).%20Microencapsulaci%C3%B3n%20de%20saborizantes%20mediante%20secado%20por%20atomizaci%C3%B3n.%20La%20Habana%3A%20ReC)

- Burnside, E. (2014). Hydrocolloids and Gums as Encapsulating Agents. En A. G. Gaonkar, N. Vasisht, A. R. Khare, & R. Sobel (Edits.), *Microencapsulation in the Food Industry* (págs. 241-252). Illinois, USA.
- Carrillo-Navas, H., Cruz-Olivares, J., Barrera-Pichardo, J. F., & Pérez-Alonso, C. (2010). Estabilidad térmica oxidativa de microcápsulas de saborizante de nuez. (S. M. Materiales, Ed.) *Superficies y Vacío*, 23(1), 21-26.
- Carvalho, C., & Pelayo, C. (2015). Thermodynamic analysis of sorption isotherms of dehydrated yacon (*Smallanthus sonchifolius*). *Food Bioscience*, 15, 1-34.
- Cassini, A., Marczak, L., & Noreña, C. (2006). Water adsorption isotherms of texturized soy protein. *Journal of Food Engineering*, 77, 194-199.
- Caurie, M. (1970). A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods. *International Journal of Food Science & Technology*, 5(3), 301-307.
- Chirife, J., & Iglesias, H. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1 - review. *Journal of Food Technology*, 13, 159-174.
- Choque-Quispe, D., Ligarda-Samanez, C. A., Ramos-Pacheco, B. S., Taipe-Pardo, F., Peralta-Guevara, D. E., & Solano Reynoso, A. M. (2018). Evaluación de las isotermas de sorción de granos y harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Revista Ion*, 31(2), 67-81.
- Contreras, I. (2019). Estudio del fenómeno de adsorción del mucílago liofilizado de la semilla de chía. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Autónoma del Estado de México.
- Desai, K. G., & Park, H. J. (2005). Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Drying Technology: An International Journal*, 23(7), 1361-1394. doi:10.1081/drt-200063478

- Dima, C., Assadpour, E., Dima, S., & Jafari, S. M. (2020). Bioavailability of nutraceuticals: Role of the food matrix, processing conditions, the gastrointestinal tract, and nanodelivery systems. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 1-41.
- Drew, K. (1994). Consumer perceptions of natural foods. En J. R. Piggott, & A. Paterson (Edits.), *Understanding natural favors* (Primera ed., págs. 164-177). Glasgow: Springer Science-Business Media.
- Drozińska, E., Kanclerz, A., & Kurek, M. A. (2019). Microencapsulation of sea buckthorn oil with  $\beta$ -glucan from barley as coating material. *International Journal of Biological Macromolecules*, 131, 1014-1020.
- Duman, F., & Kaya, M. (2016). Crayfish chitosan for microencapsulation of coriander (*Coriandrum sativum* L.) essential oil. *International Journal of Biological Macromolecule*, 92, 125-133.
- Errecart, V. (2015). *Agregados de Valor en el Negocio de la Nuez de Nogal: caso de Francia y Estados Unidos*. Recuperado el 2021 de Agosto de 09, de Biblioteca "Dr. Manuel Belgrano": <http://biblioteca.cfi.org.ar/wp-content/uploads/2015/05/marcketing-estrategico.pdf>
- Fadini, A. L., Alvim, I. D., Ribeiro, P. I., Ruzene, L. G., Bataglia da Silva, L., Queiroz, M. B., . . . Ferreira, R. A. (2018). Innovative strategy based on combined microencapsulation technologies for food application and the influence of wall material composition. *LWT - Food Science and Technology*, 91, 345–352.
- Gibbs, B. F., Kermasha, S., Alli, I., & Mulligan, C. N. (1999). Encapsulation in the foos industry: A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*(50), 213-224.
- Goneli , A. L., Corrêa, P. C., Oliveira, G. H., & Afonso, P. C. (2013). Water sorption properties of coffee fruits, pulped and green coffee. *Food Science and Technology*, 50, 386-391.

- Goula, A., Karapantsios, T., Achilias, D., & Adamopoulos, K. (2008). Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. *Journal of Food Engineering*, 85(1), 73–83.
- Gutiérrez-Rosales, F. (2010). History and Principles of Flavor Analysis. En Y. H. Hui (Ed.), *Handbook of fruit and vegetable flavors* (Primera ed., págs. 159-176). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Harrington, J., & Schaefer, M. (2014). Extrusion-Based Microencapsulation for the Food Industry. En A. G. Gaonkar, N. Vasisht, A. R. Khare, & R. Sobel (Edits.), *Microencapsulation in the Food Industry* (págs. 81-84). Minnesota.
- Hitzky-Ruiz, E. (1993). Fenómenos de Superficie. En J. M. Albella, A. M. Cintas, T. Miranda, & J. M. Serratos (Edits.), *Introducción a la ciencia de materiales* (págs. 200-232). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- IOFI. (Abril de 2020). *International Organization of the Flavor Industry*. Recuperado el 04 de Agosto de 2021, de <https://cdn2.assets-servd.host/erratic-warthog/production/Documents/iofi-code-of-practice-5th-revision.pdf>
- Jacobs, I. C. (2014). Atomization and Spray-Drying Processes. En A. G. Gaonkar, N. Vasisht, A. R. Khare, & R. Sobel (Edits.), *Microencapsulation in the Food Industry* (págs. 47-56). Missouri.
- Jansen, F. H. (2015). Managing flavour changes during storage. En J. K. Parker, J. S. Elmore, & L. Methven (Edits.), *Flavour Development, Analysis and Perception in Food and Beverages* (págs. 249-270). Vlaardingen: Woodhead Publishing Series in Food Science.
- King, A. H. (1995). Encapsulation of food ingredients a review of available technology, focusing on hydrocolloids. En S. J. Risch, & G. A. Reineccius (Edits.), *Encapsulation and Controlled Release of Food Ingredients* (págs. 26-41). Washington: American Chemical Society.

- Labuza, T. P., Kaanane, A., & 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.
- Lang, K., McCune, T., & Steinberg, M. (1981). A proximity equilibration cell for rapid determination of sorption isotherms. *Journal of Food Science*, 46, 936-938.
- Lewicki, P. (1998). A three parameter equation for food moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering*, 21(2), 127-144.
- López-Franco, Y. L., Goycoolea, F. M., Valdez, M. A., & Calderón de la Barca, A. M. (2006). Goma de mezquite: una alternativa de uso industrial. *Interciencia*, 31(3), 183-189.
- Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., & Desobry, S. (2006). Flavour encapsulation and controlled release – a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 41(1), 1-21. doi:10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x
- Martinelli, L., Gabas, A. L., & Telis-Romero, J. (2007). Thermodynamic and Quality Properties of Lemon Juice Powder as Affected by Maltodextrin and Arabic Gum. *Drying Technology: An International Journal*, 25(12), 2035-2045.
- McLaughlin, C. P., & Magee, T. R. (1998). The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption of sorption for potatoes. *Journal of Food Engineering*(35), 267-280.
- Meng, Y., & Cloutier, S. (2014). Gelatin and Other Proteins for Microencapsulation. En A. G. Gaonkar, N. Vasisht, A. R. Khare, & R. Sobel (Edits.), *Microencapsulation in the Food Industry* (págs. 227-239).
- Moraes, M., Rosa, G., & Pinto, L. A. (2008). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of apple Fuji and garlic. *International Journal of Food Science and Technology*, 43(10), 1824-1831.

- Mulet, A., García-Pascual, P., Sanjuán, N., & García-Reverter, J. (2002). Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). *Journal of Food Engineering*, 53(1), 75-81.
- Núñez, A. (2011). *La cadena de producción en el cultivo del nogal pecanero en México y Estados Unidos*. (C. M. A.C, Ed.) Recuperado el 09 de Agosto de 2021, de Nacion Multicultural, Empresas Indígenas y Populares:  
<https://www.nacionmulticultural.unam.mx/empresasindigenas/docs/1835.pdf>
- OEC. (2019). *Goma Arábica en México*. (Connections, MIT Media Lab Macro) Recuperado el 16 de Agosto de 2021, de The Observatory of Economic Complexity: <https://oec.world/es/profile/bilateral-product/gum-arabic/reporter/mex>
- Ojeda-Barrios, D. L., Hernández-Rodríguez, O. A., López-Ochoa, G. R., & Martínez-Téllez, J. J. (2009). Evolución de los sistemas de producción de nuez en México. *Tecnociencia Chihuahua*, 3(3), 115-120.
- Oxley, J. (2014). Overview of Microencapsulation Process Technologies. En A. G. Gaonkar, N. Vasisht, A. R. Khare, & R. Sobel (Edits.), *Microencapsulation in the Food Industry* (págs. 35-46). Texas.
- Pahlevanzadeh, H., & Yazdani, M. (2005). Moisture adsorption isotherms and isosteric energy. *Journal of Food Process Engineering*, 28(4), 331-345.
- Pascual-Pineda, L. A., Alamilla-Beltrán, L., Gutiérrez-López, G. F., Azuara, E., & Flores-Andrade, E. (2017). Predicción de condiciones de almacenamiento de alimentos deshidratados a partir de una isoterma de adsorción de vapor de agua. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(1), 207-220.
- Pérez-Alonso, C., Báez-González, J. G., Beristain, C. I., Vernon-Carter, E. J., & Vizcarra-Mendoza, M. G. (2003). Estimation of the activation energy of carbohydrate polymers blends as selection criteria for their use as wall material for spray-dried microcapsules. *Carbohydrate Polymers*, 53(2), 197-203. doi:10.1016/s0144-8617(03)00052-3

- Pérez-Alonso, C., Beristain, C., Lobato-Calleros, C., Rodríguez-Huezo, M., & Vernon-Carter, E. (2006). Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 753-760.
- Poshadri, A., & Aparna, K. (2010). Microencapsulation Technology: A review. *Journal of Research Angraui*, 38(1), 86-102.
- Ramírez-Miranda, M., Cruz y Victoria, M. T., Vizcarra-Mendoza, M. G., & Anaya-Sosa, I. (2014). Determinación de las isotemas de sorción y las propiedades termodinámicas de harina de maíz nixtamalizada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(1), 165-178.
- Reineccius, G. (2007). Controlled release of flavour in food products. En A. Taylor, & J. Hort (Edits.), *Modifying flavour in food* (págs. 171-184). Cambridge, England: Woodhead Publishing.
- Rivas Reyes, C. (2010). Microencapsulación y estabilización enzimática del jugo de chirimoya (*Annona cherimola* Mill). (*Tesis de Maestría*). Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional.
- Sapailla, R. (2020). Estimación de las isoterms de adsorción y caracterización de la sangre de pollo (*Gallus domesticus*) deshidratada. *Tesis de Licenciatura*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.
- Shahidi, F., & Han, X. Q. (2009). Encapsulation of Food ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 33 (6), 501-547. doi:10.1080/10408399309527645
- Shimizu, S., & Matubayasi, N. (2021). Sorption: A Statistical Thermodynamic Fluctuation Theory. *ACS Publications*, 37(24), 7380-7391.
- Singh, R. B., Rao, K. H., Anjaneyulu, A. R., & Patil, G. R. (2006). Water desorption characteristics of raw goat meat: Effect of temperature. *Journal of Food Engineering*, 75, 228-236.



- Singh, R. B., Rao, K. H., Anjaneyulu, A. S., & Patil, G. R. (2001). Moisture sorption properties of smoked chicken sausage from spent hen meat. *Food Research International*, 34, 143-148.
- Stavros, Y., & Blahovec, J. (2009). Model analysis of sorption isotherms. *Food Science and Technology*, 42, 1688-1695.
- Toublan, F. J.-J. (2014). Fats and Waxes in Microencapsulation of Food Ingredients. En A. G. Gaonkar, N. Vasisht, A. R. Khare, & R. Sobel (Edits.), *Microencapsulation in the Food Industry* (págs. 253-266).
- Vasisht, N. (2014). Selection of Materials for Microencapsulation. En A. G. Gaonkar, N. Vasisht, A. R. Khare, & R. Sobel (Edits.), *Microencapsulation in the Food Industry* (págs. 173-180).
- Vernon-Carter, E. J., Gomez, S. A., Beristain, C. I., Pedroza-Islas, R., & Moreno-Terrazas, R. C. (1996). Color degradation and coalescence kinetics of Aztec marigold oleoresin-in-water emulsions stabilized by mesquite or arabic gums and their blends. *Journal of Texture Studies*, 27, 625-641.
- Viades, J. (2013). *Fenómenos de superficie de adsorción*. Obtenido de [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3.Fenomenosuperficiales.Adsorcion\\_23226.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3.Fenomenosuperficiales.Adsorcion_23226.pdf)
- Wallick, D. (2014). Cellulose Polymers in Microencapsulation of Food Additives. En A. G. Gaonkar, N. Vasisht, A. R. Khare, & R. Sobel (Edits.), *Microencapsulation in the Food Industry* (págs. 181-193).
- Wright, J. (2010). Creating and formulating flavours. En A. J. Taylor, & R. S. Linforth (Edits.), *Food Flavour Technology* (Second ed., págs. 1-23). United Kingdom: John Wiley & Sons.

- Yan, C., & Zhang, W. (2014). Coacervation Processes. En A. G. Gaonkar, N. Vasisht, A. R. Khare, & R. Sobel (Edits.), *Microencapsulation in the Food Industry* (págs. 125-137). New York.
- Zhang, K., Zhang, H., Hu, X., Bao, S., & Huang, H. (2012). Synthesis and release studies of microalgal oil-containing microcapsules. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 89, 61-66.
- Zuidam, N. J., & Shimoni, E. (2010). Overview of Microencapsulates for Use in Food Products or Processes and Methods to Make Them. En N. J. Zuidam, & V. A. Nedović (Edits.), *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing* (págs. 3-29). Spriger.

## 9. Anexos

### 9.1 Anexo I: datos experimentales ajustados con los modelos matemáticos para microcápsulas de saborizante de nuez con los tres materiales de pared a tres temperaturas 25°C, 35°C y 40°C.

*Tabla 7. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 25°C*

GM	25°C	Modelo								
		BET			GAB			Caurie		
M	aw	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.119	0.115	4.324	-0.205	4.973	3.924	0.195	4.726	3.585	0.534	12.955
5.015	0.234	5.205	-0.190	3.796	5.654	-0.639	12.744	4.889	0.126	2.516
7.008	0.329	6.013	0.995	14.200	6.877	0.131	1.876	6.262	0.746	10.645
8.594	0.443	7.298	1.296	15.076	8.542	0.052	0.600	8.428	0.166	1.932
11.107	0.536	8.795	2.312	20.820	10.285	0.822	7.404	10.739	0.368	3.313
13.321	0.654	11.833	1.488	11.174	13.473	-0.152	1.144	14.605	-1.284	9.639
17.997	0.765	17.459	0.538	2.988	18.572	-0.575	3.194	19.504	-1.507	8.371
25.564	0.846	26.675	-1.111	4.346	25.336	0.228	0.892	24.087	1.477	5.779
			E:	9.672		E:	4.072		E:	6.894

*Tabla 8. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 35°C*

GM	35°C	Modelo								
		BET			GAB			Caurie		
M	aw	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.309	0.108	4.095	-0.786	23.740	3.584	-0.275	8.304	3.389	-0.080	2.416
4.997	0.215	5.037	-0.040	0.791	5.075	-0.078	1.566	4.467	0.530	10.612
6.548	0.318	5.958	0.590	9.012	6.313	0.235	3.595	5.827	0.721	11.014
8.106	0.436	7.319	0.787	9.708	7.924	0.182	2.251	7.901	0.205	2.528
10.057	0.515	8.568	1.489	14.810	9.290	0.767	7.627	9.688	0.369	3.670
11.902	0.628	11.244	0.658	5.529	12.018	-0.116	0.974	12.968	-1.066	8.958
15.682	0.743	16.352	-0.670	4.270	16.710	-1.028	6.556	17.449	-1.767	11.268
22.894	0.821	23.534	-0.640	2.797	22.453	0.441	1.925	21.340	1.554	6.788
			E:	8.832		E:	4.100		E:	7.157

Tabla 9. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 40°C

GM	40°C	Modelo								
		BET			GAB			Caurie		
M	aw	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.205	0.103	3.277	-0.072	2.238	3.254	-0.049	1.535	2.965	0.240	7.490
4.408	0.197	4.552	-0.144	3.257	4.546	-0.138	3.120	3.867	0.541	12.283
6.274	0.309	5.856	0.418	6.669	5.864	0.410	6.535	5.305	0.969	15.438
7.588	0.429	7.480	0.108	1.421	7.500	0.088	1.165	7.446	0.142	1.872
8.617	0.496	8.642	-0.025	0.287	8.666	-0.049	0.564	8.997	-0.380	4.413
10.487	0.599	11.102	-0.615	5.869	11.129	-0.642	6.124	12.035	-1.548	14.765
17.208	0.727	16.621	0.587	3.412	16.628	0.580	3.369	17.277	-0.069	0.404
21.109	0.786	21.347	-0.238	1.128	21.313	-0.204	0.968	20.411	0.698	3.309
			E:	3.035		E:	2.922		E:	7.497

Tabla 10. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 25°C

GM-SL	25°C	Modelo								
		BET			GAB			Caurie		
M	aw	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.512	0.115	4.091	-0.579	16.498	3.457	0.055	1.556	2.978	0.534	15.195
4.695	0.234	4.981	-0.286	6.087	5.004	-0.309	6.577	4.160	0.535	11.387
6.248	0.329	5.772	0.476	7.611	6.112	0.136	2.178	5.433	0.815	13.049
7.444	0.443	7.022	0.422	5.674	7.644	-0.200	2.689	7.483	-0.039	0.523
9.897	0.536	8.470	1.427	14.416	9.273	0.624	6.301	9.717	0.180	1.823
12.503	0.654	11.407	1.096	8.766	12.327	0.176	1.411	13.535	-1.032	8.252
16.778	0.765	16.842	-0.064	0.381	17.406	-0.628	3.744	18.486	-1.708	10.181
24.753	0.846	25.741	-0.988	3.991	24.548	0.205	0.828	23.209	1.544	6.238
			E:	7.928		E:	3.160		E:	8.331

Tabla 11. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 35°C

GM-SL 35°C		Modelo									
M	aw	BET			GAB			Caurie			
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.971	0.108	3.628	-0.657	22.103	3.121	-0.150	5.052	3.050	-0.079	2.664	
4.289	0.215	4.499	-0.210	4.907	4.515	-0.226	5.262	4.020	0.269	6.280	
5.727	0.318	5.339	0.388	6.779	5.666	0.061	1.058	5.243	0.484	8.452	
7.218	0.436	6.570	0.648	8.974	7.148	0.070	0.964	7.108	0.110	1.520	
9.641	0.515	7.697	1.944	20.165	8.394	1.247	12.932	8.715	0.926	9.605	
10.573	0.628	10.109	0.464	4.387	10.862	-0.289	2.730	11.664	-1.091	10.321	
13.998	0.743	14.709	-0.711	5.082	15.061	-1.063	7.595	15.692	-1.694	12.103	
20.601	0.821	21.177	-0.576	2.794	20.138	0.463	2.248	19.190	1.411	6.851	
				<b>E:</b> 9.399					<b>E:</b> 4.730		
									<b>E:</b> 7.225		

Tabla 12. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared como material de pared a 40°C

GM-SL 40°C		Modelo									
M	aw	BET			GAB			Caurie			
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.455	0.103	1.925	0.530	21.593	2.052	0.403	16.396	2.051	0.404	16.461	
3.008	0.197	3.176	-0.168	5.577	3.266	-0.258	8.586	2.787	0.221	7.350	
4.453	0.309	4.553	-0.100	2.243	4.573	-0.120	2.698	4.016	0.437	9.811	
6.289	0.429	6.225	0.064	1.010	6.170	0.119	1.894	5.941	0.348	5.540	
7.022	0.496	7.387	-0.365	5.196	7.293	-0.271	3.856	7.392	-0.370	5.268	
9.602	0.599	9.795	-0.193	2.006	9.658	-0.056	0.579	10.344	-0.742	7.728	
15.407	0.727	15.090	0.317	2.056	15.018	0.389	2.528	15.705	-0.298	1.936	
19.555	0.786	19.587	-0.032	0.164	19.733	-0.178	0.908	19.039	0.516	2.639	
				<b>E:</b> 4.980					<b>E:</b> 4.681		
									<b>E:</b> 7.092		

Tabla 13. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con proteína de suero de leche como material de pared a 25°C

SL	25°C	Modelo								
M	aw	BET			GAB			Caurie		
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.979	0.115	2.513	-0.534	26.959	1.899	0.080	4.039	2.123	-0.144	7.266
3.056	0.234	3.751	-0.695	22.741	3.465	-0.409	13.396	3.097	-0.041	1.336
4.748	0.329	4.662	0.086	1.809	4.693	0.055	1.167	4.187	0.561	11.826
6.081	0.443	5.951	0.130	2.136	6.354	-0.273	4.485	6.011	0.070	1.145
9.07	0.536	7.364	1.706	18.812	8.050	1.020	11.250	8.075	0.995	10.968
10.909	0.654	10.143	0.766	7.018	11.092	-0.183	1.679	11.743	-0.834	7.647
15.451	0.765	15.207	0.244	1.581	15.917	-0.466	3.013	16.702	-1.251	8.098
22.539	0.846	23.446	-0.907	4.025	22.362	0.177	0.787	21.598	0.941	4.175
			<i>E:</i>	10.635		<i>E:</i>	4.977		<i>E:</i>	6.558

Tabla 14. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con proteína de suero de leche como material de pared a 35°C

SL	35°C	Modelo								
M	aw	BET			GAB			Caurie		
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.6421	0.108	2.089	-0.447	27.241	1.792	-0.150	9.124	1.985	-0.342	20.852
2.782	0.215	3.214	-0.432	15.535	3.069	-0.287	10.299	2.761	0.021	0.756
4.096	0.318	4.183	-0.087	2.136	4.216	-0.120	2.938	3.794	0.302	7.370
6.221	0.436	5.462	0.759	12.195	5.689	0.532	8.556	5.461	0.760	12.218
7.292	0.515	6.569	0.723	9.919	6.910	0.382	5.238	6.969	0.323	4.434
9.422	0.628	8.864	0.558	5.919	9.315	0.107	1.135	9.876	-0.454	4.823
12.675	0.743	13.156	-0.481	3.796	13.450	-0.775	6.116	14.084	-1.409	11.118
18.889	0.821	19.141	-0.252	1.333	18.598	0.291	1.543	17.917	0.972	5.144
			<i>E:</i>	9.759		<i>E:</i>	8.926		<i>E:</i>	8.339

Tabla 15. Datos experimentales ajustados con modelos teóricos para microcápsulas de saborizante de nuez con proteína de suero de leche como material de pared a 40°C

SL		Modelo									
40°C		BET			GAB			Caurie			
M	aw	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.235	0.103	1.086	0.149	12.031	0.991	0.244	19.742	1.396	-0.161	13.025	
2.041	0.197	2.075	-0.034	1.675	1.959	0.082	3.995	1.988	0.053	2.574	
3.297	0.309	3.359	-0.062	1.866	3.274	0.023	0.712	3.031	0.266	8.061	
4.887	0.429	5.038	-0.151	3.083	5.032	-0.145	2.968	4.762	0.125	2.555	
6.385	0.496	6.226	0.159	2.491	6.279	0.106	1.667	6.128	0.257	4.021	
8.42	0.599	8.695	-0.275	3.266	8.838	-0.418	4.963	9.031	-0.611	7.254	
14.703	0.727	14.101	0.602	4.096	14.223	0.480	3.262	14.621	0.082	0.555	
18.338	0.786	18.671	-0.333	1.815	18.529	-0.191	1.044	18.258	0.080	0.439	
				<b>E:</b> 3.790					<b>E:</b> 4.794		

Tabla 16. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 25°C

GM		Modelo									
25°C		Lewicki (dos parámetros)			Peleg			Halsey			
M	aw	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.119	0.115	3.268	0.851	20.672	3.366	0.753	18.278	4.327	-0.208	5.043	
5.015	0.234	5.195	-0.180	3.599	5.625	-0.610	12.160	5.701	-0.686	13.680	
7.008	0.329	6.716	0.292	4.166	7.200	-0.192	2.740	6.861	0.147	2.097	
8.594	0.443	8.731	-0.137	1.600	8.979	-0.385	4.474	8.513	0.081	0.940	
11.107	0.536	10.691	0.416	3.742	10.511	0.596	5.367	10.240	0.867	7.802	
13.321	0.654	13.966	-0.645	4.838	13.203	0.118	0.885	13.364	-0.043	0.322	
17.997	0.765	18.756	-0.759	4.219	18.199	-0.202	1.121	18.388	-0.391	2.175	
25.564	0.846	24.914	0.650	2.543	25.502	0.062	0.242	25.485	0.079	0.308	
				<b>E:</b> 5.672					<b>E:</b> 5.658		

Tabla 17. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 35°C

GM	35°C	Modelo									
		Lewicki (dos parámetros)			Peleg			Halsey			
M	aw	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.309	0.108	2.923	0.386	11.667	2.994	0.315	9.533	3.865	-0.556	16.796	
4.997	0.215	4.594	0.403	8.063	5.022	-0.025	0.508	5.056	-0.059	1.179	
6.548	0.318	6.169	0.379	5.790	6.740	-0.192	2.937	6.258	0.290	4.427	
8.106	0.436	8.163	-0.057	0.700	8.553	-0.447	5.509	7.907	0.199	2.455	
10.057	0.515	9.732	0.325	3.231	9.736	0.321	3.193	9.302	0.755	7.504	
11.902	0.628	12.582	-0.680	5.712	11.711	0.191	1.602	12.038	-0.136	1.142	
15.682	0.743	16.950	-1.268	8.085	15.780	-0.098	0.624	16.671	-0.989	6.304	
22.894	0.821	21.888	1.006	4.396	22.873	0.021	0.092	22.442	0.452	1.976	
				<b>E:</b> 5.955					<b>E:</b> 3.000		

Tabla 18. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 40°C

GM	40°C	Modelo									
		Lewicki (dos parámetros)			Peleg			Halsey			
M	aw	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.205	0.103	2.405	0.800	24.974	3.199	0.006	0.189	3.296	-0.091	2.838	
4.408	0.197	3.853	0.555	12.601	4.621	-0.213	4.836	4.353	0.055	1.245	
6.274	0.309	5.593	0.681	10.858	6.006	0.268	4.270	5.695	0.579	9.225	
7.588	0.429	7.719	-0.131	1.721	7.501	0.087	1.145	7.471	0.117	1.544	
8.617	0.496	9.127	-0.510	5.918	8.551	0.066	0.766	8.730	-0.113	1.316	
10.487	0.599	11.826	-1.339	12.771	10.960	-0.473	4.507	11.319	-0.832	7.931	
17.208	0.727	16.933	0.275	1.596	16.769	0.439	2.550	16.770	0.438	2.547	
21.109	0.786	20.675	0.434	2.057	21.299	-0.190	0.898	21.159	-0.050	0.237	
				<b>E:</b> 9.062					<b>E:</b> 2.395		



Tabla 19. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 25°C

GM-SL 25°C		Modelo									
M	aw	Lewicki (dos parámetros)			Peleg			Halsey			
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.512	0.115	2.711	0.801	22.804	2.963	0.549	15.627	3.702	-0.190	5.421	
4.695	0.234	4.462	0.233	4.966	4.987	-0.292	6.213	4.970	-0.275	5.854	
6.248	0.329	5.879	0.369	5.911	6.406	-0.158	2.530	6.056	0.192	3.071	
7.444	0.443	7.793	-0.349	4.692	8.024	-0.580	7.787	7.624	-0.180	2.424	
9.897	0.536	9.687	0.210	2.121	9.452	0.445	4.496	9.286	0.611	6.173	
12.503	0.654	12.907	-0.404	3.234	12.080	0.423	3.381	12.338	0.165	1.322	
16.778	0.765	17.719	-0.941	5.608	17.151	-0.373	2.225	17.345	-0.567	3.381	
24.753	0.846	24.038	0.715	2.890	24.648	0.105	0.423	24.574	0.179	0.725	
				<b>E:</b> 6.528					<b>E:</b> 5.335		

Tabla 20. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 35°C

GM-SL 35°C		Modelo									
M	aw	Lewicki (dos parámetros)			Peleg			Halsey			
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.971	0.108	2.628	0.343	11.545	2.512	0.459	15.440	3.475	-0.504	16.952	
4.289	0.215	4.131	0.158	3.686	4.388	-0.099	2.313	4.546	-0.257	5.985	
5.727	0.318	5.547	0.180	3.138	6.025	-0.298	5.212	5.627	0.100	1.752	
7.218	0.436	7.341	-0.123	1.699	7.782	-0.564	7.818	7.109	0.109	1.504	
9.641	0.515	8.752	0.889	9.219	8.919	0.722	7.484	8.364	1.277	13.244	
10.573	0.628	11.316	-0.743	7.024	10.670	-0.097	0.919	10.824	-0.251	2.375	
13.998	0.743	15.245	-1.247	8.910	13.993	0.005	0.037	14.990	-0.992	7.088	
20.601	0.821	19.687	0.914	4.435	20.601	0.000	0.000	20.180	0.421	2.043	
				<b>E:</b> 6.207					<b>E:</b> 4.903		

Tabla 21. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 40°C

GM-SL 40°C		Modelo									
M	aw	Lewicki (dos parámetros)			Peleg			Halsey			
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.455	0.103	1.605	0.850	34.604	2.203	0.252	10.246	2.382	0.073	2.984	
3.008	0.197	2.769	0.239	7.947	3.334	-0.326	10.823	3.267	-0.259	8.625	
4.453	0.309	4.261	0.192	4.313	4.524	-0.071	1.600	4.435	0.018	0.413	
6.289	0.429	6.184	0.105	1.665	5.988	0.301	4.788	6.037	0.252	4.011	
7.022	0.496	7.507	-0.485	6.904	7.101	-0.079	1.130	7.206	-0.184	2.622	
9.602	0.599	10.129	-0.527	5.489	9.663	-0.061	0.637	9.680	-0.078	0.808	
15.407	0.727	15.341	0.066	0.431	15.403	0.004	0.024	15.132	0.275	1.786	
19.555	0.786	19.324	0.231	1.182	19.547	0.008	0.039	19.708	-0.153	0.783	
				<b>E:</b> 7.817					<b>E:</b> 3.661		
									<b>E:</b> 2.754		

Tabla 22. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con proteína de suero de leche como material de pared a 25°C

SL 25°C		Modelo									
M	aw	Lewicki (dos parámetros)			Peleg			Halsey			
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.979	0.115	1.957	0.022	1.132	1.444	0.535	27.017	2.814	-0.835	42.217	
3.056	0.234	3.411	-0.355	11.632	3.245	-0.189	6.171	3.896	-0.840	27.487	
4.748	0.329	4.641	0.107	2.260	4.784	-0.036	0.758	4.847	-0.099	2.078	
6.081	0.443	6.356	-0.275	4.529	6.723	-0.642	10.555	6.250	-0.169	2.786	
9.07	0.536	8.103	0.967	10.664	8.410	0.660	7.272	7.771	1.299	14.321	
10.909	0.654	11.161	-0.252	2.314	11.026	-0.117	1.074	10.636	0.273	2.503	
15.451	0.765	15.895	-0.444	2.875	15.451	0.000	0.002	15.495	-0.044	0.283	
22.539	0.846	22.339	0.200	0.886	22.536	0.003	0.013	22.766	-0.227	1.006	
				<b>E:</b> 4.536					<b>E:</b> 6.608		
									<b>E:</b> 11.585		

Tabla 23. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con proteína de suero de leche como material de pared a 35°

SL		Modelo									
35°C		Lewicki (dos parámetros)			Peleg			Halsey			
M	aw	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.6421	0.108	1.687	-0.045	2.756	1.333	0.309	18.846	2.415	-0.773	47.088	
2.782	0.215	2.886	-0.104	3.724	2.829	-0.047	1.689	3.304	-0.522	18.768	
4.096	0.318	4.094	0.002	0.053	4.340	-0.244	5.956	4.237	-0.141	3.454	
6.221	0.436	5.708	0.513	8.252	6.130	0.091	1.470	5.566	0.655	10.523	
7.292	0.515	7.032	0.260	3.567	7.364	-0.072	0.992	6.728	0.564	7.734	
9.422	0.628	9.537	-0.115	1.224	9.311	0.111	1.173	9.088	0.334	3.545	
12.675	0.743	13.583	-0.908	7.166	12.704	-0.029	0.227	13.286	-0.611	4.819	
18.889	0.821	18.397	0.492	2.603	18.884	0.005	0.024	18.791	0.098	0.516	
				<b>E:</b> 3.668					<b>E:</b> 3.797		

Tabla 24. Datos experimentales ajustados con modelos semi empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con proteína de suero de leche como material de pared a 40°C

SL		Modelo									
40°C		Lewicki (dos parámetros)			Peleg			Halsey			
M	aw	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.235	0.103	1.066	0.169	13.656	1.165	0.070	5.671	1.720	-0.485	39.301	
2.041	0.197	1.993	0.048	2.334	2.130	-0.089	4.385	2.461	-0.420	20.594	
3.297	0.309	3.269	0.028	0.844	3.321	-0.024	0.718	3.479	-0.182	5.514	
4.887	0.429	5.013	-0.126	2.585	4.902	-0.015	0.304	4.934	-0.047	0.955	
6.385	0.496	6.262	0.123	1.923	6.103	0.282	4.422	6.030	0.355	5.568	
8.42	0.599	8.832	-0.412	4.896	8.775	-0.355	4.220	8.423	-0.003	0.033	
14.703	0.727	14.223	0.480	3.268	14.464	0.239	1.623	13.972	0.731	4.971	
18.338	0.786	18.537	-0.199	1.086	18.435	-0.097	0.531	18.847	-0.509	2.778	
				<b>E:</b> 3.824					<b>E:</b> 2.734		

Tabla 25. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 25°C

GM	25°C	Modelo									
		Henderson			Smith			Oswin			
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.119	0.115	2.321	1.798	43.643	3.378	0.741	17.979	3.268	0.851	20.672	
5.015	0.234	4.525	0.490	9.766	5.090	-0.075	1.491	5.195	-0.180	3.599	
7.008	0.329	6.390	0.618	8.823	6.659	0.349	4.981	6.716	0.292	4.166	
8.594	0.443	8.867	-0.273	3.179	8.866	-0.272	3.160	8.731	-0.137	1.599	
11.107	0.536	11.187	-0.080	0.724	11.031	0.076	0.689	10.691	0.416	3.742	
13.321	0.654	14.756	-1.435	10.775	14.508	-1.187	8.911	13.966	-0.645	4.838	
17.997	0.765	19.251	-1.254	6.967	19.093	-1.096	6.088	18.756	-0.759	4.219	
25.564	0.846	23.966	1.598	6.252	24.101	1.463	5.723	24.914	0.650	2.543	
				<b>E:</b> 11.266					<b>E:</b> 6.128		

Tabla 26. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 35°C

GM	35°C	Modelo									
		Henderson			Smith			Oswin			
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.309	0.108	2.157	1.152	34.824	3.122	0.187	5.652	2.923	0.386	11.667	
4.997	0.215	4.053	0.944	18.898	4.563	0.434	8.684	4.594	0.403	8.063	
6.548	0.318	5.956	0.592	9.041	6.149	0.399	6.089	6.169	0.379	5.790	
8.106	0.436	8.358	-0.252	3.104	8.292	-0.186	2.291	8.163	-0.057	0.700	
10.057	0.515	10.173	-0.116	1.155	9.994	0.063	0.630	9.732	0.325	3.231	
11.902	0.628	13.227	-1.325	11.132	12.985	-1.083	9.100	12.582	-0.680	5.711	
15.682	0.743	17.276	-1.594	10.162	17.156	-1.474	9.397	16.950	-1.268	8.085	
22.894	0.821	21.066	1.828	7.983	21.235	1.659	7.248	21.888	1.006	4.396	
				<b>E:</b> 12.037					<b>E:</b> 6.137		

Tabla 27. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma mezquite como material de pared a 40°C

GM 40°C		Modelo									
M	aw	Henderson			Smith			Oswin			
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.205	0.103	1.730	1.475	46.017	2.545	0.660	20.593	2.405	0.800	24.974	
4.408	0.197	3.311	1.097	24.895	3.887	0.521	11.812	3.853	0.555	12.601	
6.274	0.309	5.360	0.914	14.561	5.709	0.565	9.010	5.593	0.681	10.858	
7.588	0.429	7.874	-0.286	3.766	8.022	-0.434	5.715	7.719	-0.131	1.721	
8.617	0.496	9.481	-0.864	10.032	9.535	-0.918	10.654	9.127	-0.510	5.918	
10.487	0.599	12.371	-1.884	17.967	12.307	-1.820	17.356	11.826	-1.339	12.771	
17.208	0.727	17.113	0.095	0.549	16.969	0.239	1.387	16.933	0.275	1.596	
21.109	0.786	20.059	1.050	4.973	19.922	1.187	5.624	20.675	0.434	2.057	
				<b>E:</b> 15.345					<b>E:</b> 10.269		
									<b>E:</b> 9.062		

Tabla 28. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 25°C

GM-SL 25°C		Modelo									
M	aw	Henderson			Smith			Oswin			
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.512	0.115	1.830	1.682	47.891	2.676	0.836	23.801	2.711	0.801	22.804	
4.695	0.234	3.781	0.914	19.475	4.354	0.341	7.260	4.462	0.233	4.966	
6.248	0.329	5.501	0.747	11.959	5.893	0.355	5.684	5.879	0.369	5.911	
7.444	0.443	7.854	-0.410	5.510	8.057	-0.613	8.230	7.793	-0.349	4.692	
9.897	0.536	10.111	-0.214	2.167	10.180	-0.283	2.855	9.687	0.210	2.121	
12.503	0.654	13.662	-1.159	9.270	13.590	-1.087	8.690	12.907	-0.404	3.234	
16.778	0.765	18.240	-1.462	8.713	18.085	-1.307	7.790	17.719	-0.941	5.608	
24.753	0.846	23.144	1.609	6.501	22.996	1.757	7.097	24.038	0.715	2.890	
				<b>E:</b> 13.936					<b>E:</b> 8.926		
									<b>E:</b> 6.528		

Tabla 29. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 35°C

GM-SL 35°C		Modelo									
M	aw	Henderson			Smith			Oswin			
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.971	0.108	1.939	1.032	34.721	2.775	0.196	6.599	2.628	0.343	11.545	
4.289	0.215	3.645	0.644	15.017	4.076	0.213	4.975	4.131	0.158	3.686	
5.727	0.318	5.357	0.370	6.457	5.507	0.220	3.836	5.547	0.180	3.138	
7.218	0.436	7.518	-0.300	4.155	7.441	-0.223	3.091	7.341	-0.123	1.699	
9.641	0.515	9.151	0.490	5.078	8.977	0.664	6.886	8.752	0.889	9.219	
10.573	0.628	11.899	-1.326	12.542	11.677	-1.104	10.443	11.316	-0.743	7.024	
13.998	0.743	15.542	-1.544	11.032	15.442	-1.444	10.312	15.245	-1.247	8.910	
20.601	0.821	18.954	1.647	7.997	19.123	1.478	7.174	19.687	0.914	4.435	
				<b>E:</b> 12.125					<b>E:</b> 6.664		

Tabla 30. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con una mezcla de goma de mezquite y proteína de suero de leche como material de pared a 40°C

GM-SL 40°C		Modelo									
M	aw	Henderson			Smith			Oswin			
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.455	0.103	1.030	1.425	58.052	1.328	1.127	45.895	1.605	0.850	34.604	
3.008	0.197	2.223	0.785	26.088	2.639	0.369	12.263	2.769	0.239	7.947	
4.453	0.309	3.937	0.516	11.580	4.418	0.035	0.788	4.261	0.192	4.313	
6.289	0.429	6.212	0.077	1.224	6.677	-0.388	6.164	6.184	0.105	1.665	
7.022	0.496	7.743	-0.721	10.274	8.155	-1.133	16.130	7.507	-0.485	6.904	
9.602	0.599	10.616	-1.014	10.559	10.862	-1.260	13.120	10.129	-0.527	5.489	
15.407	0.727	15.599	-0.192	1.244	15.415	-0.008	0.050	15.341	0.066	0.431	
19.555	0.786	18.832	0.723	3.698	18.298	1.257	6.428	19.324	0.231	1.182	
				<b>E:</b> 15.340					<b>E:</b> 12.605		

Tabla 31. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 25°C

SL	25°C	Modelo								
M	aw	Henderson			Smith			Oswin		
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.979	0.115	1.206	0.773	39.071	1.346	0.633	31.998	1.957	0.022	1.132
3.056	0.234	2.752	0.304	9.955	2.989	0.067	2.207	3.411	-0.355	11.632
4.748	0.329	4.215	0.533	11.220	4.495	0.253	5.330	4.641	0.107	2.260
6.081	0.443	6.320	-0.239	3.933	6.613	-0.532	8.752	6.356	-0.275	4.529
9.07	0.536	8.424	0.646	7.126	8.691	0.379	4.174	8.103	0.967	10.664
10.909	0.654	11.862	-0.953	8.732	12.030	-1.121	10.274	11.161	-0.252	2.314
15.451	0.765	16.477	-1.026	6.640	16.431	-0.980	6.341	15.895	-0.444	2.875
22.539	0.846	21.601	0.938	4.160	21.239	1.300	5.769	22.339	0.200	0.886
			<b>E:</b>	11.355		<b>E:</b>	9.356		<b>E:</b>	4.536

Tabla 32. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 25°C

SL	35°C	Modelo								
M	aw	Henderson			Smith			Oswin		
		M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.6421	0.108	1.102	0.540	32.914	1.316	0.326	19.861	1.687	-0.045	2.756
2.782	0.215	2.379	0.403	14.479	2.609	0.173	6.233	2.886	-0.104	3.724
4.096	0.318	3.807	0.289	7.065	4.031	0.065	1.576	4.094	0.002	0.053
6.221	0.436	5.756	0.465	7.473	5.953	0.268	4.304	5.708	0.513	8.252
7.292	0.515	7.317	-0.025	0.344	7.480	-0.188	2.575	7.032	0.260	3.567
9.422	0.628	10.081	-0.659	6.992	10.163	-0.741	7.865	9.537	-0.115	1.224
12.675	0.743	13.966	-1.291	10.182	13.904	-1.229	9.697	13.583	-0.908	7.166
18.889	0.821	17.792	1.097	5.807	17.563	1.326	7.020	18.397	0.492	2.603
			<b>E:</b>	10.657		<b>E:</b>	7.391		<b>E:</b>	3.668

Tabla 33. Datos experimentales ajustados con modelos empíricos para microcápsulas de saborizante de nuez con goma de mezquite como material de pared a 25°C

SL	40°C	Modelo								
		Henderson			Smith			Oswin		
M	aw	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error	M (teórico)	Delta M	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.235	0.103	0.606	0.629	50.948	0.209	1.026	83.104	1.066	0.169	13.656
2.041	0.197	1.490	0.551	26.994	1.530	0.511	25.020	1.993	0.048	2.334
3.297	0.309	2.907	0.390	11.821	3.324	-0.027	0.813	3.269	0.028	0.844
4.887	0.429	4.955	-0.068	1.400	5.601	-0.714	14.614	5.013	-0.126	2.585
6.385	0.496	6.412	-0.027	0.424	7.091	-0.706	11.063	6.262	0.123	1.923
8.42	0.599	9.274	-0.854	10.137	9.821	-1.401	16.637	8.832	-0.412	4.896
14.703	0.727	14.545	0.158	1.077	14.411	0.292	1.984	14.223	0.480	3.268
18.338	0.786	18.129	0.209	1.140	17.318	1.020	5.560	18.537	-0.199	1.086
			<b>E:</b>	12.993		<b>E:</b>	19.849		<b>E:</b>	3.824

**9.2 Anexo II: gráficas de residuales de los datos experimentales ajustados con los modelos matemáticos para microcápsulas de saborizante de nuez con los tres materiales de pared a tres temperaturas 25°C, 35°C y 40°C.**



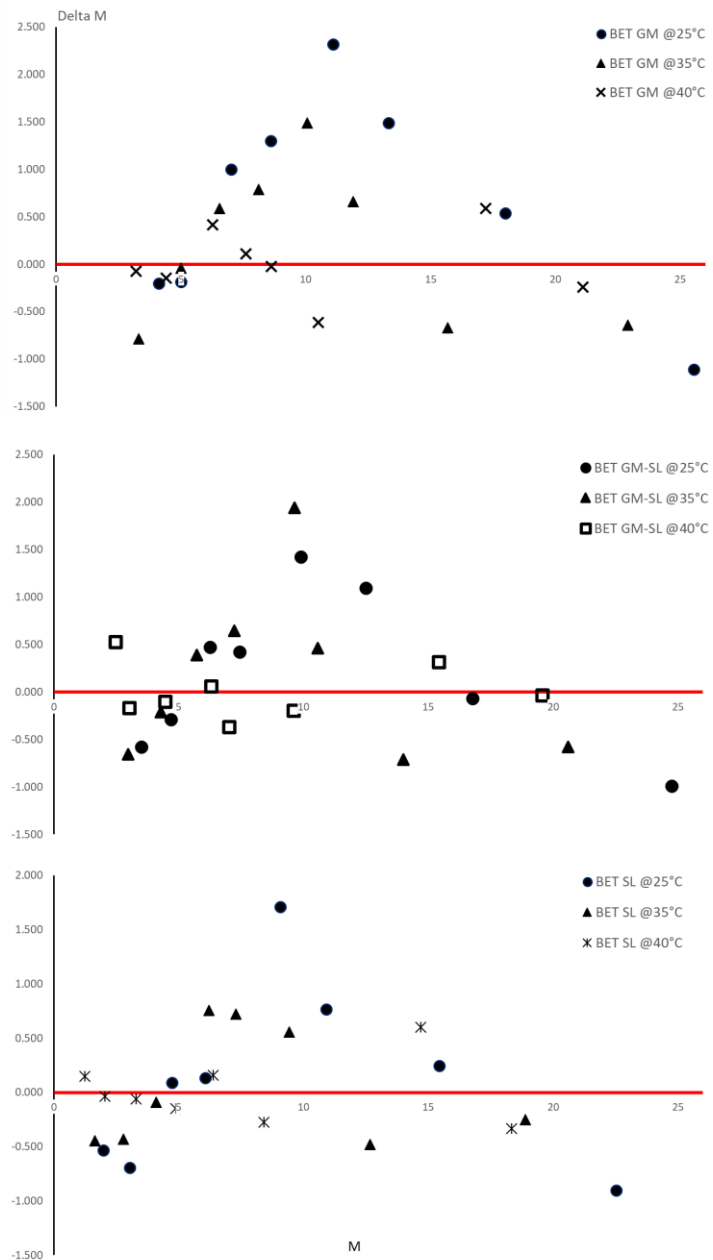


Figura 15. Residuales de ajuste al modelo de BET

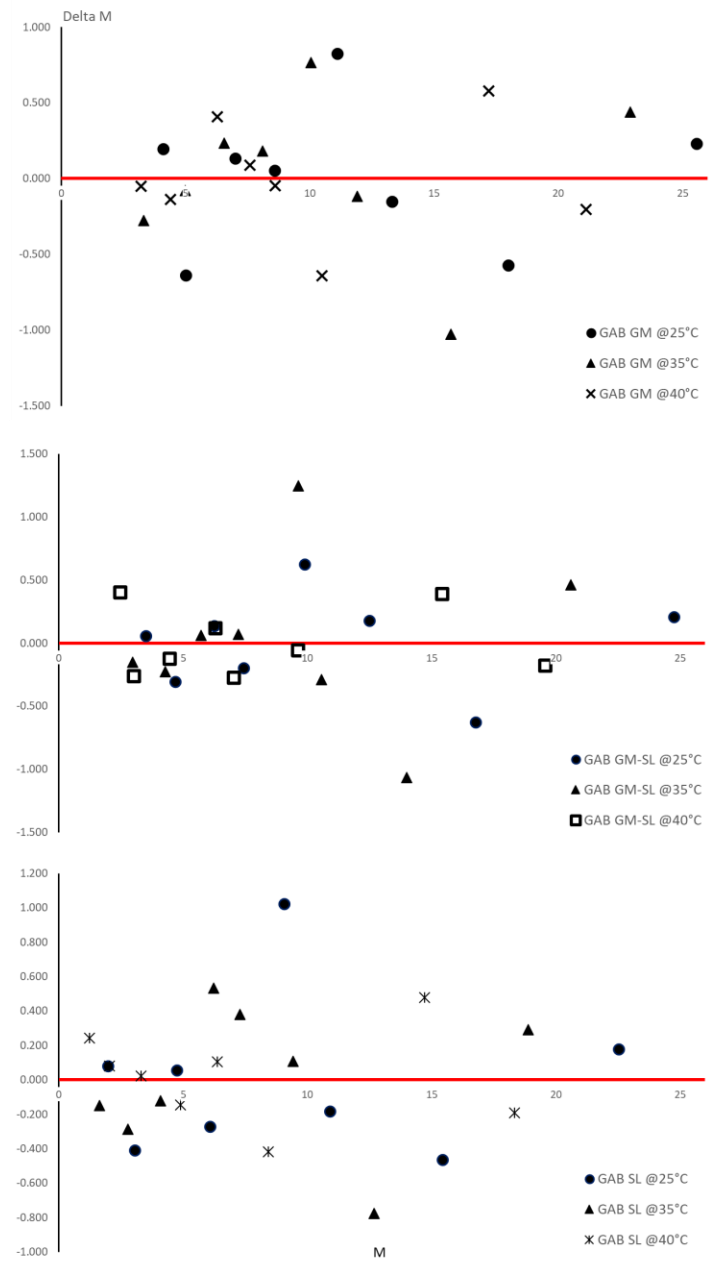


Figura 16. Residuales de ajuste al modelo de GAB

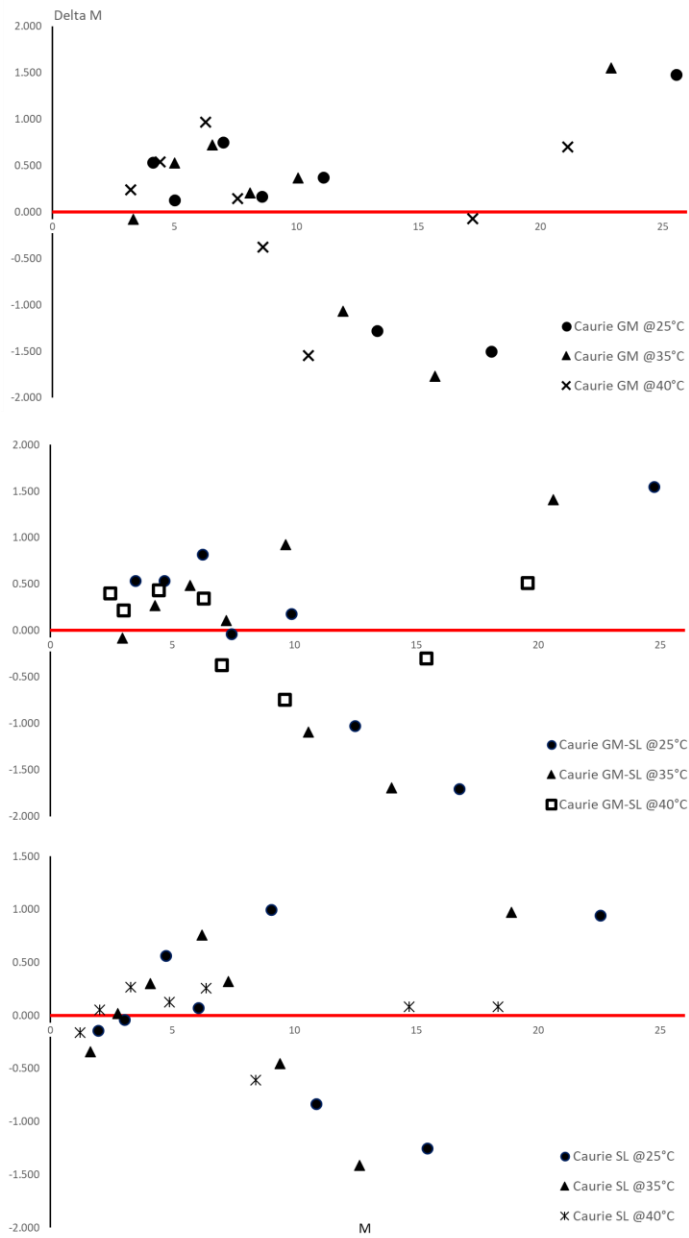


Figura 17. Residuales de ajuste al modelo de Caurie

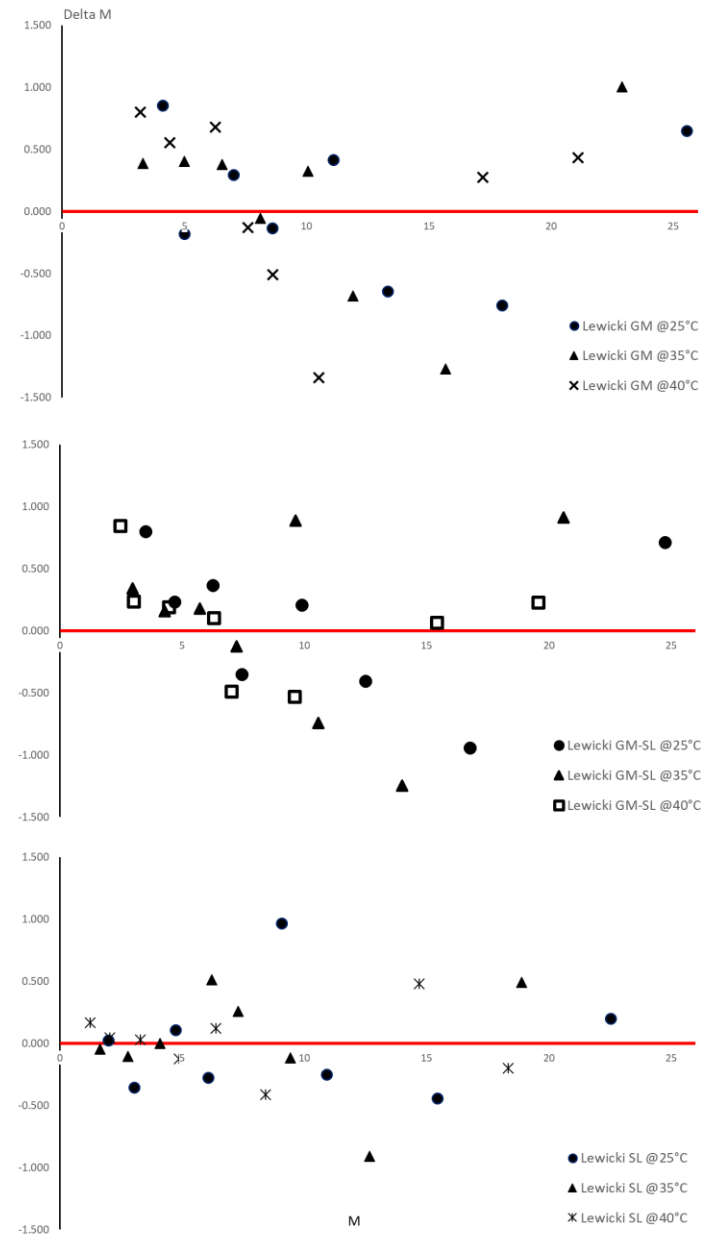


Figura 18. Residuales de ajuste al modelo de Lewicki

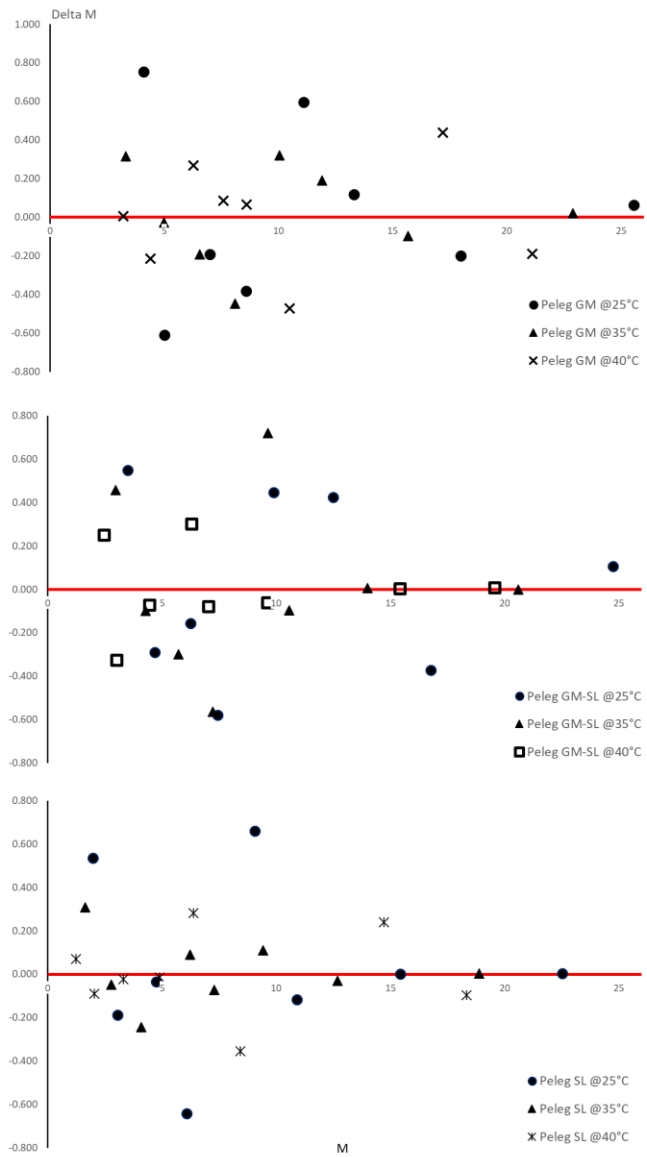


Figura 19. Residuales de ajuste al modelo de Peleg

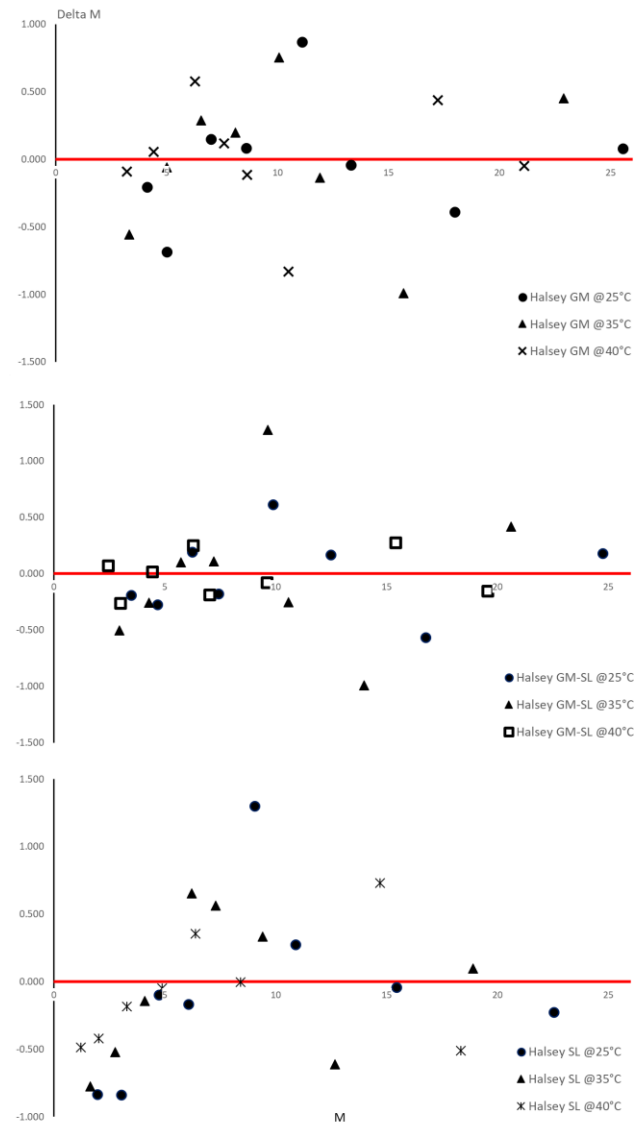


Figura 20. Residuales de ajuste al modelo de Halsey

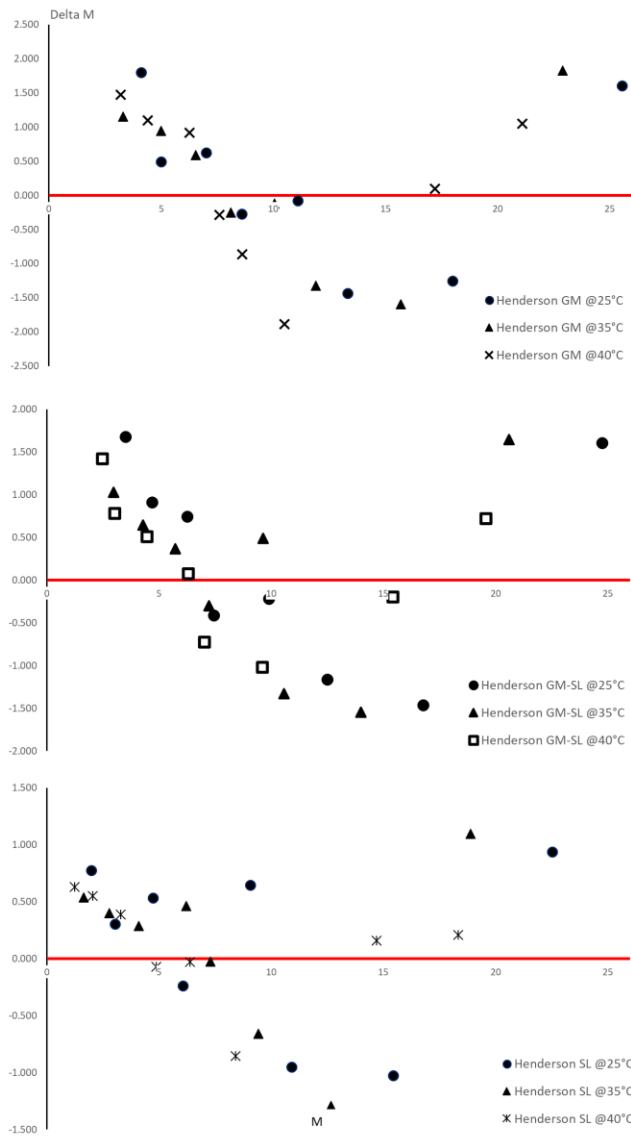


Figura 21. Residuales de ajuste al modelo de Henderson

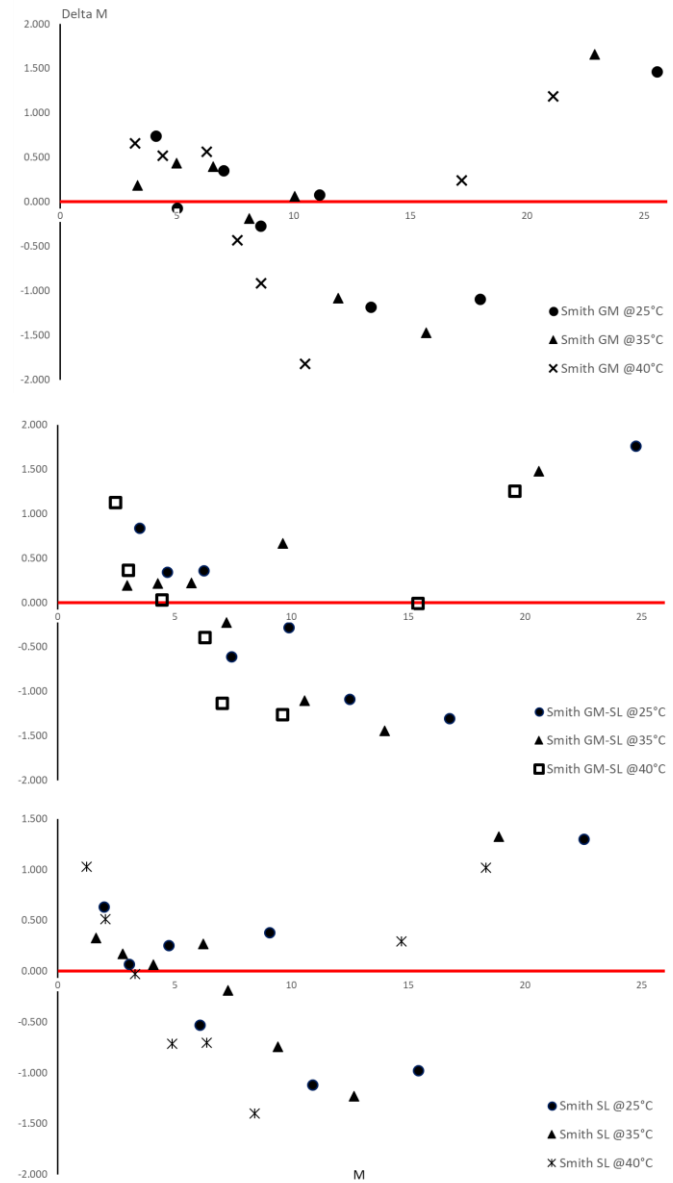


Figura 22. Residuales de ajuste al modelo de Smith

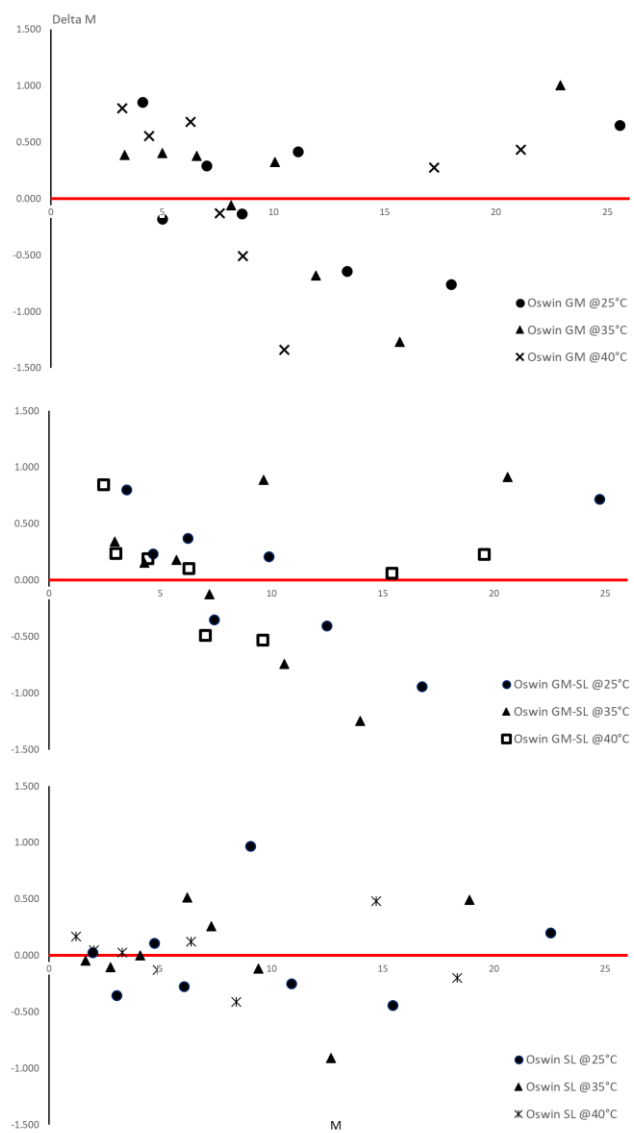


Figura 23. Residuales de ajuste al modelo de Oswin