



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“Modelamiento e interpretación de los perfiles de
liberación de aceite de ajonjolí encapsulado en perlas
de hidrogel”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:

DAIRA JOCELYN ELIZALDE SOLIS

ASESOR ACADÉMICO:

DR. CÉSAR PÉREZ ALONSO

ÍNDICE

	PÁG.
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
INDICE DE TABLAS.....	IX-X
RESUMEN.....	11
INTRODUCCIÓN.....	13
1. ANTECEDENTES.....	14
1.1. DEFINICIÓN y CLASIFICACIÓN.....	16
1.2. PRINCIPALES FUENTES Y COMPOSICION GENERAL	17
1.3. PROPIEDADES FISICOQUIMICAS.....	18
1.4. ESTABILIDAD OXIDATIVA.....	20
1.5. RELEVANCIA DEL MODELAMIENTO DE LIBERACIÓN DE PUFAs.....	21
1.6. ACEITE DE AJONJOLI.....	21
1.6.1 COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES FUNCIONALES.....	22
1.7. PRODUCCIÓN Y POTENCIAL EN MÉXICO.....	22
1.8. APLICACIONES.....	23
1.9. ESTABILIDAD OXIDATIVA Y TÉCNICAS DE ENCAPSULACIÓN.....	23
1.10. MÉTODOS DE ENCAPSULACIÓN.....	24
1.10.1 SECADO POR ASPERSION (SPRAY DRYING)	24
1.10.2 LIOFILIZACION (FREEZE DRYING).....	25
1.10.3 GELACION IONICA DE HIDROGELES (IONUIC GELATION).....	25

1.10.4	ENCAPSULACION ASISTIDA POR ULTRASONIDOS (ULTRASOUND-ASSISTED).....	25
1.10.5	NANO-SPRAY DRYING.....	26
1.10.6	GELACION IONICA.....	26
1.11.	BIOPOLIMEROS UTILIZADOS EN LA TÉCNICA DE GELACIÓN IÓNICA.....	27
1.11.1	ALGINATO DE SODIO.....	27
1.11.2	QUITOSANO.....	28
1.11.3	PECTINAS.....	28
1.11.4	GOMAS (GUAR Y XANTANA)	29
1.11.5	ALMIDONES.....	29
1.11.6	MUCILAGOS.....	30
1.12.	MECANISMOS Y PERFILES DE LIBERACIÓN DE SISTEMAS ENCAPSULADOS.....	31
1.12.1	PRINCIPALES MECANISMOS DE LIBERACION.....	32
1.12.2	TIPOS DE PERFILES DE LIBERACIÓN.....	33
1.13.	MODELOS CINÉTICOS DE LIBERACIÓN.....	35
1.14.	TIPOS DE PERFILES DE LIBERACIÓN.....	42
2.	JUSTIFICACIÓN.....	43
3.	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	46
4.	OBJETIVOS.....	48
4.1.	OBJETIVO GENERAL.....	49
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	49

7. CONCLUSIONES.....	94
8. REFERENCIAS.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁG.
Figura 1. Perfiles de liberación de aceite de ajonjolí de los sistemas AS, B1 y B2 a lo largo del tiempo.....	56
Figura 2. Perfiles de liberación acumulada de aceite de ajonjolí frente al tiempo (min) para los sistemas AS, B1 y B2 (ajuste orden cero).....	59
Figura 3. Perfiles de liberación acumulada de aceite de ajonjolí frente al tiempo (min) para los sistemas AS, B1 y B2 (ajuste primer orden).....	61
Figura 4. Perfiles de liberación acumulada de aceite de ajonjolí frente al tiempo (horas) para los sistemas AS, B1 y B2 (ajuste segundo orden).....	65
Figura 5. Ajuste del modelo de difusión de Fick para los sistemas AS, B1 y B2...	68
Figura 6. Ajuste del modelo de Higuchi para los sistemas AS, B1 y B2.....	71
Figura 7. Ajuste del modelo de Ritger–Peppas para los sistemas AS, B1 y B2.....	75
Figura 8. Ajuste del modelo de Modelo Hixson-Crowell para los sistemas AS, B1 y B2.....	77
Figura 9. Ajuste del modelo de Modelo de Weibull para los sistemas AS, B1 y B2.	80
Figura 10. Ajuste del modelo de Modelo de Baker-Lonsdale para los sistemas AS, B1 y B2.....	83

Figura 11. Ajuste del modelo de Modelo de Hopfenberg para los sistemas AS, B1 y B2.....	86
--	----

Figura 12. Ajuste del modelo de Modelo de Gompertz para los sistemas AS, B1 y B2.....	89
--	----

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁG.
Tabla 1. Porcentaje acumulado de aceite de ajonjolí liberado a partir de los sistemas AS, B1 y B2 en función del tiempo.....	55
Tabla 2. Parámetros del ajuste lineal de orden cero: pendiente, intersección y $R^{2''}$ para la tabla.....	59
Tabla 3. Parámetros del ajuste lineal de primer orden realizados con Solver.....	62
Tabla 4. Parámetros del ajuste lineal de primer orden.....	62
Tabla 5. Parámetros del ajuste lineal de segundo orden.....	66
Tabla 6. Parámetros de difusión calculados para los sistemas AS, B1 y B2.....	69
Tabla 7. Parámetros cinéticos del modelo de Higuchi aplicados a los sistemas de liberación.....	73
Tabla 8. Parámetros de ajuste del modelo de Korsmeyer–Peppas para la liberación de aceite de ajonjolí.....	76
Tabla 9. Parámetros obtenidos mediante el modelo de Hixson–Crowell en los sistemas de liberación.....	78
Tabla 10. Parámetros característicos del modelo de Weibull para los perfiles de liberación estudiados.....	81
Tabla 11. Parámetros cinéticos y estadísticos del modelo de Baker–Lonsdale aplicados a los sistemas AS, B1 y B2.....	84



Tabla 12. Parámetros cinéticos y estadísticos del modelo de Hopfenberg aplicados a los sistemas AS, B1 y B2.....87

Tabla 13. Parámetros cinéticos y estadísticos del modelo de Gompertz aplicados a los sistemas AS, B1 y B2.....91

RESUMEN

Se formaron perlas de hidrogel por gelación iónica de alginato de sodio (AS) y de una mezcla entre alginato de sodio con mucílago de tamarindo (AS-MT) para mejorar la eficiencia de encapsulación y la estabilidad oxidativa del aceite de ajonjolí (AA). La mezcla AS-MT se usó en una relación peso de 1:1 (w/w) a una concentración de 2% (w/v).

La gelación iónica se indujo goteando las dispersiones homogeneizadas de AA-AS-MT con la ayuda de una jeringa en una solución de CaCl_2 (2.5% w/v) bajo agitación continua para inducir la gelación iónica. Las perlas resultantes se secaron en un horno de convección forzada y se almacenaron en condiciones controladas de temperatura.

El tamaño y forma de las perlas de hidrogel se estimó mediante microscopia electrónica de barrido y con el factor de esfericidad se determinó la redondez. La eficiencia de encapsulación se calculó por medio de la relación entre el aceite interno (aceite encapsulado) y el aceite total (aceite superficial más aceite interno).

La estabilidad oxidativa fue analizada en AA sin encapsular y en AA encapsulado en las perlas de hidrogel. Para esto se evaluó la oxidación lipídica durante 6 semanas a través del índice de peróxido valorado espectrofotométricamente. Los datos obtenidos en esta etapa fueron ajustados a modelos cinéticos de cero, primer y segundo orden. La cinética de liberación del AA se determinó al lavar cada muestra de cada sistema en n-hexano por diferentes intervalos de tiempo y, al recolectar los sobrenadantes y dejar evaporar el disolvente, la liberación del aceite se cuantificó por diferencia de peso.

Los resultados se compararon con perlas de hidrogel formuladas con sólo AS (2% w/v). Las perlas de hidrogel de AS presentaron una forma casi esférica de ~2.15 mm de tamaño promedio, mientras que las perlas de hidrogel de AS-MT tuvieron



una forma semiesférica e irregular con un tamaño promedio significativamente mayores (~3.45 mm).

Las perlas de los hidrogeles AS-MT mostraron una mayor eficiencia de encapsulación (~ 84.63 %) que las perlas de AS (~73.45 %), y también ofrecieron una mejor protección al AA contra la oxidación durante el almacenamiento en comparación con el aceite sin encapsular y las perlas de AS. Las cinéticas de oxidación fueron de orden cero.

La cinética de liberación de AA fue controlada por difusión y fue más lenta para las perlas AS-MT que para las de AS. Las características estructurales de los hidrogeles conformados solamente con AS promovieron perfiles de liberación del aceite más altos respecto a los hidrogeles formulados con AS-MT.

Los resultados indican que la mezcla de AS-MT puede considerarse como un aditivo potencial para aplicaciones en la industria alimentaria.



INTRODUCCIÓN

A través del tiempo, el ser humano ha evolucionado y adoptado nuevas formas de vida. Actualmente, el hombre se cuestiona sobre la composición e inocuidad de los alimentos que se cultivan y se consumen para satisfacer las necesidades de la creciente población. Esto ha desarrollado una oportunidad para las industrias de alimentos, ya que los consumidores de hoy buscan productos auténticos que, además de aportar energía, promuevan la salud y mejoren la calidad de vida.

Estudios realizados a lo largo del tiempo han demostrado que la adopción de fuentes ricas en ácidos grasos podría mejorar la calidad de vida de un sector poblacional creciente día con día. Aquí, la atención se centra en la inclusión de ácidos grasos esenciales, los cuales no son sintetizados de ninguna manera por el organismo humano, y que tienen que obtenerse de fuentes naturales.

El aceite de ajonjolí es una fuente rica en nutrientes y contiene ácidos grasos poliinsaturados, como el omega-3 y omega-6. Estos ácidos grasos promueven efectos benéficos en la salud humana. Sin embargo, el uso y administración del aceite de ajonjolí representa una tarea difícil, debido a que es altamente volátil, lábil y susceptible a degradarse frente a factores ambientales como la luz, temperatura, oxígeno y humedad, aunado a esto, el factor sensorial también juega un papel importante.

Una alternativa emergente en las últimas décadas sugiere la aplicación de la tecnología de encapsulación para reducir la degradación de los componentes con alto valor nutricional. Esta tecnología se sustenta en el uso de biopolímeros como material protector ante los factores de deterioro. Además, enmascaran aromas, colores y sabores, por lo que su ingesta se vuelve más factible.



Existen numerosas investigaciones acerca de mezclas biopoliméricas, las cuales mejoran la capacidad protectora. El mucílago de la semilla de tamarindo y el alginato de sodio son polisacáridos naturales, biodegradables y no tóxicos. Son usados ampliamente en el sector alimentario y farmacéutico por sus propiedades espesantes, emulsionantes, gelificantes, estabilizadores y como modificadores de textura.

Considerando que la semilla de ajonjolí es producida en diversos países (incluido México), que es una semilla de fácil acceso y que su aceite posee un alto valor nutritivo, el objetivo de este trabajo fue estudiar la capacidad que tienen el alginato de sodio y el mucílago de tamarindo para ser un reservorio efectivo de aceite de ajonjolí, de manera individual y mezclados, mediante el método de gelificación iónica, con la finalidad de conservar sus propiedades susceptibles a factores ambientales.

En primera parte, se exponen las características del aceite de ajonjolí y la relevancia que presentan para proporcionar una mejor calidad de vida al ser humano. Sin embargo, al ser un compuesto oleaginoso, sus propiedades benéficas se ven comprometidas ante los factores ambientales que propician su oxidación. Por consiguiente, se considera el encapsular aceite de ajonjolí dentro de un polímero o matriz polimérica y se lleva a cabo una recopilación bibliográfica de los métodos de encapsulación: secado por aspersión, extrusión, liofilización, coacervación y gelación iónica.

En segunda parte, se exponen los biopolímeros empleados como revestimiento: alginato, proteínas, pectinas, quitosano y mucílagos, de los cuales resaltan el de aloe vera, chía, nopal, okra y tamarindo. Para este trabajo se formulan dos sistemas de encapsulación. El primero considera únicamente el alginato de sodio como material de pared. El segundo, una mezcla de alginato de sodio y mucílago de tamarindo. Estas formulaciones son llevadas a cabo mediante gelación iónica y, posteriormente, se valoran las características de las perlas obtenidas, así como el



rendimiento y eficiencia de encapsulación, para finalizar con el análisis cinético de la oxidación lipídica y la cinética de liberación del aceite de ajonjolí.



ANTECEDENTES

ANTECEDENTES

1. Aceites Grasos Insaturados (Poliinsaturados)

1.1 Definición y clasificación

Los ácidos grasos insaturados son ácidos carboxílicos de cadena larga que incorporan uno o más enlaces dobles carbono-carbono (C=C) en su esqueleto hidrocarbonado, lo cual reduce la saturación de hidrógenos y modifica significativamente su geometría y propiedades fisicoquímicas (Flores-González, 2016; Guillot-Sánchez, 2012). Estos dobles enlaces pueden presentarse en configuración *cis* —la más común en lípidos naturales—, generando un “codo” de aproximadamente 30° a 40° en la cadena, o en configuración *trans*, cuya conformación es más lineal, asemejándose a los ácidos grasos saturados (Guillot-Sánchez, 2012).

De acuerdo con el número de dobles enlaces, los AGI se clasifican en:

Monoinsaturados (MUFA)

- *Estructura y nomenclatura:* Presentan un solo doble enlace, como el ácido oleico (C18:1 Δ 9 o ω -9), que contiene un enlace *cis* en la novena posición desde el grupo carboxilo (Laurrabaquio Rodríguez, 2014). Este tipo de desaturación es catalizada por enzimas como Δ 9-desaturasa, activas en el retículo endoplásmico (Guillot-Sánchez, 2012).
- *Fuentes y perfil:* El aceite de oliva presenta una concentración de ácido oleico entre 55 % y 85 %, seguido por el aceite de canola (60–75 %) y el aceite de maní (36–67 %) (Laurrabaquio Rodríguez, 2014).
- *Propiedades fisicoquímicas:* La estructura en “codo” reduce la capacidad de empaquetamiento molecular, disminuyendo el punto de fusión a valores alrededor de 13–14 °C y favoreciendo la fluidez (Juárez Dávila, 2020).
- *Relevancia biológica:* Este tipo de ácidos grasos se asocia con beneficios cardiovasculares, disminuyendo el colesterol LDL y aumentando el HDL, además de tener efectos antiinflamatorios moderados (Badui Dergal, 2006).

Poliinsaturados (PUFA)

- *Estructura y nomenclatura:* Contienen dos o más dobles enlaces separados por grupos metileno ($-\text{CH}_2-$), lo cual introduce varios “codos” en la cadena, reduciendo su punto de fusión a valores incluso inferiores a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Guillot-Sánchez, 2012). Se clasifican en familias *omega-3* (como ALA C18:3, EPA C20:5, DHA C22:6) y *omega-6* (como LA C18:2 y AA C20:4) según la posición del primer doble enlace (Flores-González, 2016).
- *Esenciales en humanos:* Debido a la ausencia de $\Delta 12$ - y $\Delta 15$ -desaturasas, los humanos no pueden sintetizar ácidos grasos esenciales como el ácido linoleico (LA) y el α -linolénico (ALA), que deben ser obtenidos de la dieta (Flores-González, 2016).
- *Fuentes:* Los aceites de linaza, chía y nuez son ricos en ALA, mientras que los aceites de maíz y girasol proveen ácido linoleico. Los pescados grasos aportan EPA y DHA (Díaz Sandoval, 2019).
- *Susceptibilidad oxidativa:* Cada doble enlace adicional incrementa el riesgo de peroxidación lipídica, generando radicales libres y compuestos volátiles que deterioran el valor sensorial y funcional del aceite (Flores-González, 2016).
- *Beneficios para la salud:* Los omega-3 tienen efectos antiinflamatorios, protegen el sistema cardiovascular y son esenciales en el desarrollo neurológico. La proporción omega-6/omega-3 en la dieta es un factor crítico para la modulación inmune (Badui Dergal, 2006).

1.2 Principales fuentes y composición general

Los aceites de origen vegetal constituyen las fuentes más abundantes de ácidos grasos insaturados (poliinsaturados). Mediante hidrólisis ácida, aceites como el de coco, soya y canola se transforman en fracciones libres de ácidos grasos—con hasta un 77 % de AGI/AGP en aceite de soya y un 82 % en aceite de canola—que luego se purifican para aplicaciones nutracéuticas e industriales (Gómez Morales, 2015).

En semillas silvestres de *Vitis* sp. se ha documentado un contenido de AGI de hasta 88,7 %, lo que revela su potencial como fuente alternativa de ácidos grasos poliinsaturados (Cortés-Camargo et al., 2023).



El aceite de ajonjolí (*Sesamum indicum* L.), ampliamente usado en formulaciones poliméricas, presenta un perfil característico que varía según la variedad y condiciones de cultivo:

- Ácido oleico (C18:1 ω -9): 37 %–47 %
- Ácido linoleico (C18:2 ω -6): 43 %–59 %

Díaz Sandoval (2019) reporta que la variedad “Negra”, cultivada a 1 200 m s.n.m. con riego limitado, alcanza los valores más altos de oleico ($\approx$ 47 %) y linoleico ($\approx$ 51 %), mientras que la variedad “Blanca” en suelos más húmedos presenta concentraciones de alrededor de 37 % y 43 %, respectivamente. Estas diferencias impactan directamente la fluidez, la viscosidad y la estabilidad oxidativa del aceite, propiedades críticas para su desempeño en matrices de gelación iónica.

Además, factores como la variedad genética, las condiciones agronómicas y el método de extracción influyen de forma decisiva en la composición final:

1. Variedad genética: La selección de cultivares de “alto oleico” o “alto linoleico” permite ajustar el perfil funcional del aceite (Díaz Sandoval, 2019).
2. Condiciones agronómicas: Suelo, altitud y riego modulan la actividad de las desaturasas, afectando la relación oleico/linoleico (Díaz Sandoval, 2019).
3. Método de extracción: El prensado en frío conserva mejor lignanos y tocoferoles, en contraste con métodos asistidos por solventes, que pueden alterar levemente la proporción de PUFA (Gómez Morales, 2015).
4. Refinado: Procesos de decoloración y desodorización a alta temperatura reducen mínimamente los PUFA más sensibles, aunque dentro de rangos aceptables para uso alimentario y farmacéutico (Gómez Morales, 2015).

1.3 Propiedades fisicoquímicas

En el estudio de aceites enriquecidos en ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados (AGI/AGP), comprender sus propiedades fisicoquímicas resulta esencial para diseñar sistemas de encapsulación eficientes. A continuación, se profundiza en los tres aspectos clave: viscosidad y fluidez, punto de fusión, e interacciones con matrices de hidrogel.

1. Viscosidad y fluidez

La viscosidad dinámica de un aceite depende de su contenido de insaturaciones: cuantas más insaturaciones (dobles enlaces) presentes, menor será la cohesión entre cadenas y, por tanto, menor la resistencia al flujo (Juárez Dávila, 2020).

- Valores típicos: En aceites con predominio de AGP, como aceites de semilla de linaza o ajonjolí, se han medido viscosidades alrededor de 50–70 mPa·s a 25 °C, comparadas con 80–120 mPa·s de aceites ricos en MUFA (Juárez Dávila, 2020).
- Efecto en difusión: Un coeficiente de difusión efectivo (D), en sistemas de gelación iónica, puede aumentar de $\sim 1 \times 10^{-9}$ cm²/s en matrices con aceite alto en saturados hasta $\sim 1.5 \times 10^{-9}$ cm²/s con aceite rico en AGP, facilitando la liberación controlada del nutraceutico (Díaz Sandoval, 2019).
- Mecanismo molecular: Los dobles enlaces *cis* introducen “codos” que impiden el empaquetamiento lineal, reduciendo las fuerzas de van der Waals y haciendo al aceite más fluido y menos viscoso a temperaturas de procesamiento.

2. Punto de fusión

El punto de fusión refleja la transición de estado sólido a líquido y está estrechamente ligado a la geometría de la cadena:

- Influencia de enlaces *cis*: Cada enlace *cis* genera un ángulo de $\sim 30^\circ$ – 40° , interrumpiendo el empaquetamiento ordenado que caracteriza a los ácidos grasos saturados. Por ello, los PUFA funden a temperaturas muy bajas (incluso por debajo de -50 °C), mientras que los MUFA funden alrededor de 13 – 20 °C, y los saturados por encima de 40 °C (Guillot-Sánchez, 2012).
- Importancia práctica: En procesos de secado por aspersión o liofilización, este bajo punto de fusión evita que el aceite cristalice, garantizando partículas uniformes y estables.
- Variaciones según composición: Un aceite de ajonjolí con 40 % oleico y 50 % linoleico presenta un punto de fusión medio cercano a -4 °C, lo que favorece su manipulación a temperatura ambiente sin solidificación (Guillot-Sánchez, 2012).

3. Interacciones con hidrogeles

La afinidad hidrofóbica de los AGI/AGP modula la estructura y el comportamiento de los hidrogeles, actuando como plastificante interno:

- Efecto plastificante: Incorporar aceite reduce el módulo de almacenamiento (G') del hidrogel, aumentando su deformabilidad. Por ejemplo, en hidrogeles de alginato, añadir 20 % (w/w) de aceite de ajonjolí disminuye G' en ~15 %, facilitando el hinchamiento (Díaz Sandoval, 2019).
- Coeficiente de difusión: Al alterar la densidad de la red y la tensión interfacial, el aceite incrementa el coeficiente de difusión aparente de moléculas hidrosolubles en hasta 20 %, importante para diseños de liberación dual.
- Capacidad de hinchamiento: La presencia de dominios lipófilos genera microcanales que permiten un hinchamiento más controlado, evitando una absorción abrupta de agua que pudiera romper la cápsula. Hidrogeles con 15 % de AGP han mostrado aumentos de hinchamiento en 25 % respecto a los controles sin aceite.

1.4 Estabilidad oxidativa

Los ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) muestran una alta predisposición a la peroxidación lipídica, iniciada por la formación de radicales libres que atacan los dobles enlaces, generando hidroperóxidos y fragmentos volátiles responsables de rancidez y pérdida de valor nutrimental (Flores-González, 2016).

La velocidad de autooxidación de los PUFA se correlaciona directamente con el número de dobles enlaces: a mayor insaturación, más sitios susceptibles de ataque y más rápida propagación de la cadena radicalaria. Estudios han demostrado que, en aceites no encapsulados almacenados a 35 °C, el valor de peróxidos puede aumentar de $9,3 \pm 1,9$ a $183,3 \pm 8,5$ meq O_2 /kg en la primera semana, llegando a $351,2 \pm 11,3$ meq O_2 /kg al quinto día (Flores-González, 2016).

La encapsulación en matrices de gelación iónica con biopolímeros ricos en compuestos antioxidantes (p. ej., mucílago de chía) atenúa la formación de peróxidos: formulaciones con mezclas de goma de mezquite y mucílago de tamarindo logran picos máximos de peróxido de ≈ 91 meq O_2 /kg en la segunda semana, frente a ≈ 203 meq O_2 /kg en microcápsulas sin mucílago (Flores-González, 2016).

Los factores que influyen en esta estabilidad incluyen:

- Composición de la pared: paredes más gruesas y densas reducen la permeabilidad al oxígeno.
- Antioxidantes endógenos: lignanos y polifenoles presentes en mucílagos capturan radicales iniciadores.
- Condiciones de almacenamiento: temperatura, humedad y presión de oxígeno modulan la cinética de oxidación (Flores-González, 2016).

1.5 Relevancia del modelamiento de liberación de PUFAs

En el modelamiento fenomenológico de la liberación de aceites PUFAs encapsulados en hidrogeles, es esencial analizar los posibles mecanismos de liberación en conjunto con los mecanismos de degradación oxidativa:

- El coeficiente de difusión (D) refleja la movilidad del aceite a través de la red polimérica y depende de la fluidez del aceite y la porosidad del gel.
- La oxidación simultánea debe incorporarse como un término de primer orden en la ecuación de transporte, con una constante de oxidación (k_o) determinada experimentalmente a partir de la curva de formación de peróxidos (Flores-González, 2016).
- El modelo de Korsmeyer–Peppas (Korsmeyer & Peppas, 1984) permite ajustar el exponente n para identificar el mecanismo de liberación dominante:
 - $n < 0,5$: difusión Fickiana.
 - $0,5 < n < 1$: mecanismos mixtos de difusión e hinchamiento.

Díaz Sandoval (2019) aplicó este enfoque a sistemas de alginato–mucílago, demostrando que el ajuste de n y la inclusión del término de oxidación mejora significativamente la predicción de los perfiles de liberación de aceite en medios simulados, crucial para el diseño de productos nutracéuticos y farmacéuticos con liberación controlada.

1.6 Aceite de ajonjolí

El aceite de ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) constituye una de las materias primas más prometedoras para aplicaciones alimentarias, cosméticas y farmacéuticas en México, debido a su riqueza en ácidos grasos insaturados y compuestos bioactivos. Tradicionalmente es extraído por medios mecánicos y, en ocasiones, complementado con métodos de extracción asistida que emplean solventes verdes, este aceite destaca tanto



por su valor organoléptico —su sabor suave y aroma característico— como por sus propiedades funcionales, que incluyen actividad antioxidante, cardioprotectora y hepatoprotectora (Repositorio de Tesis DGBSDI, s.f.; UAEH, s.f.). Sin embargo, el perfil rico en dobles enlaces lo hace vulnerable a procesos de oxidación, lo cual ha impulsado intensas investigaciones en técnicas de encapsulación y optimización de la cadena productiva para asegurar la calidad y estabilidad del producto final (Dialnet, s.f.; Flores-González, 2016).

1.6.1 Composición y propiedades funcionales

El aceite de ajonjolí presenta un perfil de ácidos grasos altamente insaturados:

- Ácido oleico (C18:1 ω -9): 33 %–41 %
- Ácido linoleico (C18:2 ω -6): 39 %–51 %

Estos valores varían según la variedad y las condiciones agronómicas; por ejemplo, Díaz Sandoval (2019) documenta que la variedad “Negra” cultivada a 1 200 m s.n.m. con riego controlado alcanza hasta 47 % de oleico y 51 % de linoleico, mientras que la “Blanca” en suelos más húmedos se sitúa en 37 % y 43 % respectivamente. Este balance de MUFA/PUFA determina la fluidez, la viscosidad y la estabilidad oxidativa del aceite, así como su afinidad con matrices poliméricas en procesos de gelación iónica.

Además de los ácidos grasos, el aceite retiene lignanos antioxidantes (sesamina, sesamolina) y tocoferoles (vitamina E) cuando se extrae por prensado en frío, compuestos que juegan un papel clave en la protección frente al estrés oxidativo y en la promoción de efectos cardioprotectores y hepatoprotectores en modelos celulares in vitro (ResearchGate & SciELO, s.f.; Repositorio de Tesis DGBSDI, s.f.).

1.7 Producción y potencial industrial en México

La producción nacional de ajonjolí se concentra en los estados de Guerrero, Sinaloa, Michoacán y Sonora, donde pequeñas y medianas empresas extraen el aceite para mercados regionales y de exportación (UNAM & DGBSDI, s.f.). Estudios recientes destacan la urgencia de:

1. Adoptar métodos de extracción asistida (ultrasonidos, CO₂ supercrítico) para incrementar el rendimiento graso y preservar compuestos termo-lábiles
2. Optimizar la logística postcosecha (secado, almacenamiento) para reducir pérdidas por rancidez y contaminación microbiana

- 
3. Fomentar la certificación de calidad y la trazabilidad en la cadena productiva, agregando valor al producto y abriendo mercados premium.

Estas acciones, complementadas con investigación aplicada en cultivares de alto oleico o alto linoleico, permiten consolidar al aceite de ajonjolí como un insumo estratégico de alto valor agregado tanto para la industria alimentaria como para la biofarmacéutica y la cosmética natural.

1.8 Aplicaciones

- Alimentación funcional: Microcápsulas de aceite de ajonjolí se incluyen en barras energéticas, bebidas y suplementos nutricionales, liberando progresivamente ácidos grasos esenciales y lignanos en el tracto gastrointestinal para mejorar la biodisponibilidad y estabilidad de los nutrientes (SciELO & Biblos-e Archivo, s.f.).
- Farmacéutica y cosmética: El aceite actúa como vehículo lipófilo para principios activos en cremas y emulsiones, facilitando una liberación sostenida de antioxidantes que protegen la piel y favorecen la recuperación de la barrera epidérmica (RI UAEMEX & UAEH, s.f.).
- Sector industrial: Su uso como lubricante biodegradable para maquinaria ligera aprovecha la mezcla de ácidos grasos mono y poliinsaturados para reducir la fricción; no obstante, la limitada estabilidad térmica exige la adición de antioxidantes sintéticos o tratamientos de hidrogenación parcial para aplicaciones a altas temperaturas (UPS & ResearchGate, s.f.).

1.9 Estabilidad oxidativa y técnicas de encapsulación

Pese a su contenido en antioxidantes naturales, la elevada densidad de dobles enlaces de sus PUFA facilita la peroxidación lipídica, especialmente bajo condiciones de luz, calor, oxígeno y humedad, generándose hidroperóxidos y compuestos volátiles responsables de rancidez y pérdida de valor nutrimental (Flores-González, 2016) . Para contrarrestar esta vulnerabilidad, se han desarrollado técnicas de encapsulación por atomización (spray drying) empleando biopolímeros como mucílago de tamarindo o mezclas de goma de mezquite y mucílago de chía, que logran:

- Eficiencias de encapsulación > 90 %, reteniendo la mayor parte del aceite en matrices sólidas

- Reducción de la formación de peróxidos: picos de peróxido cercanos a 90 meq O₂/kg tras 2 semanas, versus 200 meq O₂/kg en microcápsulas sin mucílago
- Liberación controlada en medios simulados gastrointestinales, manteniendo más del 85 % de los ácidos grasos esenciales después de 30 días de almacenamiento a 25 °C (RI UAEMEX & Biblos-e Archivo, s.f.) .

Este enfoque no solo mejora la vida de anaquel del aceite, sino que facilita su incorporación en alimentos funcionales (barras, bebidas, suplementos) y en formulaciones cosméticas y farmacéuticas, al proporcionar matrices que protegen al aceite y regulan su liberación de manera predecible.

1.10 Métodos de encapsulación

En la encapsulación de aceite de ajonjolí se emplean diversas técnicas, cada una diseñada para cumplir con demandas específicas de tamaño de partícula, eficiencia de retención, estabilidad oxidativa y perfil de liberación. A continuación, se amplían los cinco métodos principales, proporcionando detalles operativos, resultados típicos y consideraciones para su aplicación en sistemas de gelación iónica y matrices poliméricas.

1.10.1 Secado por aspersión (spray drying)

El spray drying es la técnica más industrializada para obtener microcápsulas en polvo. Consiste en formar una emulsión aceite-en-agua que se atomiza en finas gotas dentro de una torre de secado, donde un flujo de aire caliente (120–160 °C de entrada, 80–90 °C de salida) evapora el agua en milisegundos, dejando partículas portadoras de aceite (Cortés-Camargo et al., 2019).

- Agentes de recubrimiento: Se usan biopolímeros como goma de mezquite, mucílago de chía o maltodextrina; mezclas comunes 90:10 ó 80:20 (goma:mucílago) alcanzan hasta 96 % de encapsulación y retienen alrededor de 50 % de compuestos volátiles (Cortés-Camargo et al., 2019).
- Propiedades de las microcápsulas: El tamaño medio varía entre 10 y 50 µm, con densidades aparentes de 400–600 kg/m³. La humedad residual debe mantenerse por debajo de 4 % para garantizar estabilidad (Bakry et al., 2019).
- Ventajas y limitaciones: Ofrece alta productividad y partículas libres de solventes, pero la exposición al calor puede degradar parte de los lignanos y tocoferoles sensibles (Bae & Lee, 2008).

1.10.2 Liofilización (freeze drying)

La liofilización preserva al máximo los compuestos termo-lábiles al congelar la emulsión y luego sublimar el hielo bajo vacío, resultando en microesferas porosas de baja densidad ($< 0,1 \text{ g/mL}$) (Bae & Lee, 2008).

- Eficiencia de encapsulación: Suele rondar 60–75 %, inferior al spray drying, debido a pérdidas de aceite durante los ciclos de congelación y sublimación (Bakry et al., 2019).
- Morfología y propiedades: Las partículas presentan poros superficiales y aglutinaciones dependiendo de la velocidad de congelación y la concentración de sólidos. Conservan $> 90 \%$ de lignanos y tocoferoles (Bae & Lee, 2008).
- Desventajas: Alto costo energético y tiempos de proceso largos, lo que limita su uso a productos de alto valor añadido.

1.10.3 Gelación iónica de hidrogeles (ionic gelation)

Basada en la interacción de polisacáridos aniónicos (alginato, pectina) con cationes divalentes (Ca^{2+}), esta técnica genera esferas de hidrogel (2–3 mm) que encapsulan aceite mediante el modelo “huevo-caja” (Cortés-Camargo et al., 2023).

- Proceso operativo: Emulsión de aceite en solución de alginato (1–3 % p/v), a veces mezclada con mucílago de tamarindo en proporciones 1:1 o 1:2, se gotea en baño de CaCl_2 (2–2,5 % p/v), formando perlas en segundos. Agitación 5–10 min completa el entrecruzado (Cortés-Camargo et al., 2023).
- Eficiencia y liberación: Mezclas alginato–tamarindo 1:1 alcanzan $> 73 \%$ de encapsulación y liberación controlada ajustable por el modelo de Korsmeyer–Peppas ($n \approx 0,45$), permitiendo difusión Fickiana moderada (Cortés-Camargo et al., 2023).
- Aplicaciones: Idóneas para sistemas alimentarios de liberación sostenida y para matrices farmacéuticas donde se requiere protección frente al pH gástrico.

1.10.4 Encapsulación asistida por ultrasonidos (ultrasound-assisted)

La cavitación ultrasónica genera fuerzas de cizalla que reducen el tamaño de gota de la emulsión, mejorando su estabilidad y homogeneidad antes del secado (Hielscher, 2007).

- Mejoras observadas: Integrado en spray drying, incrementa la eficiencia de encapsulación de aceite de ajonjolí de $\sim 80 \%$ a $\sim 92 \%$ y reduce el diámetro medio de microcápsulas en un 15 % (Khaw, Lee & Chen, 2024).

- Parámetros críticos: Frecuencias de 20–40 kHz, amplitudes de 30–50 %, y tiempos de tratamiento de 2–5 min, optimizados para equilibrar reducción de tamaño y prevención de calentamiento excesivo (Hielscher, 2007).
- Consideraciones: Requiere equipo especializado y control preciso de temperatura para evitar degradación de compuestos sensibles.

1.10.5 Nano-spray drying

El nano-spray drying utiliza boquillas micrométricas y separación electrostática para producir partículas de 300 nm–2 μ m, con rendimientos de hasta 90 % y alta uniformidad (Heng & Lee, 2011).

- Ventajas: Ofrece partículas de tamaño controlado, ideales para aplicaciones farmacéuticas y nutraceuticas donde la biodisponibilidad depende de la dimensión nanométrica.
- Desventajas: Volumen de producción limitado (< 100 mL/h) y requerimiento de mantenimiento riguroso de electrodos.
- Resultados típicos: Microcápsulas con carga de aceite de ajonjolí de ~20 % (w/w) y liberación en 4 h en medio buffer, adecuadas para formulaciones de inhalación o administración parenteral (Heng & Lee, 2011).

1.10.6 Gelación iónica

La gelación iónica emplea interacciones entre polímeros aniónicos y cationes divalentes para producir perlas de hidrogel que encapsulan aceite de ajonjolí con alta eficiencia, estabilidad oxidativa y perfil de liberación controlada. Variar la relación polímero:núcleo, la concentración de CaCl_2 y el mecanismo de gelación (externa vs. interna) permite ajustar el diámetro, la morfología y los tiempos de liberación (Cortés-Camargo et al., 2020; Cortés-Camargo et al., 2023). Las microcápsulas resultantes mantienen hasta un 80 % del aceite tras 30 días de almacenamiento a 25 °C, especialmente cuando se emplean mezclas de alginato y mucílago de tamarindo en proporción 1:1.5, que superan al alginato puro tanto en eficiencia de encapsulación como en retención oxidativa (Velázquez-Gutiérrez et al., 2021). Las cinéticas de liberación observadas en medios simulados gástricos y entéricos siguen mecanismos de difusión Fickiana, con exponentes de Korsmeyer–Peppas menores a 0,5 (Cortés-Camargo et al., 2023; Boostani & Jafari, 2021). Estos sistemas son versátiles para aplicaciones en alimentos funcionales, farmacéuticas y cosméticas, y su optimización depende de parámetros operativos clave como velocidad de goteo, viscosidad de la

emulsión y proporción de mucílago, factores que influyen directamente en la formación y estabilidad de la red polimérica (Huerta Hernández, 2020; Ramírez-Cruz et al., 2019).

1.11 Biopolímeros utilizados en la técnica de gelación iónica

En la técnica de gelación iónica para encapsulación de aceite de ajonjolí se emplean diversos biopolímeros que proporcionan matrices estables, controlan la tasa de liberación y mejoran la resistencia a la oxidación. El alginato de sodio es el más común debido a su rápida gelificación con Ca^{2+} y alta biocompatibilidad (González, Rosas, & Lupo, 2014). El quitosano, un polímero catiónico, forma complejos con alginato o aniones fosfato, aportando estabilidad y funcionalidad antimicrobiana (Jiang, Huang, & Chen, 2014). Las pectinas procedentes de frutas generan geles al unirse con Ca^{2+} , útiles para sistemas alimentarios (Voragen, Coenen, Verhoef, & Schols, 2009). Gomas como la guar y la xantana actúan como coadyuvantes, mejoran la retención de aceite y modifican la viscosidad de la emulsión previa (Rodrigo, Linares, & Pérez, 2012). Los almidones nativos o modificados pueden gelificar en presencia de iones y sirven de soporte económico (Rodrigo et al., 2012). Finalmente, los mucílagos de tamarindo o nopal, combinados con alginato, mejoran la eficiencia de encapsulación y extienden la estabilidad oxidativa de las microcápsulas (Ramírez-Cruz, Jiménez-Estrada, & Solano-Martínez, 2019; Huerta Hernández, 2020).

1.11.1 Alginato de sodio

El alginato de sodio es un polímero lineal formado por bloques de ácido β -D-mannurónico (M) y α -L-gulurónico (G), que adopta una conformación helicoidal apta para el “modelo huevo-caja” al interaccionar con Ca^{2+} , generando hidrogeles tridimensionales con porosidad y reticulación ajustables (González et al., 2014). La proporción de bloques G determina la rigidez y resistencia mecánica del gel; un mayor contenido de G incrementa la densidad de puentes de Ca^{2+} , mejorando la integridad estructural pero reduciendo la flexibilidad.

La gelación puede realizarse de forma externa, donde Ca^{2+} difunde desde el baño hacia la gota de alginato, creando una corteza densa y un núcleo menos gelificado, o interna (in situ), liberando Ca^{2+} controladamente desde CaCO_3 o glucono- δ -lactona incluidos en la emulsión, lo que produce una red homogénea y minimiza el “burst release” inicial (González et al., 2014).

En la optimización de procesos, se emplean concentraciones de alginato de 1–3 % (w/v) y CaCl_2 de 2–4 % (w/v), así como pH 6–7 para maximizar la encapsulación (> 95 %) y retener

compuestos sensibles como lignanos y tocoferoles del aceite de ajonjolí (Cortés-Camargo, Román-Guerrero, Álvarez-Ramírez, & Pérez-Alonso, 2023).

1.11.2 Quitosano

El quitosano resulta de la desacetilación de la quitina y presenta grupos amino protonados en medios ácidos ($\text{pH} < 6$), volviéndose soluble y catiónico. Esta carga positiva favorece la interacción electrostática con polisacáridos aniónicos (alginato, pectina) o con aniones como TPP (tripolifosfato), formando coacervados o microesferas de doble capa (Jiang et al., 2014).

La formación de microesferas quitosano–TPP se logra al mezclar quitosano 0.5–1 % (w/v) con TPP 0.2–0.5 % (w/v) bajo agitación, ajustando el pH a 4.5–5 para controlar el tamaño (200–500 nm) y la eficiencia de encapsulación (> 85 %) de compuestos liposolubles. Cuando se mezcla con alginato (proporciones 1:1 a 1:3), el quitosano forma una capa externa que refuerza mecánicamente la esfera y actúa como barrera frente a iones y enzimas, prolongando la liberación en medios gastrointestinales.

Su actividad antimicrobiana se atribuye a la interacción de los grupos amino con la membrana celular de bacterias, lo que añade preservación adicional al aceite encapsulado, útil en aplicaciones alimentarias y cosméticas.

1.11.3 Pectinas

Las pectinas de bajo grado de metoxilación (LM) son polisacáridos aniónicos compuestos principalmente por unidades de ácido D-galacturónico que poseen menos del 50 % de esterificación metílica, lo que favorece la formación de enlaces iónicos con Ca^{2+} (Voragen et al., 2009).

- **Mecanismo de gelación:** Bajo condiciones de pH 3–5, los bloques homogalacturónicos (HG) se entrecruzan con Ca^{2+} formando una red de “uniones en cadena” que encapsula el aceite en dominios acuosos y lipófilos intercalados. Esta estructura semirígida es permeable, permitiendo liberaciones moduladas en entornos gastrointestinales simulados.
- **Parámetros críticos:** La concentración óptima de pectina suele estar entre 2–4 % (w/v), con CaCl_2 al 1–3 % (w/v), y temperatura de gelación a 25 °C para maximizar la retención (> 75 %) y minimizar el “burst release” inicial.
- **Capas multicapa:** Revestimientos adicionales con quitosano (0.5 % w/v) o carragenina fortalecen la matriz y reducen la degradación en condiciones ácidas,

permitiendo sistemas de liberación dual para nutraceuticos que requieren paso gástrico e intestinal.

1.11.4 Gomas (Guar y Xantana)

Las gomas vegetales actúan como coadyuvantes en la fase acuosa, mejorando las propiedades reológicas de la emulsión previa a la gelación y reforzando la red de hidrogel resultante.

- **Goma guar (*Cyamopsis tetragonoloba*):** Polisacárido galactomannano que, a concentraciones de 0.5–1 % (w/v), incrementa la viscosidad de la fase acuosa hasta 1500–2000 mPa·s, reduciendo el tamaño de gota de aceite y favoreciendo perlas más uniformes (~700–900 µm), con eficiencia de encapsulación > 90 % (Rodrigo et al., 2012).
- **Goma xantana (*Xanthomonas campestris*):** Polisacárido aniónico que, incluso a bajas concentraciones (0.2–0.5 % w/v), confiere comportamiento pseudoplástico, estabiliza la suspensión de perlas y refuerza la integridad mecánica del hidrogel.
- **Sinergias:** Mezclas guar–xantana (razón óptima 1:1) potencian la estabilidad tixotrópica y generan microestructuras de gel con módulos de almacenamiento (G') superiores y control de liberación mejorado en sistemas de aceite encapsulado.

1.11.5 Almidones

Los almidones, nativos o modificados, aportan una alternativa económica para matrices iónicas híbridas.

- **Almidones nativos (maíz, yuca):** Al 2 % (w/v), pueden hincharse y gelatinizar al calentarse en dispersión acuosa con alginato (2 % w/v), formando redes interpenetrantes que ralentizan la difusión del aceite y logran liberación sostenida en más de 48 h con eficiencia > 80 % (Rodrigo et al., 2012).
- **Almidones modificados (oxidado, acetilado):** Presentan menor retrogradación y permiten gelificación a temperaturas < 40 °C, preservando compuestos termo-sensibles. La acetilación mejora la compatibilidad hidrofílica–hidrofóbica, favoreciendo la retención de aceites esenciales y lipófilos.
- **Propiedades mecánicas:** Estas matrices híbridas exhiben mayor resistencia al hinchamiento excesivo y menor degradación en medios buffer, lo que las hace aptas para aplicaciones en alimentos procesados y sistemas de liberación oral.

1.11.6 Mucílagos

Los mucílagos son polisacáridos hidrofílicos de alto peso molecular, no estructurales, que se acumulan en células secretoras de diversas plantas. Desde el punto de vista químico, consisten en heteropolisacáridos compuestos por residuos de arabinosa, galactosa, ramnosa, xilosa y ácido galacturónico, formando estructuras amorfas que, en contacto con el agua, originan soluciones viscosas o sistemas coloidales (González et al., 2014; Voragen et al., 2009).

Su capacidad para retener agua y formar geles se ha aprovechado tradicionalmente como espesantes, estabilizantes y emulsionantes naturales. Recientemente, ha crecido el interés por su uso en microencapsulación de compuestos sensibles, especialmente en combinación con polímeros como el alginato, debido a su biocompatibilidad, biodegradabilidad y la presencia de compuestos fenólicos con propiedades antioxidantes (da Silva et al., 2014; Cortés-Camargo et al., 2023).

En sistemas de encapsulación, los mucílagos contribuyen a mejorar la eficiencia de encapsulación, al formar redes viscosas que dificultan la difusión del aceite encapsulado, y actúan también como antioxidantes naturales, protegiendo los compuestos lipídicos de la oxidación (Velázquez-Gutiérrez et al., 2021). Además, funcionan como emulsionantes naturales, reduciendo o incluso eliminando la necesidad de surfactantes sintéticos (Rodrigo et al., 2012).

Los mucílagos de origen vegetal, particularmente los de tamarindo y nopal, son excelentes co-encapsulantes en combinación con alginato de sodio. No solo mejoran las propiedades estructurales de las microcápsulas generadas por gelación iónica, sino que además proporcionan protección antioxidante, modulan la liberación controlada del aceite y elevan el valor nutracéutico del producto final. El mucílago de nopal, extraído principalmente de las pencas de *Opuntia ficus-indica*, está compuesto por arabinosa, galactosa, ramnosa y xilosa, además de ácidos urónicos y grupos acetilo. Este polisacárido ha sido ampliamente utilizado en sistemas encapsulantes por su alta viscosidad, capacidad para formar geles y efecto sinérgico con alginato de sodio (Huerta Hernández, 2020).



En sistemas de gelación iónica, mezclas alginato–nopal 1:1 (p/p) han mostrado mejoras en propiedades reológicas de las perlas: se ha documentado un incremento del 20 % en el módulo elástico (G') y una reducción del 30 % en el fenómeno de liberación explosiva o “burst release” durante pruebas en condiciones gastrointestinales simuladas (Barrón Vilchis et al., 2020).

Mucílago de Tamarindo (*Tamarindus indica*)

El mucílago extraído de semillas de tamarindo es uno de los biopolímeros vegetales más estudiados para encapsulación. Contiene una alta proporción de ácido galacturónico, galactosa, xilosa y glucosa, además de grupos funcionales como carboxilos y grupos fenólicos libres, que le confieren propiedades tanto estructurales como antioxidantes (Cortés-Camargo et al., 2023).

Cuando se mezcla con alginato de sodio en proporciones 1:1 o 1:1.5 (p/p), forma microesferas mediante gelación iónica con una retención de aceite de ajonjolí superior al 88 % después de 30 días de almacenamiento a 25 °C, en comparación con 63.5 % en sistemas con alginato solo (Cortés-Camargo et al., 2023). Estas esferas presentan una superficie rugosa, mayor resistencia mecánica y un perfil de liberación más sostenido, ajustado al modelo de Korsmeyer–Peppas con exponente $n < 0.5$.

El mucílago de tamarindo también aporta actividad antioxidante interna, capturando radicales libres generados por la oxidación lipídica, lo que se traduce en una mayor estabilidad oxidativa del aceite encapsulado (Ramírez-Cruz et al., 2019). Además, actúa como emulsionante en la fase oleosa, mejorando la homogeneidad y reduciendo la necesidad de surfactantes adicionales (da Silva et al., 2014).

1.12 Mecanismos y perfiles de liberación de sistemas encapsulados

La liberación controlada (CR, por sus siglas en inglés) de compuestos bioactivos encapsulados es un proceso clave para garantizar su estabilidad, funcionalidad y biodisponibilidad. En sistemas encapsulados, los mecanismos de liberación definen cómo y cuándo se libera el ingrediente activo del material encapsulante, lo que permite adaptar su comportamiento a aplicaciones específicas como liberación dirigida, sostenida o pulsátil. En el diseño de estos sistemas, el entendimiento de los mecanismos de transporte y de los

modelos cinéticos es esencial tanto para formulaciones funcionales como farmacéuticas (Boostani & Jafari, 2021).

1.12.1 Principales mecanismos de liberación

Los mecanismos fundamentales que determinan la cinética de liberación de compuestos activos desde sistemas encapsulados dependen de múltiples factores, entre ellos el tipo de polímero, la estructura de la matriz, la naturaleza del agente encapsulado y las condiciones del medio externo (Boostani & Jafari, 2021; Fredenberg et al., 2011; Mane et al., 2019). En sistemas de encapsulación basados en gelación iónica, como los que emplean alginato, mucílagos o mezclas con pectina, se identifican los siguientes mecanismos principales:

- **Difusión:** Es el mecanismo más prevalente en hidrogeles iónicos. La sustancia encapsulada (p. ej., aceite de ajonjolí) migra desde el interior de la red polimérica hacia el medio circundante impulsada por gradientes de concentración. La tasa de liberación está determinada por el coeficiente de difusión efectivo (D), la densidad de reticulación de la matriz y su grado de hidratación. Según las leyes de Fick, este proceso puede clasificarse en:
 - **Difusión Fickiana** (caso I): ocurre cuando el tiempo de difusión del agente (T_d) es mucho menor que el tiempo de relajación del polímero (T_r), es decir, $T_d \ll T_r$.
 - **Difusión no Fickiana o anómala:** si $T_d \approx T_r$, hay una interacción simultánea de relajación e hinchamiento de la red.
 - **Transporte por relajación dominante (caso II):** sucede cuando $T_r \ll T_d$, siendo gobernado por el hinchamiento de la matriz más que por la difusión simple (Korsmeyer & Peppas, 1984; Siepmann & Peppas, 2001).
- **Erosión:** En polímeros biodegradables o parcialmente solubles, la desintegración progresiva de la matriz lleva a una liberación controlada o retardada del núcleo. Este fenómeno se clasifica como:
 - **Erosión homogénea:** ocurre de manera uniforme en toda la matriz, generalmente en polímeros hidrofílicos.
 - **Erosión heterogénea:** inicia en la superficie externa, común en polímeros hidrofóbicos, y es favorable para la liberación sostenida de compuestos lipofílicos como los aceites vegetales (Fredenberg et al., 2011; Baker & Lonsdale, 1974).

- **Disolución:** Aparece cuando la matriz polimérica se disuelve total o parcialmente en el medio de liberación, facilitando la salida del compuesto activo. Este mecanismo predomina en matrices solubles o con baja reticulación, y puede coexistir con la difusión (Mane et al., 2019). Es frecuente en sistemas encapsulados con biopolímeros como almidón modificado, goma arábiga o pectinas de alta metoxilación.
- **Hinchamiento:** En matrices como los hidrogeles de alginato o mucílago, la absorción de agua desde el medio externo induce una expansión de la red polimérica. Este proceso reduce la densidad de entrecruzamiento local, permitiendo mayor movilidad del agente encapsulado. El hinchamiento modula la difusión y, en casos no Fickianos, se convierte en el principal impulsor de la liberación (Peppas & Sahlin, 1989). Mucílagos de nopal y tamarindo intensifican este fenómeno debido a su elevada capacidad de hidratación (Huerta Hernández, 2020; Ramírez-Cruz et al., 2019).
- **Liberación osmótica y fragmentación:** Este mecanismo ocurre principalmente en sistemas multicapa, microcápsulas tipo core-shell o perlas con gradientes de porosidad. La entrada de agua genera presión osmótica dentro de la cápsula, lo que puede inducir su ruptura controlada o liberación pulsátil. En formulaciones avanzadas, el diseño de capas semipermeables o estructuras sensibles a pH permite liberar compuestos bajo estímulos específicos (Hopfenberg, 1976; Fredenberg et al., 2011).

1.12.2 Tipos de perfiles de liberación

Los sistemas encapsulados pueden exhibir diversos perfiles de liberación dependiendo de su arquitectura estructural, el tipo de polímero encapsulante y las condiciones fisicoquímicas del medio de liberación (Boostani & Jafari, 2021; Mane et al., 2019). Estos perfiles responden a mecanismos físicos como difusión, hinchamiento, erosión o disolución, y son fundamentales para determinar la eficacia de la liberación controlada de compuestos como aceites funcionales, nutraceuticos o fármacos.

- **Liberación inmediata (burst release):** Se caracteriza por una rápida expulsión del compuesto activo en los primeros minutos u horas, lo que ocurre cuando el compuesto se encuentra superficialmente adsorbido o débilmente retenido en las



capas externas de la matriz. Aunque puede ser útil para generar una acción rápida, también conlleva el riesgo de pérdida prematura de compuestos lipofílicos volátiles como los ácidos grasos esenciales (Fredenberg et al., 2011; Huerta Hernández, 2020). En formulaciones de alginato puro, este fenómeno es común, pero puede mitigarse mediante capas externas de quitosano o mucílago (Cortés-Camargo et al., 2023).

- **Liberación sostenida (sustained release):** Este perfil ofrece una liberación prolongada en el tiempo, manteniendo niveles constantes del compuesto activo. En perlas de alginato-mucílago, se observa una liberación sostenida durante más de 24 h, resultado de la estructura semipermeable del hidrogel, el bajo coeficiente de difusión del aceite y la interacción hidrofóbica dentro de la matriz polimérica (Ramírez-Cruz et al., 2019; Díaz Sandoval, 2019). Este perfil es ideal para aplicaciones nutracéuticas donde se busca una absorción progresiva en el tracto gastrointestinal.
- **Liberación retardada (delayed release):** Comienza tras un periodo de latencia o resistencia inicial, lo cual permite que el sistema pase por condiciones adversas, como el medio ácido gástrico, sin liberar su contenido. Este patrón es deseable en formulaciones dirigidas al intestino delgado o colon, y se logra con estructuras multicapa o recubrimientos resistentes al pH ácido (Siepmann & Peppas, 2001). Las pectinas de bajo metoxilo, reforzadas con quitosano, permiten alcanzar este tipo de liberación selectiva (Voragen et al., 2009).
- **Liberación dirigida (targeted release):** Está orientada a liberar el compuesto en un sitio fisiológico específico, por ejemplo, el colon o zonas de inflamación. Se emplean materiales sensibles a receptores biológicos, enzimas o condiciones locales (pH, microbiota). Aunque este tipo de diseño es más común en farmacología, existen reportes preliminares en alimentos funcionales encapsulados con sensibilidad a pH colónico (Boostani & Jafari, 2021). El uso de polímeros como la goma xantana combinada con polisacáridos estructurados permite retardar la liberación hasta alcanzar el pH neutro del intestino.
- **Liberación activada por estímulos (triggered release):** Involucra la respuesta del sistema encapsulado a estímulos internos (pH, temperatura, ROS, enzimas) o externos (luz, ultrasonido, voltaje). Un ejemplo relevante es el de microcápsulas sensibles al pH intestinal ($\text{pH} > 6.8$), que se abren únicamente al alcanzar dicho umbral. Sistemas desarrollados con CaCO_3 + GDL o alginato-pectina modificada

presentan estas características (Peppas & Sahlin, 1989; Mane et al., 2019). Aunque su desarrollo en alimentos aún es incipiente, se proyecta como una vía prometedora en matrices funcionales de liberación intestinal.

1.13 Modelos cinéticos de liberación

Para predecir y ajustar los perfiles de liberación se emplean modelos empíricos, semiempíricos y matemáticos. A continuación, se describen los más relevantes:

Modelos de orden cero, primero y segundo

- Modelo de orden cero: Supone una liberación constante e independiente de la concentración en el sistema. Es típico en sistemas de tipo “reservorio”, donde la matriz libera el bioactivo a una velocidad constante (como en estructuras de capas múltiples o sistemas osmóticos).

Ecuación (1):

$$Q = kt + Q_0$$

Donde

- * Q = Cantidad acumulada de aceite liberada en tiempo t (mg o %)
- * Q_0 = Cantidad inicial de aceite liberado (Usualmente es igual a 0)
- * k = Constante de liberación de orden cero ($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$)
- * t = Tiempo de liberación (h)

- Modelo de primer orden: La velocidad de liberación es proporcional a la cantidad de aceite restante en el sistema. Se observa típicamente en sistemas donde la matriz se degrada progresivamente.

Ecuación (2):

$$Q = Q_0 * (1 - e^{-kt})$$

Donde

- * Q_0 = Cantidad máxima disponible para liberar

* Q = Cantidad acumulada de aceite liberado en el tiempo t

* k_1 = Constante de velocidad de primer orden (h^{-1})

* t = Tiempo de liberación (h)

Este modelo genera una curva exponencial creciente que se aproxima asintóticamente al valor máximo Q_0 .

- Modelo de segundo orden: Describe sistemas donde la tasa de liberación depende del cuadrado de la concentración del aceite restante. Es menos común en la liberación de fármacos, pero útil en ciertos escenarios con reacciones químicas simultáneas o liberaciones enzimáticas complejas.

Ecuación (3)

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_0} + k_2 * t$$

Donde

* Q_0 = Cantidad máxima disponible para liberar

* Q = Cantidad acumulada de aceite liberado en el tiempo t

* k_2 = Constante cinética de segundo orden ($mg^{-1} * h^{-1}$)

* t = Tiempo de liberación (h)

Este modelo se evalúa gráficamente trazando $1/Q$ frente a t , y su validez se verifica si la relación es lineal.

- Difusión: La difusión es el proceso físico mediante el cual las moléculas de un soluto se desplazan desde una región de mayor concentración hacia una de menor concentración. En el contexto de sistemas encapsulados, como microcápsulas o hidrogeles, este fenómeno es el principal mecanismo por el cual un compuesto bioactivo —como el aceite de ajonjolí— escapa del interior de la matriz polimérica hacia el medio externo.

Fundamento teórico

Este proceso está regido por la segunda ley de Fick de la difusión, que establece:

Ecuación (4):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right)$$

Donde

* C = Concentración del soluto (aceite) en la posición x y tiempo t

* t = tiempo (s)

* D = Coeficiente de difusión efectiva (cm^2/s)

* x = Posición a lo largo de la matriz

La solución de esta ecuación, bajo ciertas condiciones de frontera, permite predecir cómo varía la concentración del soluto con el tiempo dentro y fuera de la cápsula.

Tipos de difusión en encapsulados

- Difusión Fickiana (o de tipo I):
Ocurre cuando el transporte del soluto depende únicamente del gradiente de concentración. Es típica en matrices poliméricas rígidas que no se hinchan significativamente.
- Difusión no Fickiana (o anómala):
Acontece cuando el sistema de encapsulación sufre cambios estructurales como hinchamiento, relajación polimérica o erosión de la matriz, interfiriendo con el flujo simple de moléculas. Este comportamiento se ajusta a modelos como Korsmeyer–Peppas, donde el exponente n indica la contribución relativa de la difusión y la relajación de la matriz.
- Difusión controlada por barrera:
En sistemas multicapa o con recubrimientos, la difusión puede ser limitada por una membrana externa semipermeable. La tasa de liberación es menor y más sostenida, lo cual es deseable en liberación prolongada.

Modelos empíricos

- Modelo de Higuchi: Asume una difusión Fickiana en una matriz homogénea. Es adecuado para sistemas donde el bioactivo se libera por difusión pasiva sin degradación de la matriz.

Ecuación (5):

$$Q = kt^{1/2}$$

Donde

* k = Constante de Higuchi (unidad: cantidad/ $\sqrt{\text{tiempo}}$)

Muy usado en matrices poliméricas como hidrogeles o cápsulas de alginato.

- Modelo de Ritger–Peppas (o Korsmeyer–Peppas): Generaliza el modelo de Higuchi y permite distinguir entre mecanismos Fickianos y no Fickianos mediante el exponente n .

Ecuación (6):

$$Qt/Q_{\infty} = kt^n$$

Donde

* Q = Cantidad de aceite liberada en el tiempo t

* Q_{∞} = Cantidad total de aceite liberable (valor en equilibrio)

* $\frac{Qt}{Q_{\infty}}$ = Fracción liberada

* k = Constante cinética que incorpora las características estructurales del sistema

* t = tiempo

* n = Exponente del mecanismo de liberación

– $n < 0.5$: Difusión Fickiana

– $0.5 < n < 1$: Transporte anómalo (difusión + relajación)

– $n = 1$: Liberación por relajación (transporte tipo II)

El valor de n depende de la geometría de la matriz encapsulante (cilindro, esfera o lámina plana). Este modelo es particularmente útil en la evaluación de liberación desde sistemas

encapsulados como hidrogeles, microesferas o microcápsulas y sistemas de liberación oral o transdérmica.

- **Modelo Hixson-Crowell:** Es aplicable en situaciones donde la formula mantiene su forma geométrica durante la disolución, la liberación está controlada por la disolución del sistema y no por la difusión. Además, el tamaño de partícula y forma de la partícula influyen significativamente en la velocidad de disolución.

Ecuación (7)

$$Q^{\frac{1}{3}} = kt + Q_0^{\frac{1}{3}}$$

Donde

- * Q_0 = Cantidad maxima disponible para liberar
- * Q = Cantidad acumulada de aceite liberado en el tiempo t
- * k = Constante de liberación Hixson – Crowell
- * t = Tiempo de liberacion (h)

Este modelo es útil en sistemas donde la superficie activa disminuye progresivamente — como cápsulas o esferas porosas de alginato o mucílago que se degradan en fluidos intestinales. Supone disolución desde una forma sólida cuyo volumen y área cambian con el tiempo.

- **Modelo de Weibull:** Es flexible y se adapta a distintos perfiles (sigmoidal, exponencial, etc.).

Ecuación (8):

$$Q_t = Q_{\infty} \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_i}\right)^{\alpha}} \right)$$

Donde

- * Q_t = Cantidad liberada en el tiempo t
- * Q_{∞} = Liberación total posible
- * T_i = Tiempo de retardo (lag time)
- * α = Parámetro de escala (tiempo característico)

* β = *Parámetro de forma*

Interpretación del parámetro β .

- $\beta = 1$: *Liberación de primer orden*
- $\beta < 1$: *Perfil parabólico (acelerado)*
- $\beta > 1$: *Perfil sigmodal (retardado)*

Es un modelo semiempírico ampliamente utilizado para describir perfiles de liberación complejo, permite ajustar datos experimentales con diferentes formas de curva, dependiendo del valor de β .

- **Modelo de Baker-Lonsdale**

El modelo de Baker–Lonsdale fue desarrollado a partir del modelo de Higuchi, pero adaptado para describir sistemas esféricos de tipo “matriz”, donde el soluto se encuentra distribuido homogéneamente en toda la esfera y se libera por difusión.

Ecuación (9):

$$\frac{3}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{Q_t}{Q_\infty} \right)^{\frac{2}{3}} \right] - \frac{Q_t}{Q_\infty} = kt$$

Donde

- * Q_t = *Cantidad de aceite liberado en el tiempo t*
- * Q_∞ = *Cantidad máxima de aceite que puede liberarse*
- * k = *Constante cinética de liberación*
- * t = *Tiempo*

Este modelo es útil para evaluar perfiles de liberación en microesferas poliméricas como las de alginato o mucílago, cuando el control difusivo es esférico.

- **Modelo Hopfenberg**

Este modelo describe sistemas en los que la liberación está gobernada por la erosión superficial de la matriz polimérica. Es aplicable para formas geométricas simples (planas, cilíndricas, esféricas).

Ecuación (10):

$$\frac{Q_t}{Q_\infty} = 1 - \left[1 - \frac{k_0 t}{C_0 a} \right]^n$$

Donde

- * Q_t = Cantidad de aceite liberado en el tiempo t
- * Q_∞ = Cantidad maxima liberable
- * k_0 = Constante de erosión (relacionada con la tasa de pérdida de masa de la matriz)
- * C_0 = Concentración inicial del bioactivo en la matriz
- * a = Espesor inicial o radio del sistema
- * n = Depende de la geometría del sistema
 - $n = 1$: plano
 - $n = 2$: cilíndrico
 - $n = 3$: esférico

Este modelo es relevante en microcápsulas degradables por condiciones enzimáticas o pH ácido, como aquellas diseñadas para liberar su contenido en intestino delgado o colon

- Modelo de Gompertz

Es útil para describir sistemas de liberación controlada donde existen fases de retardo inicial seguidas de una liberación acelerada y posteriormente una desaceleración, como en ciertos sistemas de liberación en capas o con mecanismos de activación retardada. La forma sigmoidea de la curva permite modelar comportamientos complejos de liberación que no se ajustan adecuadamente a modelos lineales o exponenciales simples.

Ecuación (11):

$$Q_t = Q_\infty * e^{(-e^{b-kt})}$$

Donde

- * Q_t = Cantidad de aceite liberado en el tiempo t
- * Q_∞ = Cantidad maxima de liberación alcanzable
- * k = Constante de velocidad de liberación
- * b = Parámetro de desplazamiento que representa el punto de inflexión de la curva (lag time)

* t = *Tiempo*

Este modelo es particularmente útil para describir sistemas de liberación controlada donde existen fases de retardo inicial seguidas de una liberación acelerada y posteriormente una desaceleración, como en ciertos sistemas de liberación en capas o con mecanismos de activación retardada.

1.14 Tipos de perfiles de liberación

Los sistemas encapsulados pueden exhibir diferentes perfiles de liberación según el diseño estructural y las condiciones del medio:

- Liberación inmediata (burst release): Se caracteriza por una rápida salida del compuesto activo, comúnmente asociada a partículas con activo adsorbido superficialmente o en capas externas del sistema. Es útil cuando se desea una acción rápida, aunque puede representar una pérdida prematura de compuestos liposolubles.
- Liberación sostenida (sustained release): Proporciona una entrega prolongada en el tiempo. En microesferas de alginato-mucílago, se ha observado este patrón debido al entrecruzamiento gradual de la matriz y la baja solubilidad del aceite de ajonjolí en medios acuosos.
- Liberación retardada (delayed release): Inicia después de un tiempo de latencia, útil en sistemas diseñados para resistir condiciones gástricas y liberar su contenido en intestino delgado o colon.
- Liberación dirigida (targeted release): Enfoca la entrega en un sitio fisiológico específico, usando sistemas sensibles al pH, enzimas o receptores. Aunque más común en farmacología, ya se explora en alimentos funcionales dirigidos al colon.
- Liberación activada por estímulos (triggered release): Responde a condiciones externas (luz, temperatura, ultrasonido) o internas (pH, ROS, enzimas). Por ejemplo, microcápsulas sensibles al pH que se abren solo en ambientes intestinales.

Además, son comunes perfiles:

- Bifásicos: Fase rápida inicial (burst release) seguida de una fase lenta y sostenida.
- Trifásicos: Liberación rápida superficial, transición difusiva y posterior erosión de la matriz.



JUSTIFICACIÓN

2 JUSTIFICACIÓN

Los coloides alimentarios despiertan cada vez más interés en la industria alimentaria para satisfacer las demandas y los desafíos modernos de los consumidores. El mercado de hidrocoloides alimentarios se valoró en aproximadamente 9,928.5 millones de dólares en 2021 y se espera que aumente a aproximadamente 13,381.3 millones de dólares para 2028. Los sistemas de administración coloidal, en particular las perlas de hidrogel se centran especialmente en la sostenibilidad, el bienestar y la percepción sensorial. La incorporación exitosa de las perlas de hidrogel al sistema alimentario humano requiere un profundo conocimiento de su producción, propiedades, liberación o mecanismos de disociación en diferentes sitios objetivo.

Se puede diseñar un sistema coloidal (espuma, microcápsula, complejo, hidrogel) para encapsular, transportar, proteger y liberar compuestos funcionales o biológicamente activos como saborizantes, enzimas, antimicrobianos, antioxidantes, nutrientes bioactivos (aceites grasos poliinsaturados), minerales, probióticos, etc. Los hidrocoloides se están enfocando ampliamente en el sistema alimentario porque son seguros, se pueden ajustar fácilmente, pueden ser portadores de una amplia gama de compuestos bioactivos y, lo más importante, pueden modular las propiedades sensoriales y fisicoquímicas de los alimentos.

Los sistemas encapsulados pueden exhibir diversos perfiles de liberación dependiendo de su arquitectura estructural, el tipo de polímero encapsulante y las condiciones fisicoquímicas del medio de liberación. Estos perfiles responden a mecanismos físicos como difusión, hinchamiento, erosión o disolución, y son fundamentales para determinar la eficacia de la liberación controlada de compuestos como aceites funcionales, nutraceuticos o fármacos. Es por ello que es fundamental e importante comprender el proceso de liberación de compuestos bioactivos dentro de matrices encapsuladas como son los hidrogeles.

En la literatura se encuentra una diversidad de modelos matemáticos y empíricos que se han empleado para predecir, comprender y ajustar perfiles de liberación de alimentos y fármacos. Por ende, este trabajo se centra en modelar e interpretar fenomenológicamente perfiles de liberación de aceite de ajonjolí encapsulado en diferentes tipos de perlas de



hidrogel producidas mediante la técnica de gelación iónica empleando alginato de sodio y mucilago de tamarindo como agentes encapsulantes.



PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN



3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Se pueden diseñar a la medida perlas de hidrogel a partir de la interpretación y comprensión del modelamiento de los perfiles de liberación de compuestos bioactivos para garantizar su estabilidad, funcionalidad y biodisponibilidad en la producción de alimentos funcionales?



OBJETIVOS

4 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Modelar e interpretar perfiles de liberación de aceite de ajonjolí encapsulado en perlas de hidrogel obtenidas mediante la técnica de gelación iónica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener experimentalmente perlas de hidrogel conteniendo aceite de ajonjolí mediante la técnica de gelación iónica y empleando alginato de sodio y mucilago de tamarindo como agentes encapsulantes.
- Determinar experimentalmente los perfiles de liberación del aceite de ajonjolí encapsulado en perlas de hidrogel
- Ajustar los perfiles de liberación del aceite de ajonjolí encapsulado en diferentes tipos de perlas de hidrogel mediante diferentes modelos matemáticos y empíricos.
- Comprender e interpretar fenomenológicamente los perfiles de liberación del aceite de ajonjolí encapsulado en diferentes tipos de perlas de hidrogel.



MATERIALES Y MÉTODOS

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 MATERIALES

Se adquirieron semillas de ajonjolí y frutos de tamarindo en un centro comercial de la ciudad de Toluca, Estado de México. Alginato de sodio comercial (AS) fue amablemente donado por la compañía FMC Health & Nutrition (Ciudad de México, México) (Protanal® RF 6650 Alginato). El agua desionizada, reactivos y solventes utilizados fueron grado analítico, comprados en la compañía Sigma Aldrich S.A. de C.V. (Toluca, Estado de México).

5.2 MÉTODOS

5.2.1 Extracción del aceite de ajonjolí

El proceso de extracción del aceite de ajonjolí (AA) se llevo a cabo de acuerdo al método propuesto por Fuente-Ortega et al. (2017). Brevemente, se introdujeron 400 g de semilla dentro de un émbolo de acero inoxidable con dimensiones de 40 cm de largo por 10 cm de diámetro. Posteriormente, el embolo fue puesto en una prensa hidráulica Tamer (modelo PHT-20, Shanghai, China) ejerciendo una presión gradual sobre el pistón de $8.8 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ a temperatura ambiente ($\sim 20^\circ\text{C}$). El aceite extraído se almacenó en frascos ámbar y se acondicionó a 4°C en el interior de un refrigerador comercial.

5.2.2 Extracción del mucílago de tamarindo

Para la extracción del mucílago de tamarindo (MT) se utilizó el método descrito por Alpizar-Reyes et al. (2017). El método consiste en retirar manualmente la cáscara y la pulpa del fruto de manera que se tenga solamente la semilla. Después se trituró y se molió la semilla en un molino de martillos PULVEX 100 MINI 2HP (CD MEX, México). Posteriormente, se realizó una extracción acuosa, tomando 20 g de la semilla en polvo y se adiciono a 1L de agua destilada a 80°C . La dispersión se dejó en agitación continua durante 40 min a 400 rpm. Finalmente, se dejó reposar 24 h a condiciones ambientales ($\sim 20^\circ\text{C}$). Transcurrido este tiempo, la mezcla fue tratada en una centrífuga de alta velocidad marca Hermle Z323 K (Hermle, Alemania) durante 8 min a 300 rpm y el sobrenadante se decantó.



El mucílago extraído se alimentó a un secador por aspersión a nivel planta piloto (Nichols/Niro, NY, EUA) a una tasa de flujo de 40 mL/min a una temperatura de entrada del aire de 135 ± 5 °C, inyectando aire comprimido a 4 bar. El mucílago producido en forma de polvo fue recolectado del fondo del secador y se almacenó en bolsas Ziploc herméticamente selladas.

5.2.3 Producción de perlas de hidrogel por gelación iónica

Los agentes encapsulantes utilizados en este trabajo fueron AS puro y dos mezclas de AS-MT (relación de masa de 1:1 y 1:2). Inicialmente se prepararon dispersiones acuosas de AS (2% w/v) y MT (2% w/v) con agua desionizada y se mantuvieron en agitación mecánica a 400 rpm durante 12 h para garantizar la hidratación completa de los hidrocoloides. Posteriormente, se agregaron 10 g de aceite de ajonjolí por cada 100 g de dispersiones acuosas de hidrocoloide bajo agitación continua con un homogeneizador Ultra-Turrax T50 (IKA®-Werke Works Inc., Wilmington, NC, EUA) a 6400 rpm durante 10 min. Después, se extrajo una muestra de cada dispersión homogeneizada en una jeringa de 10 mL unida con una punta de aguja de 0.70 mm de diámetro (calibre 22) y se goteó en una solución acuosa de 100 mL de CaCl_2 , (2.5% w / v) contenida en un vaso de precipitados con agitación de 250 rpm mediante un agitador mecánico para evitar la aglomeración de las perlas. La punta de la aguja se fijó a 30 cm por encima de la superficie de la solución de reticulación. La tasa de goteo se fijó en 20 gotas/min. La solución gelificante (solución AA-AS-MT/ CaCl_2) se agitó durante 60 min a 20 °C para completar la gelificación y producir las perlas de hidrogel. Finalmente, la solución gelificante se lavó con agua desionizada y se filtró a través de una malla de 355 μm para después ser deshidratados en un horno de convección forzada a 45 °C durante 24 h. Las perlas de hidrogel se almacenaron en frascos ámbar hasta su uso posterior. Las perlas de hidrogel fueron etiquetadas como AS (AS-MT 1:0 w/w), B1(AS-MT 1:1 w/w) y B2 (AS-MT 1:2 w/w).

5.2.4 Perfiles de liberación del aceite de ajonjolí encapsulado en las perlas de hidrogel

Para la evaluación de los perfiles de liberación del aceite encapsulado, esta se llevó a cabo a 25 °C empleando 12 matraces Erlenmeyer de 50 mL colocando un gramo de perlas de hidrogel (previamente lavadas con n-hexano para remover el aceite superficial) y posteriormente se adicionaron 20 mL de n-hexano como medio de extracción del aceite



encapsulado, el sistema encapsulado se sometió a una agitación mecánica lenta. Las perlas agitadas se fueron retirando de los matraces a intervalos de tiempo de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60, 90, 120 y 180 min. Para evaporar el solvente, los sobrenadantes y las perlas se colocaron en un horno a 35 °C y el aceite liberado se calculó por la diferencia de peso entre el peso del aceite eliminado con solvente después del secado y el peso de las perlas.

Finalmente, los perfiles de liberación fueron ajustados con diferentes modelos matemáticos y empíricos que fueron descritos previamente en la sección de antecedentes.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Perfiles de liberación de los sistemas encapsulantes

La tabla 1 presenta los datos experimentales cinéticos obtenidos del porcentaje de liberación de aceite de ajonjolí acumulado para los sistemas AS, B1 y B2 a diferentes tiempos. En todos los casos, se observa una tendencia ascendente, característica de un proceso de liberación. El sistema AS inicia con un valor moderado de liberación en el tiempo cero y muestra incrementos significativos en los primeros 60 minutos, estabilizándose posteriormente. El sistema B1 parte de un valor inicial ligeramente menor que AS y mantiene una progresión constante, aunque con valores más bajos. Por su parte, B2 muestra los menores porcentajes de liberación en todos los tiempos evaluados, lo que sugiere una mayor resistencia a la difusión o una matriz más compacta debido a la presencia del MT como agente estructurante, presumiblemente reduciendo la porosidad de la matriz geloides. La tabla también permite observar que las diferencias entre los sistemas son especialmente marcadas durante los primeros 60 a 90 minutos, etapa crítica en la mayoría de los procesos de liberación, donde suele presentarse la mayor velocidad inicial asociada a fenómenos como el “burst release” y la rápida difusión de compuestos superficiales (Costa y Lobo, 2001).

Tabla 1. Porcentaje acumulado de aceite de ajonjolí liberado a partir de los sistemas AS, B1 y B2 en función del tiempo

Tiempo (min)	AS (%)	B1 (%)	B2 (%)
0	7	6.24	4.90
5	23.37	15.82	13.90
10	35.93	27.54	21.90
15	45.28	38.665	28.90
20	51.92	45.6	35.60
25	57.2	48.39	40.40
30	61.1	51.905	45.20
60	68.5	58.39	51.70
90	74.5	63.1	55.70
120	76.1	64.885	59.60
180	76.9	68.55	64.60

La figura 1 muestra visualmente los perfiles de liberación de los tres sistemas en función del tiempo, lo que permite identificar diferencias en las tasas de liberación y comportamientos cinéticos. La curva correspondiente al sistema AS (verde) es la más elevada, lo que indica una liberación más rápida debido a la alta porosidad presente en el AS. La pendiente de esta curva es pronunciada en los primeros momentos, lo que sugiere una liberación inicial acelerada seguida de una estabilización. En contraste, la curva de B2 (azul) es la más baja y presenta una pendiente más suave, reflejando una liberación lenta y sostenida con el tiempo. La curva de B1 (roja) se posiciona entre las otras dos, indicando un comportamiento intermedio tanto en velocidad como en cantidad de aceite liberado. Las diferencias en la forma y altura de las curvas reflejan las características estructurales de cada sistema y permiten visualizar de manera clara los efectos del tipo de matriz encapsulante.

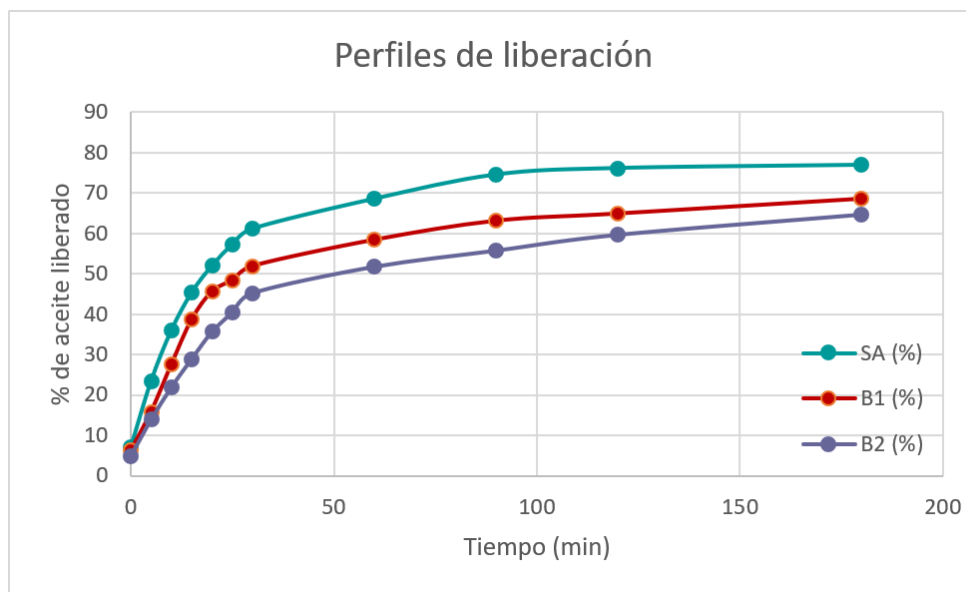


Figura 1. Perfiles de liberación de aceite de ajonjolí de los sistemas AS, B1 y B2 a lo largo del tiempo

La figura muestra visualmente los perfiles de liberación de los tres sistemas en función del tiempo, lo que permite identificar diferencias en las velocidades y comportamientos cinéticos. La curva correspondiente al sistema AS (verde) es la



más elevada, lo que indica una liberación más rápida y eficiente. La pendiente de esta curva es pronunciada en los primeros momentos, lo que sugiere una liberación inicial acelerada seguida de una estabilización. En contraste, la curva de B2 (azul) es la más baja y presenta una pendiente más suave, reflejando una liberación lenta y sostenida en el tiempo. La curva de B1 (roja) se posiciona entre las otras dos, indicando un comportamiento intermedio tanto en velocidad como en cantidad de aceite liberado. Las diferencias en la forma y altura de las curvas reflejan las características estructurales de cada sistema y permiten visualizar de manera clara los efectos del tipo de matriz encapsulante.

La comparación entre los datos cuantitativos de la tabla y la representación gráfica en la figura permite validar y complementar las observaciones. La concordancia entre ambos elementos evidencia que el sistema AS presenta un perfil de liberación más eficiente, mientras que B2 mantiene una liberación más controlada y lenta, y B1 ocupa una posición intermedia. Esta consistencia entre datos numéricos y visuales respalda la confiabilidad del experimento y sienta las bases para el análisis de ajuste a modelos cinéticos en etapas posteriores de la investigación. Además, la representación gráfica permite detectar visualmente posibles comportamientos no lineales o puntos de inflexión, aspectos que pueden ser profundizados al aplicar modelos matemáticos más complejos.

La comparación entre los datos cuantitativos de la tabla 1 y la representación gráfica en la figura 1 permite validar y complementar las observaciones. La concordancia entre ambos elementos evidencia que el sistema AS presenta un perfil de liberación más eficiente, mientras que B2 mantiene una liberación más controlada y lenta, y B1 ocupa una posición intermedia. Esta consistencia entre datos numéricos y visuales respalda la confiabilidad del experimento y sienta las bases para el análisis de ajuste a modelos cinéticos en etapas posteriores de la investigación. Además, la representación gráfica permite detectar visualmente posibles comportamientos no



lineales o puntos de inflexión, aspectos que pueden ser profundizados al aplicar modelos matemáticos más complejos.

6.2 Modelamiento de los perfiles de liberación

6.2.1 Modelo de orden cero

Se graficaron por separado para cada sistema (AS, B1 y B2) los valores de tiempo (min) respecto a los porcentajes acumulados predichos por los modelos ajustados y se aplicó una regresión lineal por mínimos cuadrados a cada par de datos (tiempo, % predicho). De cada ajuste se reportó la ecuación de la recta en forma $y = m \cdot t + b$, donde la pendiente m se interpreta como la tasa media de liberación expresada en porcentaje de aceite por minuto (se incluye entre paréntesis la conversión a porcentaje por hora multiplicando m por sesenta), la ordenada en el origen b corresponde al porcentaje estimado liberado en $t = 0$ y el coeficiente de determinación R^2 cuantifica la calidad y precisión del ajuste.

Figura 2 muestra la liberación acumulada de aceite de ajonjolí con respecto al tiempo (min) para los tres sistemas estudiados (AS, B1 y B2) con la recta de regresión lineal ajustada según el modelo de orden cero. La regresión se obtuvo por mínimos cuadrados en Excel sobre los puntos de porcentaje acumulado frente al tiempo. La pendiente de cada recta representa la tasa media de liberación (porcentaje de aceite liberado por unidad de tiempo), la intersección es el valor predicho por la regresión en tiempo cero y el coeficiente de determinación R^2 indica la fracción de la variabilidad experimental explicada por esa recta.

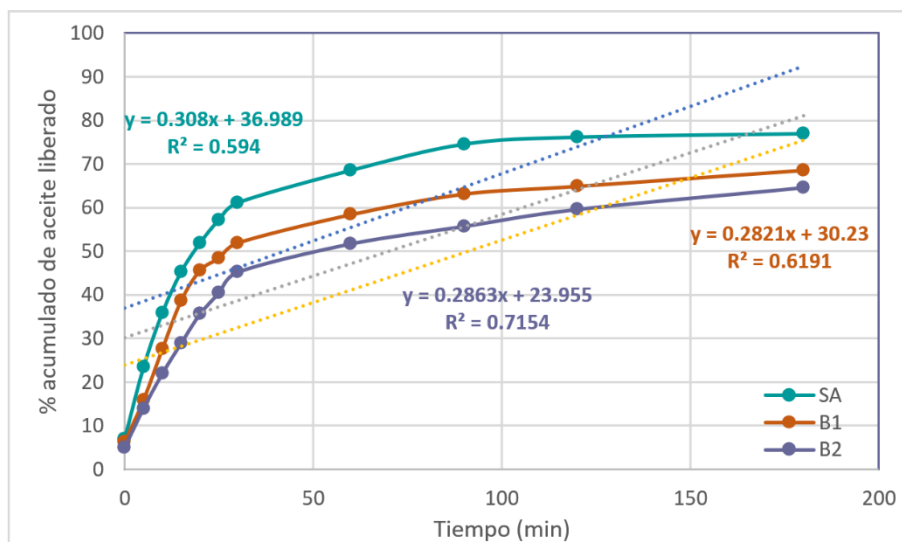


Figura 2. Perfiles de liberación acumulada de aceite de ajonjolí frente al tiempo (min) para los sistemas AS, B1 y B2 (ajuste orden cero)

En la tabla 2 se presentan para cada sistema la pendiente (m) con su unidad, la pendiente convertida a $\% \cdot h^{-1}$, la intersección (b) y el valor de R^2 .

Tabla 2. Parámetros del ajuste lineal de orden cero: pendiente, intersección y R^2 para la tabla.

Sistema	Pendiente ($k \cdot 10^5$ (%/min))	Intersección Q_0 (%)	R^2
AS	0.308	36.989	0.594
B1	0.282	30.231	0.619
B2	0.286	23.955	0.715

El ajuste de orden cero aporta una idea simple de la tasa media, pero no captura la complejidad temporal de las curvas experimentales. En AS la pendiente más alta muestra que la tasa media de liberación es mayor que en los otros sistemas; sin embargo, la intersección ajustada sobreestima el porcentaje medido al tiempo cero, lo que revela la presencia de un efecto de liberación inicial acelerada (burst release) seguido de una desaceleración. Esa diferencia entre el valor experimental inicial y la intersección del ajuste confirma que la cinética del sistema AS es claramente no lineal y que la recta lineal tiende a “promediar” fases con mecanismos distintos, de ahí que el R^2 quede en un valor intermedio y el ajuste sea solo parcial. En B1 la



pendiente y la intersección también muestran una liberación relativamente rápida, pero algo inferior a AS, y el R^2 refleja un ajuste moderado: B1 parece comportarse de modo mixto, con una fase inicial marcada que luego tiende hacia meseta. En B2 la curva es la más suavizada y la recta lineal ajusta mejor (mayor R^2), lo que sugiere una matriz que ofrece una mayor barrera al transporte o una menor fracción de aceite accesible en la superficie, de modo que su liberación es más gradual y se aproxima en el intervalo estudiado a una tasa media constante.

Desde el punto de vista físico, lo observado es coherente con lo esperado en matrices poliméricas: el “burst release” inicial suele relacionarse con compuestos localizados en la superficie o en zonas de fácil acceso, mientras que la fase posterior queda gobernada por procesos más lentos como difusión a través de la red polimérica, hinchamiento o erosión. En este contexto, AS parece presentar mayor porosidad o menor reticulación, lo que facilita la salida rápida del aceite; B2 parece tener una estructura más restrictiva, lo que conduce a una liberación más sostenida. Estas interpretaciones concuerdan con la literatura sobre cómo la microestructura y la composición de la pared afectan la liberación en perlas de gel iónico, y en particular con lo reportado por Cortés-Camargo et al. (2023), que muestran cómo variaciones microestructurales influyen en la cinética de liberación.

6.2.2 Modelo de primer orden

Para el ajuste al modelo cinético de primer orden, se organizaron los datos experimentales de tiempo y fracción de aceite liberada en una hoja de cálculo de Excel. La fracción liberada se transformó aplicando el logaritmo natural a la cantidad no liberada, es decir, a uno menos la fracción acumulada. Posteriormente, se graficaron estos valores transformados frente al tiempo y se realizó un ajuste lineal por mínimos cuadrados, obteniendo así la pendiente y la intersección de la recta. La pendiente negativa se asoció con la constante cinética de liberación, mientras que el coeficiente de determinación permitió evaluar la calidad del ajuste. Este

procedimiento se repitió para cada sistema encapsulado, manteniendo un tratamiento uniforme de los datos para asegurar la comparabilidad de resultados.

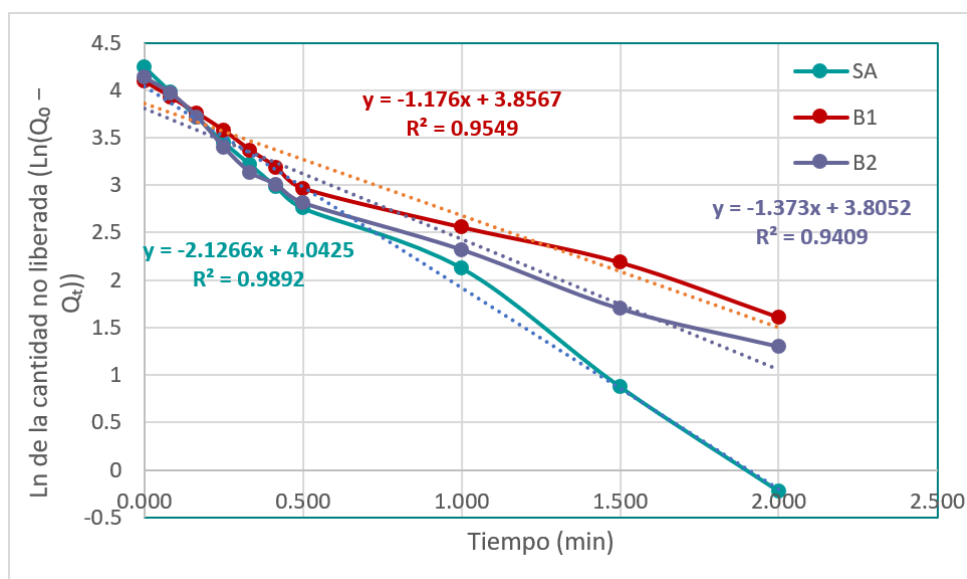


Figura 3. Perfiles de liberación acumulada de aceite de ajonjolí frente al tiempo (min) para los sistemas AS, B1 y B2 (ajuste primer orden)

La gráfica obtenida a partir del ajuste linealizado muestra una tendencia bastante clara para los tres sistemas. Se observan líneas rectas bien definidas, lo que indica que hay una buena relación entre el tiempo y el logaritmo de la fracción no liberada. El valor alto del coeficiente de determinación respalda esto, ya que confirma que el modelo de primer orden describe bien el comportamiento de los datos en esta forma linealizada. Además, este tipo de gráfica hace más sencillo interpretar la constante de velocidad y comparar directamente entre formulaciones, algo que también se ha señalado en trabajos como el de Costa y Lobo (2001).

Por otro lado, no se incluye la gráfica obtenida con el método de Solver. Aunque este método permite ajustar varios parámetros al mismo tiempo, en este caso el resultado no representó bien la tendencia de los datos experimentales. La gráfica mostraba mayor dispersión y un menor ajuste en comparación con la linealización. Incluirla podría llevar a confusiones, ya que no refleja de forma clara la relación entre

el tiempo y la liberación acumulada. Además, al tener un menor valor de ajuste, no resulta adecuada para comparar los sistemas de manera confiable. Por eso, se decidió trabajar únicamente con la gráfica linealizada, que mantiene una mejor coherencia tanto en lo matemático como en lo experimental.

Tabla 3. Parámetros del ajuste lineal de primer orden realizados con Solver

Sistema	$(k \cdot 10^5 \text{ (\%/min)})$	$Q_0 \text{ (\%)}$	R^2
AS	3.707307634	74.32497702	0.521
B1	2.68378252	59.71449458	0.547
B2	3.419821893	64.54068877	0.472

En el ajuste realizado con Solver, los tres sistemas presentaron constantes cinéticas elevadas en comparación con otros métodos, pero con coeficientes de determinación bajos, lo que indica una limitada capacidad del modelo para explicar la variabilidad de los datos. Esto sugiere que, aunque Solver optimiza simultáneamente Q_0 y k para minimizar el error cuadrático medio, la dispersión experimental y la cercanía de los valores de liberación final a Q_0 pudieron haber reducido la fiabilidad del ajuste. En particular, el modelo parece sobrestimar la velocidad de liberación en las primeras etapas, lo que podría derivar en interpretaciones poco representativas del comportamiento real de los sistemas.

Tabla 4. Parámetros del ajuste lineal de primer orden

Sistema	$(k \cdot 10^5 \text{ (\%/min)})$	$Q_0 \text{ (\%)}$	R^2
AS	2.126	56.968	0.989
B1	1.176	47.308	0.964
B2	1.373	44.934	0.94

Por su parte, el ajuste linealizado mostró valores de Q_0 menores y constantes cinéticas más bajas, pero con coeficientes de determinación elevados, cercanos o superiores al 90% (Tabla 4). Esto refleja que el modelo linealizado se adaptó de forma más consistente a la tendencia experimental, proporcionando una descripción más estable de la cinética. La mayor precisión estadística sugiere que esta



aproximación es menos sensible a la dispersión puntual y ofrece parámetros más coherentes para comparar entre sistemas, especialmente cuando la liberación progresa de manera regular a lo largo del tiempo.

En el caso del sistema AS, el ajuste mediante Solver produjo un valor de la constante cinética notablemente mayor que el obtenido con la linealización, acompañado de un Q_0 también superior. Este comportamiento indica que el modelo no lineal optimizado pudo estar sobrestimando la velocidad de liberación debido a la dispersión de los datos y al bajo coeficiente de determinación obtenido. Por el contrario, el método linealizado arrojó un ajuste mucho más consistente, con un R^2 cercano a la unidad, lo que sugiere que para este sistema la aproximación lineal captura de manera más precisa la tendencia de los datos. Esto coincide con lo señalado por Costa & Lobo (2001), quienes reportan que los modelos linealizados pueden describir de forma más robusta sistemas con liberación progresiva y bien distribuida en el tiempo.

En el sistema B1 se observa un patrón similar, aunque más acentuado en la discrepancia entre métodos. El ajuste con Solver muestra un Q_0 claramente superior al derivado de la linealización, pero con un R^2 bajo que pone en duda la representatividad del modelo no lineal. La linealización, por su parte, ofrece un valor de k menor, coherente con una liberación más lenta, y un coeficiente de determinación elevado que respalda la validez del ajuste. Esto sugiere que en este caso el modelo linealizado se adapta mejor a los datos experimentales, probablemente por una menor dispersión relativa en los puntos iniciales de liberación.

En el sistema B2, aunque los valores de k y Q_0 difieren entre ambos métodos, la diferencia en la capacidad de ajuste es más clara. El método linealizado nuevamente presenta un R^2 alto, mientras que el modelo ajustado con Solver mantiene un coeficiente de determinación bajo. Esto indica que el modelo no lineal pudo haber sido afectado por la cercanía de los valores de Q_{obs} a Q_0 en tiempos



avanzados, situación en la que el logaritmo empleado en la forma linealizada es especialmente sensible. La comparación de los tres sistemas muestra que, en este conjunto de datos, la linealización ofrece resultados más estables y consistentes, mientras que el uso de Solver podría estar condicionado por la distribución y dispersión de los datos, lo que resalta la importancia de evaluar no solo los parámetros obtenidos, sino también la calidad estadística del ajuste.

6.2.3 Modelo de segundo orden

El modelo cinético de segundo orden se basa en la premisa de que la velocidad de liberación es proporcional al cuadrado de la cantidad de compuesto que permanece retenido en la matriz, lo que lo hace apropiado para describir procesos donde existen interacciones más fuertes entre el aceite encapsulado y la red polimérica. Matemáticamente, este modelo se expresa en su forma linealizada como la relación entre el inverso de la fracción liberada acumulada y el tiempo, de modo que la pendiente de la recta obtenida corresponde a la constante de velocidad de segundo orden y la ordenada al origen representa el inverso de la cantidad máxima liberable.

Para evaluar este modelo, los datos experimentales de liberación acumulada se transformaron en su recíproco ($1/Q_t$) y se graficaron frente al tiempo en horas, aplicando regresión lineal por el método de mínimos cuadrados en Excel. De esta manera se obtuvieron los parámetros cinéticos y el coeficiente de determinación correspondiente. Este procedimiento no requiere pasos adicionales de linealización logarítmica como en el caso del modelo de primer orden, dado que la propia ecuación ya adopta una forma lineal directa. Al utilizar la formula descrita en el modelo, es decir, la Ecuación (3), se obtuvieron los siguientes resultados. En este caso a diferencia del modelo de primer orden no se recurrió a una linealización de la formula debido a que se puede hacer una regresión lineal directa de $1/Q_0$ en (y) y t en (x). La pendiente será k_2 y la ordenada al origen será $1/Q_0$. No hay necesidad de trabajar con la ecuación linealizada pues ya se trabaja con ella desde un inicio.

Al analizar los resultados obtenidos para los sistemas de estudio, se observó que las pendientes generadas resultaron negativas en algunos casos y los valores de R^2 fueron considerablemente bajos, lo que sugiere que el modelo de segundo orden no describe adecuadamente el comportamiento de liberación. Esta discrepancia se ve reflejada en la falta de coincidencia entre las curvas experimentales y las predichas por el modelo, lo que indica que la liberación no sigue una cinética de segundo orden. Esto es consistente con lo reportado por estudios previos, donde la liberación de aceites encapsulados en matrices poliméricas se ajusta mejor a modelos basados en difusión, como Higuchi o Ritger–Peppas, o a funciones empíricas más flexibles como Weibull (Cortés-Camargo et al., 2023).

En consecuencia, aunque el modelo de segundo orden fue considerado en este trabajo para fines comparativos, los resultados estadísticos y gráficos permiten concluir que su aplicabilidad es limitada frente a los sistemas analizados, y que es necesario contrastarlo con modelos alternativos para explicar de manera más adecuada la cinética de liberación observada.

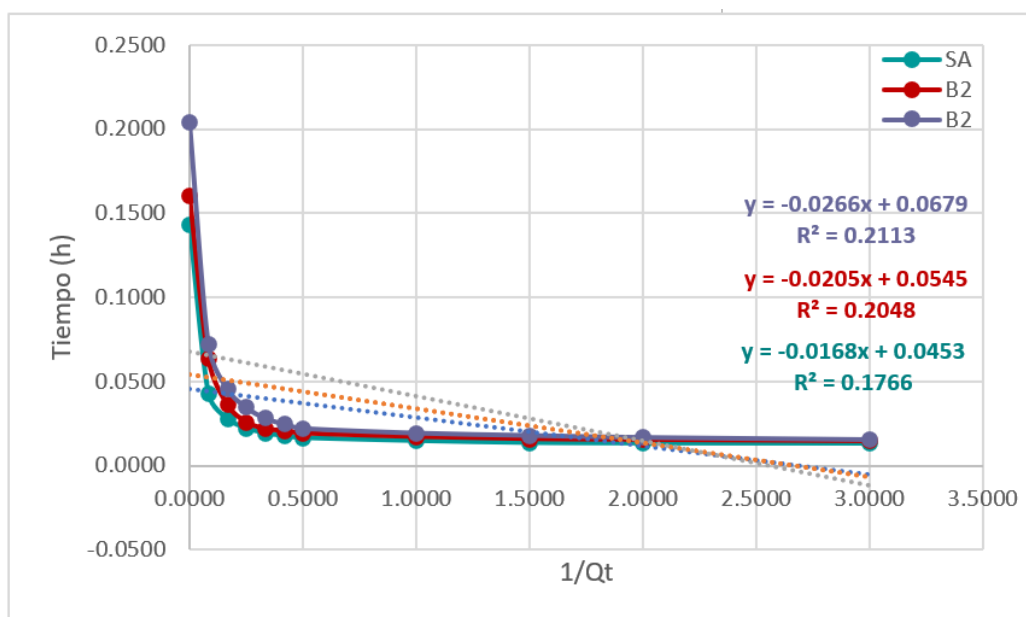


Figura 4. Perfiles de liberación acumulada de aceite de ajonjolí frente al tiempo (horas) para los sistemas AS, B1 y B2 (ajuste segundo orden)

El procedimiento consistió en transformar los valores de liberación acumulada (Q_t) calculando su inverso ($1/Q_t$) para cada intervalo de tiempo, además de convertir el tiempo experimental a horas. Posteriormente, se elaboró una gráfica de dispersión donde el eje horizontal representa $1/Q_t$, mientras que el eje vertical corresponde al tiempo de liberación. Para cada formulación se añadió una línea de tendencia lineal, obteniendo la ecuación de ajuste y el coeficiente de determinación (R^2), el cual permite evaluar qué tan bien el modelo describe el comportamiento experimental.

Los resultados mostraron que los tres sistemas presentaron valores bajos de R^2 , todos menores a 0.25, lo que indica que la relación entre $1/Q_t$ y el tiempo no es lineal y, por lo tanto, el modelo de segundo orden no representa adecuadamente la liberación del aceite en estas formulaciones. Además, las pendientes negativas obtenidas carecen de significado físico en un proceso de liberación acumulativa, ya que implicarían una disminución de la liberación con el tiempo, lo cual no corresponde al comportamiento real del sistema.

En comparación con otros modelos cinéticos más comunes, como el de orden cero, primer orden o aquellos basados en difusión (por ejemplo Higuchi o Korsmeyer–Peppas), el modelo de segundo orden suele ser menos adecuado para hidrogeles de alginato, donde el mecanismo dominante generalmente está controlado por difusión a través de la red polimérica. Por ello, estos resultados respaldan que la liberación del aceite encapsulado no sigue una cinética de segundo orden, siendo necesario emplear modelos alternativos para describir de manera más precisa el mecanismo predominante.

Sistema	$m=k_2 (h^{-1})$	b	Q0	R^2
SA	0.0168	0.0453	22.075	0.1766
B1	0.0205	0.0545	18.349	0.2048
B2	0.0266	0.0679	0.0679	0.2113

Tabla 5. Parámetros del ajuste lineal de segundo orden

En la Tabla 5 se resumen los parámetros obtenidos del ajuste al modelo cinético de segundo orden para los sistemas SA, B1 y B2. Aunque fue posible calcular los valores de la constante cinética k_2 y la cantidad máxima teórica disponible para liberar (Q_0), los coeficientes de determinación obtenidos fueron bajos en todos los casos ($R^2 < 0.25$), lo que evidencia un ajuste deficiente del modelo a los datos experimentales. Además, los valores estimados de Q_0 resultaron inconsistentes con la liberación máxima observada experimentalmente, lo que refuerza que este modelo no describe adecuadamente el comportamiento de liberación del aceite encapsulado. Por lo tanto, se concluye que la liberación del aceite de ajonjolí en estos sistemas no sigue una cinética de segundo orden, siendo más apropiado considerar modelos alternativos asociados a mecanismos dominados por difusión.

6.3 Difusión

La liberación de aceite desde los sistemas encapsulados también fue analizada mediante el modelo de difusión de Fick, el cual describe el transporte de masa controlado por gradientes de concentración. Este modelo se aplica en la fase inicial de liberación, cuando la fracción liberada no supera el 60 % del total, y permite evaluar si el proceso sigue un comportamiento difusivo típico. Para ello, los valores de la fracción liberada acumulada respecto al máximo alcanzado (M_t/M_∞) se graficaron en función de la raíz cuadrada del tiempo. Si el ajuste lineal obtenido presenta un coeficiente de determinación elevado, se considera que el sistema sigue una cinética de difusión Fickiana en esta primera etapa. De esta manera, fue posible comparar los tres sistemas estudiados (AS, B1 y B2) y establecer diferencias en la velocidad de difusión asociadas a la formulación del hidrogel.

Como se observó antes la solución para sistemas de liberación controlada a corto plazo cuando $M_t/M_\infty < 0.6$ es:

Ecuación (4)

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} * \sqrt{\frac{D * t}{L^2}}$$

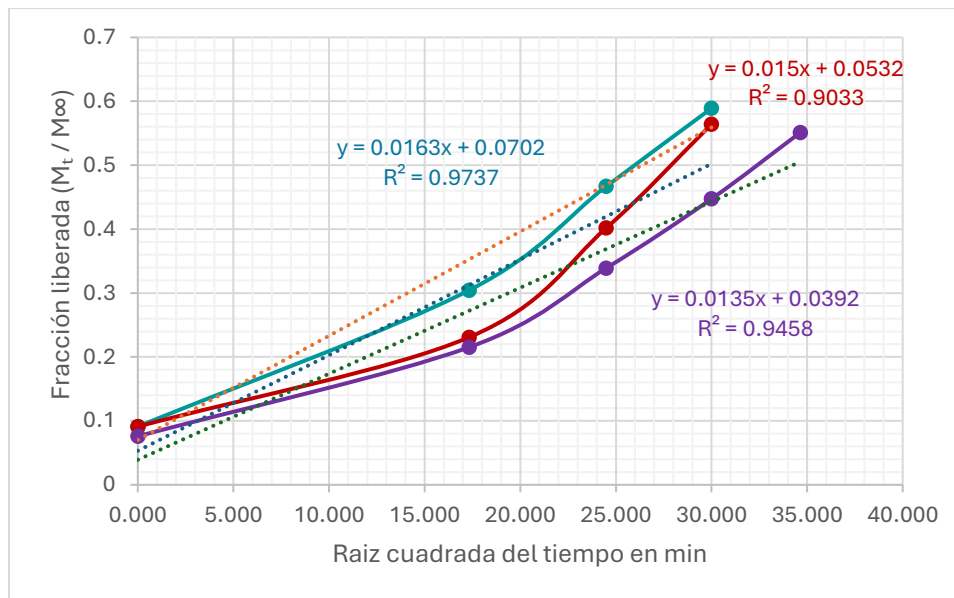


Figura 5. Ajuste del modelo de difusión de Fick para los sistemas AS, B1 y B2

En la figura 5, la línea verde corresponde al sistema AS y muestra la mejor correlación con el modelo de Fick, con un coeficiente de determinación cercano a la unidad, lo que confirma que en la fase inicial la liberación está gobernada principalmente por un mecanismo difusivo. La pendiente de la recta, que en este modelo se relaciona con el parámetro K y por ende con la razón de difusión D/L^2 , es ligeramente mayor que en los otros sistemas, lo que indica que la difusión del aceite ocurre de forma más rápida en este caso. La línea roja corresponde al sistema B1 y aunque también presenta un comportamiento difusivo, su ajuste al modelo es menos preciso, como lo indica el coeficiente de determinación más bajo en comparación con AS. Esto sugiere que en este sistema otros procesos adicionales, como relajación de la matriz o interacción entre el aceite y el polímero, pueden estar influyendo en la liberación. Aun así, la pendiente relativamente alta señala que la difusión es eficiente, aunque menos controlada que en AS. Finalmente, la línea morada representa al sistema B2, el cual exhibe un ajuste intermedio con respecto a los anteriores. Su pendiente es menor, lo que implica una velocidad de difusión más lenta, probablemente asociada a una matriz más compacta o a interacciones más fuertes que dificultan el paso del aceite hacia el

medio externo. Sin embargo, el coeficiente de determinación relativamente elevado confirma que la fase inicial de liberación también sigue un patrón gobernado por difusión de tipo Fickiano.

Tabla 6. Parámetros de difusión calculados para los sistemas AS, B1 y B2.

Sistema	$D/L^2(s^{-1})$	k	Dreal (cm ² /s)
AS	5.22E-05	0.163	4.992E-08
B1	4.42E-05	0.015	4.594E-08
B2	3.58E-05	0.0135	4.134E-08

En base a lo anterior, los sistemas encapsulados (Tabla 6) sí siguen una difusión Fickiana en la fase inicial (hasta 60 % liberado). Por ejemplo, para el sistema AS, el valor de $D/L^2 \approx 5.21 \times 10^{-5}$ indica una difusión moderada. Si llegáramos a conocer el espesor L del hidrogel, podemos despejar D y con ello conocer su valor real; sin embargo este no se menciona en ningún apartado por lo que para no dar valores erróneos o solo aproximados, se dejara de esta forma. Ninguna de las tesis da un valor numérico para “L” más allá del diámetro de las perlas, aunque con esto lo habitual es tomar L = radio ($\frac{1}{2}$ diámetro) o, si se emplea el modelo de lámina, 2L = diámetro.

Para el caso del diámetro de las perlas Cortés-Camargo et al. (2023) midieron diámetros de 2,06–2,19 mm para perlas de AS–MT 1:1.5.

- Todos los sistemas siguen difusión Fickiana (tipo I) en la etapa inicial

La linealidad del ajuste entre M_t/M_∞ con valores altos de $R^2(> 0.90)$ indica que los tres sistemas obedecen una cinética de difusión Fickiana en los primeros 30–45 minutos. Esto implica que el transporte del aceite encapsulado depende principalmente del gradiente de concentración y no hay evidencia de hinchamiento, degradación o relajación polimérica significativa durante ese periodo. Esta situación



es típica de matrices poliméricas rígidas o estructuras densas como alginato con bajo contenido de mucílago o baja hidratación.

En el caso de AS presenta la mayor velocidad de difusión relativa, probablemente por una estructura más porosa o menos compacta. Puede tener una red de gel menos densa o menor proporción de mucílago. B1 por su parte muestra una moderada velocidad de difusión. Su estructura podría tener una reticulación intermedia que ralentiza un poco el transporte. Por ultimo B2 exhibe la menor movilidad del aceite. Posiblemente contiene mayor proporción de mucílago, mayor viscosidad o una matriz más densa que actúa como barrera.

En función de los valores de D/L^2 , se concluye que los sistemas SA, B1 y B2 presentan un mecanismo de liberación predominantemente Fickiano (tipo I) durante la etapa inicial (< 0.6 de fracción liberada). La diferencia entre coeficientes refleja variaciones estructurales en las formulaciones que afectan la porosidad, viscosidad o densidad de la matriz polimérica. B2, con el valor más bajo, sugiere un sistema más adecuado para liberación sostenida, mientras que SA libera más rápidamente en las primeras fases, lo cual puede ser útil en aplicaciones donde se busca una acción rápida del bioactivo.

Como se usó la ley de Fick para un sistema plano y se restringió el ajuste al intervalo $M_t/M_\infty \leq 0.6$, el comportamiento se interpreta como difusión Fickiana pura (también llamada tipo I o controlada por gradiente).:

AS > B1 > B2 en coeficiente de difusión.

Esto sugiere que AS tiene una matriz menos densa o menos entrecruzada, lo que permite mayor movilidad del aceite. B2, al tener menor D, tiene una estructura más compacta o con mayor contenido de mucílago, lo que impide la salida rápida del aceite encapsulado. Estos valores son coherentes con los obtenidos de los ajustes tipo primer orden y Higuchi, donde SA también presentaba liberación más rápida. Además, los valores están en el rango típico de difusión de compuestos lipofílicos en hidrogeles densos (10^{-8} a 10^{-7} cm²/s), lo cual valida los resultados.

6.4 Modelo de Higuchi

El modelo de Higuchi es uno de los más utilizados para describir la liberación de compuestos desde matrices poliméricas, ya que asume un proceso gobernado por difusión pasiva en un sistema homogéneo. Bajo este enfoque, la cantidad liberada se relaciona linealmente con la raíz cuadrada del tiempo, lo que permite obtener una constante de Higuchi que refleja la velocidad de transporte del aceite en cada formulación.

En el presente caso, se aplicó este modelo a los tres sistemas evaluados (AS, B1 y B2) y se obtuvieron ajustes lineales con coeficientes de determinación elevados, lo que confirma que la cinética de liberación está dominada por difusión. La pendiente de cada recta, correspondiente a la constante de Higuchi, mostró una tendencia decreciente en el orden $AS > B1 > B2$, indicando que la presencia de mucílago y el grado de entrecruzamiento en las formulaciones modifican la resistencia al transporte del aceite. Estos resultados permiten interpretar que, aunque en todos los casos la liberación sigue un mecanismo difusivo, la estructura de la matriz controla en diferente medida la velocidad del proceso.

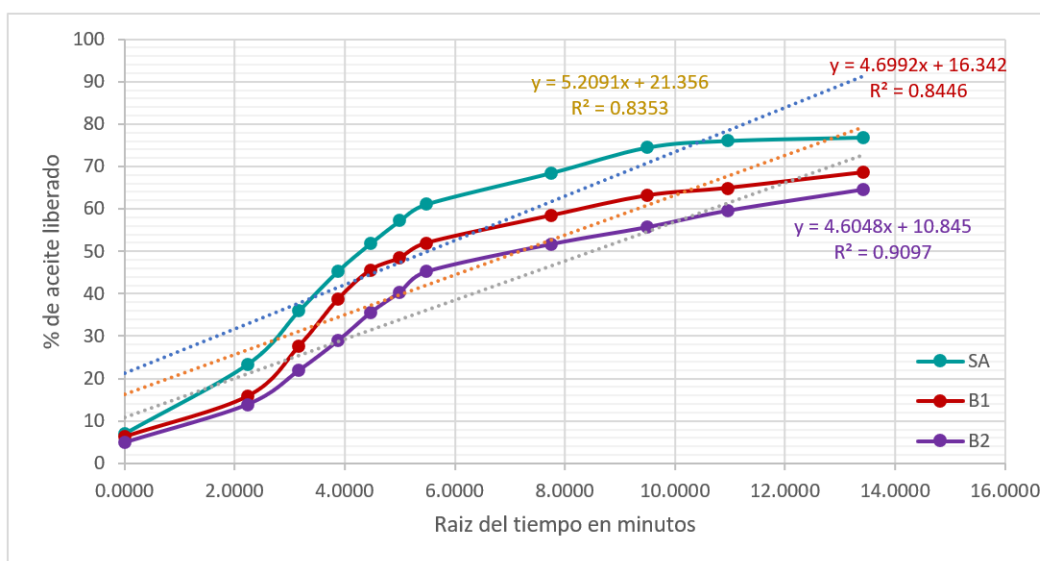


Figura 6. Ajuste del modelo de Higuchi para los sistemas AS, B1 y B2



El modelo de Higuchi confirma un transporte por difusión pasiva en una matriz homogénea para los tres sistemas. La constante k decrece en el orden $AS > B1 > B2$, reflejando el efecto retardante del mucílago y del grado de entrecruzamiento sobre la liberación de aceite.

En la Figura 6 se observa la aplicación del modelo de Higuchi a los tres sistemas de liberación evaluados, donde los datos experimentales se representaron en función de la raíz cuadrada del tiempo y se ajustaron mediante regresiones lineales. Los tres sistemas mostraron un comportamiento lineal con coeficientes de determinación relativamente altos, lo que indica que la liberación del aceite sigue un mecanismo predominantemente difusivo. Sin embargo, se identifican diferencias en las pendientes de las rectas, correspondientes a la constante de Higuchi, que reflejan la velocidad de transporte en cada formulación. El sistema AS presentó la pendiente más elevada, lo cual indica un transporte más rápido del aceite a través de la matriz, mientras que B1 y B2 mostraron valores menores, evidenciando un efecto de retardo en la liberación. Este patrón sugiere que la presencia de mucílago y un mayor grado de entrecruzamiento polimérico reducen la movilidad del aceite dentro del hidrogel, actuando como barreras difusivas adicionales.

Estos resultados coinciden con lo reportado en la literatura, donde se ha señalado que el modelo de Higuchi describe adecuadamente sistemas de liberación gobernados por difusión pasiva en matrices poliméricas, particularmente en hidrogeles y cápsulas de alginato. Por ejemplo, Cortés-Camargo et al. (2023) encontraron que la liberación de compuestos bioactivos encapsulados en matrices de alginato y mucílago también se ajusta de manera satisfactoria a este modelo, destacando que la disminución en la pendiente se relaciona directamente con el grado de compactación y la resistencia de la matriz al transporte del soluto. De manera similar, trabajos previos han mostrado que el aumento en la densidad de entrecruzamiento y la incorporación de biopolímeros como mucílago disminuyen la constante de Higuchi, lo que coincide plenamente con los resultados aquí obtenidos.

Tabla 7. Parámetros cinéticos del modelo de Higuchi aplicados a los sistemas de liberación.

Sistema	k	Fracción %	D (cm ² /min)	D (cm ² /min)
AS	5.21E+00	76.9	3.973E-05	6.622E-07
B1	4.70E+00	68.55	4.069E-05	6.782E-07
B2	4.60E+00	64.6	4.400E-05	7.333E-07

Los resultados de la tabla se obtuvieron considerando como en el modelo anterior un diámetro de 2.1 cm y utilizando la siguiente fórmula para calcular el coeficiente de difusión efectivo.

Ecuación (5)

$$D = \left(\frac{kL\sqrt{\pi}}{2Q_{\infty}} \right)^2$$

A partir de los valores de la constante de Higuchi k, de la fracción liberable máxima (Q_{∞}) y del coeficiente de difusión efectivo D (en cm²/s), podemos concluir lo siguiente:

- AS presenta la pendiente de Higuchi más alta, indicando una liberación inicial más rápida por difusión pasiva que las mezclas con mucílago.
- La eficiencia de liberación total decrece al incrementar la proporción de mucílago, probablemente por una red polimérica más densa o mayor retención del aceite.
- Curiosamente, al convertir a cm²/min, pese a la menor pendiente k de B1/B2, su D calculado resulta ligeramente mayor que AS. Esto sugiere que, aunque el perfil global de liberación (capturado en k) es más lento



con mucílago, la difusividad intrínseca aparente relacionada con la microestructura y L no disminuye drásticamente y puede incluso ser marginalmente superior en B1/B2, debido a porosidad o canales formados por el mucílago.

AS libera rápido y alcanza casi el 77 % de aceite disponible, pero su red relativamente homogénea limita el coeficiente de difusión aparente. B1 y B2, al incorporar mucílago, reducen la cantidad total de aceite liberable (eficiencia), moderan la velocidad inicial (menor k), pero mantienen o incluso incrementan levemente el coeficiente de difusión D . Esto implica que el mucílago introduce microcanales o heterogeneidades que pueden facilitar la difusión local, pero simultáneamente aumentan la retención global del aceite en la matriz. Al diseñar sistemas de gelación iónica para liberación prolongada de aceites lipofílicos, la adición de mucílago puede servir para controlar la cantidad total liberada y suavizar el perfil inicial, sin comprometer en exceso la difusividad necesaria para un suministro continuo.

6.5 Modelo de Ritger–Peppas (o Korsmeyer–Peppas)

Para complementar el análisis de la liberación de aceite se empleó el modelo de Ritger–Peppas, el cual es ampliamente utilizado para describir sistemas de matriz polimérica donde la cinética no siempre responde a un único mecanismo y puede estar controlada tanto por difusión como por relajación de la red polimérica. En este caso, el modelo se aplicó tomando los datos experimentales de liberación acumulada y normalizándolos respecto a la fracción máxima liberada. Posteriormente, se trabajó únicamente con la parte inicial del perfil, correspondiente a valores menores al 60 % de liberación, que es la zona de validez del modelo, con el fin de evitar interferencias por efectos secundarios en etapas tardías.

A partir de esta normalización se transformaron los datos a su forma logarítmica y se realizó un ajuste lineal por mínimos cuadrados en Excel, del cual se obtuvieron los dos parámetros característicos: la pendiente, que corresponde al exponente de difusión, y la ordenada al origen, que está asociada a la constante cinética del

sistema. En el caso del sistema AS, el valor del exponente fue cercano a 0.31, lo que claramente indica que el proceso de liberación estuvo dominado por un mecanismo de difusión Fickiana a través de la matriz de alginato, sin una contribución significativa de hinchamiento o erosión. El valor de la constante fue coherente con una cinética moderada, mientras que el coeficiente de determinación obtenido mostró que el ajuste fue adecuado aunque no perfecto, lo que se explica por la presencia de un ligero efecto de liberación inicial rápida y por heterogeneidades propias de la red polimérica.

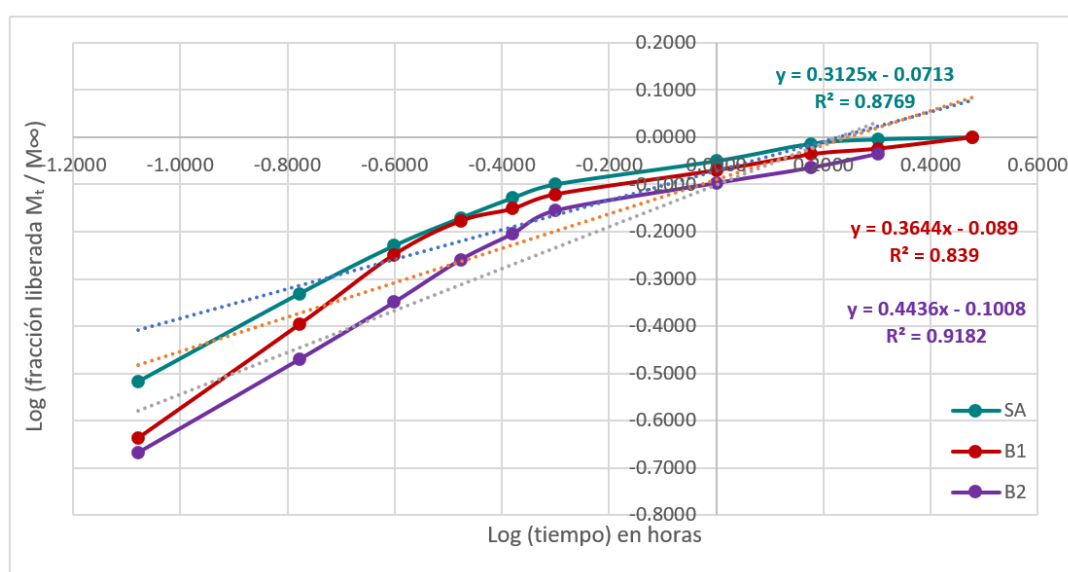


Figura 7. Ajuste del modelo de Ritger–Peppas para los sistemas AS, B1 y B2

Para la obtención de la constante cinética se utilizó la pendiente de los sistemas, en el caso de AS sería -0.0713 y se prosigue con la relación $k = 10^{-0.0713}$ dando como resultado el valor reportado en la Tabla 5. Se siguió exactamente la misma metodología para los dos sistemas restantes. Se puede observar en la Figura 7 que el ajuste del modelo es razonablemente bueno, aunque no perfecto para los tres sistemas analizados. Refleja que el modelo de Ritger–Peppas capta bien la tendencia difusiva. Esta dispersión podría atribuirse a un efecto de liberación inicial rápida o “burst” y a posibles heterogeneidades en la red polimérica, aspectos que suelen reportarse en la literatura para sistemas encapsulados en hidrogeles de alginato (Siepmann & Peppas, 2011).

En la Figura 7 se aprecia que las curvas ajustadas siguen de manera adecuada la tendencia experimental, lo que confirma que el modelo capta el comportamiento difusivo de los sistemas. Sin embargo, la precisión no es absoluta debido a que este modelo simplifica el proceso real al considerar únicamente la contribución difusiva sin contemplar en detalle interacciones estructurales de la matriz. Aun así, la información obtenida es de gran valor para describir la fase inicial de liberación.

Tabla 8. Parámetros de ajuste del modelo de Korsmeyer–Peppas para la liberación de aceite de ajonjolí.

Sistema	n	k (h^{-n})	R
AS	0.3125	0.84	0.876
B1	0.3644	0.82	0.839
B2	0.4067	0.76	0.901

El análisis conjunto de los tres sistemas muestra que los exponentes de difusión (n) fueron menores a 0.5 en todos los casos, lo que indica que la liberación del aceite de ajonjolí estuvo controlada principalmente por un mecanismo de difusión Fickiana pura. La matriz no presentó relajación suficiente como para que fenómenos adicionales, tales como hinchamiento o erosión, contribuyeran de manera significativa al proceso de liberación. Este resultado coincide con lo descrito en trabajos previos, donde se ha reportado que los hidrogeles de alginato suelen liberar compuestos encapsulados por difusión pasiva a través de la red polimérica sin que se observen aportes relevantes de otros mecanismos (Cortés-Camargo et al., 2023).

En términos comparativos, el exponente n aumentó ligeramente en el orden $AS < B1 < B2$, lo cual podría estar relacionado con variaciones en la formulación, como la presencia de mucílago o el grado de entrecruzamiento, que modifican la resistencia difusiva de la red. No obstante, incluso con estas diferencias, los valores permanecieron en el rango característico de un transporte difusivo puramente Fickiano, confirmando que este es el mecanismo predominante en los tres sistemas.

6.6 Modelo Hixson-Crowell

El modelo de Hixson–Crowell fue aplicado a los tres sistemas con el objetivo de evaluar si la liberación del aceite de ajonjolí estuvo influenciada por procesos asociados a cambios en la geometría de las partículas o a una posible erosión superficial de la matriz polimérica. Para el ajuste se utilizó la forma linealizada del modelo, graficando la raíz cúbica de la cantidad de aceite no liberado en función del tiempo. A partir de la recta obtenida se calcularon los parámetros característicos: la pendiente (m), que corresponde al valor negativo de la constante de liberación (k), y la ordenada al origen (b), que permite estimar nuevamente el valor de Q_0 . El coeficiente de determinación (R^2) se empleó para evaluar la calidad del ajuste en cada sistema. Este procedimiento se repitió de manera idéntica para AS, B1 y B2, lo que permitió comparar las posibles diferencias en el comportamiento erosivo entre las formulaciones.

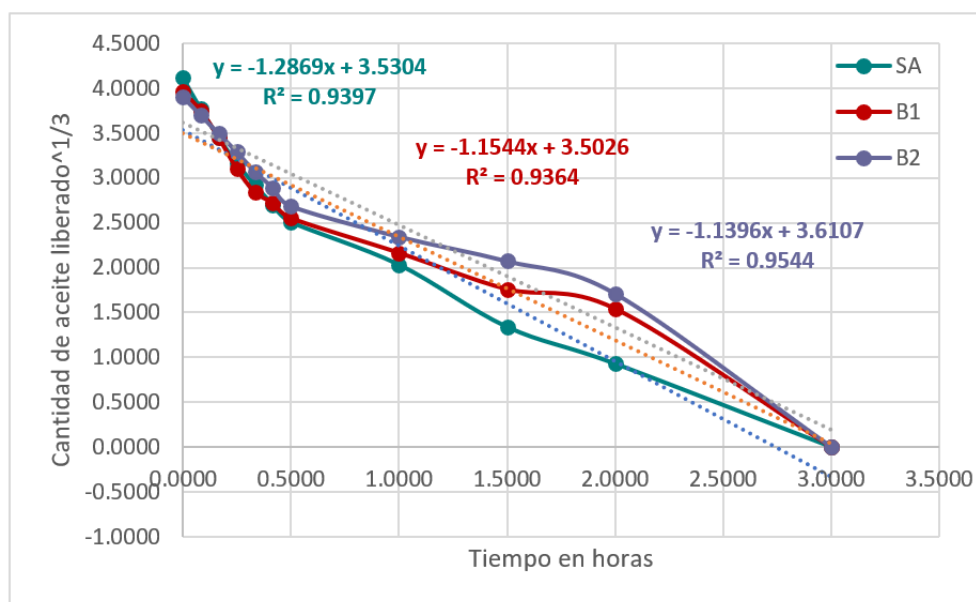


Figura 8. Ajuste del modelo de Modelo Hixson-Crowell para los sistemas AS, B1 y B2.

La Figura 8 presenta las curvas de liberación ajustadas mediante el modelo de Hixson–Crowell para cada sistema y permite visualizar la componente de erosión

superficial en la cinética de liberación. En AS la curva ajustada muestra una caída continua de la raíz cúbica de la fracción no liberada, lo que se traduce en una pendiente negativa pronunciada y una buena correlación con los datos experimentales en la fase analizada ($R^2 \approx 0,94$). Esto indica que durante la etapa intermedia del experimento la pérdida de masa desde la superficie de las perlas contribuye de forma importante al transporte del aceite. En B1 y B2 el comportamiento es análogo: las rectas de ajuste son también relativamente lineales y con altos coeficientes de determinación, lo que sugiere que la erosión superficial es un mecanismo activo en los tres sistemas. No obstante, al observar únicamente la figura se aprecia que las rectas capturan la tendencia temporal pero no alcanzan el valor asintótico observado experimentalmente; la separación entre las curvas experimentales y la extrapolación del modelo al equilibrio pone de manifiesto la limitación de Hixson–Crowell para describir el total liberable en estos sistemas.

Tabla 9. Parámetros obtenidos mediante el modelo de Hixson–Crowell en los sistemas de liberación.

Sistema	k o cte. de erosión (h^{-1})	Estimación de Q_0 %	R
AS	1.2869	44.0019	0.939
B1	1.1544	42.9706	0.936
B2	1.1396	47.0733	0.954

Los parámetros cuantitativos derivados del ajuste con Hixson–Crowell se resumen en la Tabla 9, donde se registran la constante de erosión k , la estimación de Q_0 (fracción máxima liberable según el modelo) y el coeficiente de determinación R^2 . Para AS la constante cinética resultante indica una tasa de erosión alta, del orden de uno punto dos nueve por hora, y el modelo estima un Q_0 próximo al cuarenta y cuatro por ciento, cifra claramente inferior al valor experimental de equilibrio (setenta y seis punto nueve por ciento). En B1 la constante de erosión calculada es comparable (orden de uno punto quince por hora) y la estimación de Q_0 queda igualmente por debajo del valor experimental, lo que señala la misma desviación observada en AS. En B2 la constante y la estimación de Q_0 siguen la misma tendencia; la ligera variación en Q_0 estimado entre B1 y B2 sugiere un efecto de la



composición (proporción de mucílago) sobre la capacidad de retención, aunque el modelo sigue subestimando el total liberable.

Conclusión interpretativa y recomendaciones. El alto ajuste estadístico de Hixson–Crowell muestra que la erosión de superficie es una contribución importante en la cinética observada, por ello la constante k extraída es útil como indicador comparativo de la velocidad de desprendimiento superficial entre formulaciones. Sin embargo, la marcada discrepancia entre Q_0 estimado por Hixson–Crowell y el Q_0 experimental implica que este modelo, por sí solo, no es adecuado para predecir el equilibrio de liberación en estos hidrogeles de alginato–mucílago. Es recomendable presentar los resultados de Hixson–Crowell junto con los parámetros y ajustes de modelos difusivos (por ejemplo Higuchi o Ritger–Peppas) y con el ajuste directo por minimización de errores (Solver) para proporcionar una interpretación completa: usar Hixson–Crowell para caracterizar la fase gobernada por erosión superficial y emplear los modelos difusivos para cuantificar la contribución por transporte interno y explicar el valor real de Q_0 observado experimentalmente. En la tesis conviene dejar constancia de esta limitación metodológica y justificar la combinación de modelos con base en la coherencia física de los parámetros y en los indicadores de ajuste estadístico.

6.7 Modelo de Weibull

El modelo de Weibull es uno de los más empleados en la descripción de cinéticas de liberación, debido a su flexibilidad para ajustarse a distintos perfiles, desde sigmoides hasta comportamientos de orden aparente. A diferencia de otros modelos más restrictivos, Weibull permite identificar tanto el tipo de mecanismo predominante como los parámetros cinéticos asociados a la velocidad y al tiempo característico de liberación. Su utilidad radica en que combina un ajuste matemático robusto con una interpretación física aplicable en matrices poliméricas como los hidrogeles de alginato–mucílago.

En este trabajo, el modelo se aplicó mediante la transformación linealizada de la ecuación de Weibull, graficando el doble logaritmo de la fracción no liberada frente al logaritmo del tiempo. De esta forma se obtuvo la pendiente de la recta (β), que corresponde al parámetro de forma y permite inferir el tipo de cinética predominante. Asimismo, el intercepto de la ecuación se relacionó con el parámetro de escala (α), el cual representa el tiempo característico en el que se alcanza un grado significativo de liberación. A partir de estos dos parámetros, junto con el coeficiente de determinación R^2 , fue posible evaluar el grado de ajuste del modelo y compararlo con los datos experimentales.

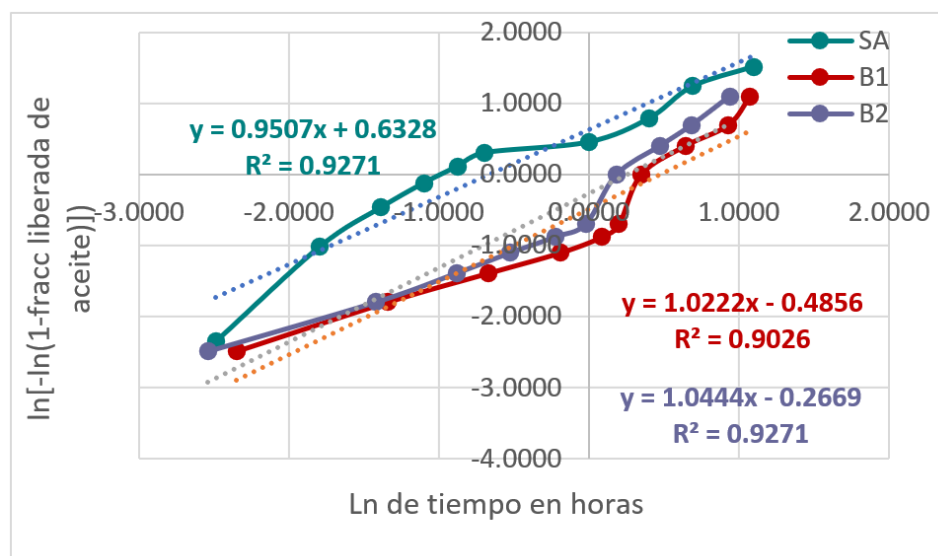


Figura 9. Ajuste del modelo de Modelo de Weibull para los sistemas AS, B1 y B2.

La gráfica de Weibull (Figura 9) linealizada muestra líneas prácticamente rectas para los tres sistemas, con pendientes cercanas a la unidad, lo que indica un comportamiento próximo al de primer orden. El sistema con alginato solo presenta la mayor pendiente, cercana a 0.96, y el mejor ajuste global, con un coeficiente de determinación alrededor del 93%. Esto se traduce en una transición rápida desde la fase inicial de liberación hacia un régimen casi constante. El sistema con una parte de mucílago exhibe una pendiente algo menor, en torno a 0.88, y un ajuste ligeramente inferior, cercano al 90%, lo que sugiere una liberación algo más pausada. El sistema con dos partes de mucílago mantiene una pendiente muy

similar a la de una parte, también alrededor de 0.88, pero con un ajuste que vuelve a situarse cerca del 93%. Las diferencias en los interceptos son coherentes con el tiempo de retardo: el valor más alto en el sistema con alginato implica un tiempo característico más corto, mientras que los interceptos de los sistemas con mucílago son menores, compatibles con un retardo algo mayor antes de alcanzar el régimen casi de primer orden. En conjunto, las tres formulaciones siguen bien el modelo en el intervalo analizado, con la liberación más rápida para el sistema con alginato y la más lenta para la formulación con mayor proporción de mucílago.

Tabla 10. Parámetros característicos del modelo de Weibull para los perfiles de liberación estudiados.

Sistema	Beta	Intercepto	Alpha (h)	R ²
AS	0.9507	0.6328	0.51395744	0.9271
B1	0.8829	0.4166	0.62384451	0.9026
B2	0.8877	0.2128	0.78684765	0.9271

A partir de la pendiente de cada recta se obtuvo el parámetro de forma (Tabla 10). En el sistema con AS la pendiente fue de aproximadamente 0.95 y el intercepto de 0.63, lo que se traduce en un tiempo característico cercano a 0.51 h. El coeficiente de determinación de 92% confirma un ajuste sólido en el intervalo estudiado. En la formulación con una parte de mucílago la pendiente fue de alrededor de 0.88 y el intercepto de 0.42; de esa combinación se estimó un tiempo característico de aproximadamente 0.62 h, con un ajuste cercano al 90%. Para la formulación con dos partes de mucílago la pendiente resultó cercana a 0.89 y el intercepto de alrededor de 0.21; el tiempo característico calculado fue aproximadamente 0.79 h y el ajuste volvió a situarse en torno al 93%. La comparación directa de estos parámetros sugiere un patrón consistente: al aumentar la proporción de mucílago, el tiempo característico crece y la liberación se vuelve más lenta, mientras que el sistema con alginato libera con mayor celeridad y mantiene el mejor compromiso entre rapidez y calidad de ajuste dentro del marco de Weibull.



El modelo de Weibull permitió describir adecuadamente la liberación del aceite de ajonjolí en los tres sistemas, mostrando que el proceso se aproxima a una cinética de primer orden. El sistema con alginato puro presentó la liberación más rápida y eficiente, mientras que el aumento en la proporción de mucílago generó un retardo en el tiempo característico y una cinética más lenta. En conjunto, los resultados confirman que el modelo capta de forma sólida la tendencia experimental y refleja la influencia del mucílago en modular la velocidad de liberación.

6.8 Modelo de Baker-Lonsdale

El modelo de Baker–Lonsdale se utilizó con el propósito de evaluar si la liberación de aceite de ajonjolí desde las microesferas de alginato y mucílago podía describirse adecuadamente bajo la hipótesis de difusión controlada en sistemas esféricos. Para aplicar este modelo se transformaron los datos experimentales de liberación acumulada en fracción liberada respecto al valor máximo experimental, y posteriormente se calcularon los términos de la ecuación linealizada propuesta por Baker y Lonsdale. Con estos valores se construyeron las gráficas correspondientes, en las que se ajustó una regresión lineal por mínimos cuadrados, obteniendo la pendiente asociada a la constante cinética de liberación y el coeficiente de determinación como medida de la calidad del ajuste.

Este procedimiento se realizó de manera sistemática para los tres sistemas estudiados, de manera que fue posible comparar tanto la velocidad relativa de difusión como la capacidad del modelo para representar la liberación experimental en función de la formulación de las perlas. Los resultados, presentados en la Figura 8 y en la Tabla 8, muestran que este modelo permite verificar la validez de la suposición de difusión esférica en cada sistema y proporciona parámetros útiles para interpretar los mecanismos predominantes en la liberación del aceite de ajonjolí encapsulado.

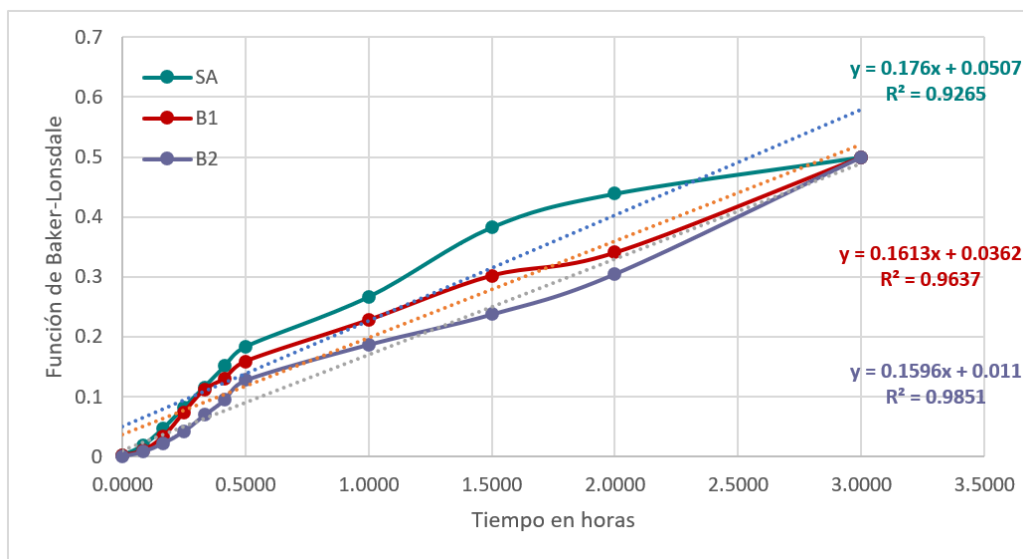


Figura 10. Ajuste del modelo de Modelo de Baker-Lonsdale para los sistemas AS, B1 y B2.

En la Figura 10 se muestran los ajustes obtenidos al aplicar el modelo de Baker–Lonsdale para los tres sistemas de liberación evaluados. El perfil de liberación en AS exhibe una pendiente mayor, lo que se refleja en una constante cinética superior y por ende en una velocidad más rápida de salida del aceite encapsulado respecto a B1 y B2. No obstante, la dispersión de algunos puntos experimentales provoca que el ajuste lineal no sea tan elevado como en los otros sistemas, lo que sugiere que en AS podrían coexistir mecanismos adicionales a la difusión esférica, tales como cierta relajación de la red polimérica. En contraste, los perfiles de B1 y especialmente de B2 muestran una trayectoria muy cercana a la recta de ajuste, con coeficientes de determinación superiores a 0.96 y 0.98 respectivamente, lo que indica que en estos sistemas el mecanismo de liberación se aproxima mucho más a un control difusivo ideal. Este comportamiento puede relacionarse con el mayor grado de interacción entre alginato y mucílago, que estabiliza la matriz y favorece una liberación gobernada principalmente por la difusión pasiva.

Tabla 11. Parámetros cinéticos y estadísticos del modelo de Baker–Lonsdale aplicados a los sistemas AS, B1 y B2.

Sistema	k calculada (h ⁻¹)	k grafica (h ⁻¹)	SSE	SST	R ² calculada	R ² grafica
AS	0.20383	0.17600	0.03763	0.73903	0.94908	0.92665
B1	0.18117	0.16130	0.01668	0.57077	0.97077	0.96330
B2	0.16558	0.15960	0.00423	0.46710	0.99094	0.98550

En la Tabla 11 se presentan los parámetros cinéticos derivados del ajuste, donde se observa que la constante de Baker–Lonsdale fue más alta para AS, cercana a 0.20 h⁻¹, mientras que en B1 y B2 disminuyó a valores de 0.18 y 0.16 h⁻¹ respectivamente. Esta reducción progresiva de la constante refleja el efecto del mucílago en retardar la salida del aceite, generando un perfil más sostenido de liberación. La comparación entre los valores de R² calculados y los obtenidos gráficamente muestra una coherencia muy alta, confirmando la solidez del ajuste. Además, el análisis de los errores (SSE) frente a la varianza total (SST) demuestra que en todos los casos los residuos fueron mínimos, lo que respalda la validez de los parámetros estimados. Destaca particularmente el sistema B2, que combina un valor de k moderado con el mejor coeficiente de determinación, lo que lo convierte en el sistema más representativo del modelo de difusión esférica.

En conclusión, el modelo de Baker–Lonsdale permitió describir de manera adecuada la liberación de aceite de ajonjolí desde las microesferas, mostrando un ajuste sobresaliente en los tres sistemas, aunque con diferencias claras entre ellos. El sistema AS presentó la liberación más rápida, lo que puede ser útil cuando se buscan formulaciones con una respuesta inmediata, pero al mismo tiempo evidenció limitaciones al no cumplir totalmente con el supuesto teórico de la difusión esférica. Por el contrario, B1 y especialmente B2 se ajustaron de manera más fiel al modelo, ofreciendo un comportamiento cercano a lo ideal y una cinética de liberación más sostenida, lo cual es ventajoso cuando se pretende prolongar la protección del aceite o su acción bioactiva. Este resultado sugiere que la incorporación de



mucílago no sólo modula la tasa de liberación, sino que también otorga mayor estabilidad al sistema. Por lo tanto, aunque los tres sistemas pueden considerarse adecuados, el sistema B2 resalta como el más equilibrado entre control difusivo y estabilidad, lo que lo convierte en el más prometedor para aplicaciones prácticas. Así, este modelo no solo respalda el entendimiento de la liberación desde las microesferas, sino que también aporta criterios útiles para orientar futuros desarrollos en encapsulación y liberación controlada de compuestos bioactivos.

6.9 Modelo Hopfenberg

El análisis de la liberación controlada de compuestos encapsulados en matrices poliméricas es fundamental para comprender el comportamiento de sistemas de liberación utilizados en aplicaciones alimentarias, farmacéuticas y biomédicas. Para describir este tipo de procesos se emplean distintos modelos cinéticos, entre los cuales destaca el modelo de Hopfenberg, el cual se utiliza para sistemas donde la liberación del compuesto está gobernada principalmente por la erosión superficial del material polimérico.

El modelo de Hopfenberg propone que la liberación del compuesto activo ocurre a medida que la superficie del material se va erosionando de forma progresiva al entrar en contacto con el medio externo. En este tipo de sistemas, la velocidad de liberación depende directamente de la tasa de erosión superficial de la matriz, la cual se representa mediante la constante cinética k_0 . Este parámetro permite cuantificar qué tan rápido se degrada el material y, por lo tanto, qué tan rápido se libera el compuesto encapsulado.

En este estudio, el modelo de Hopfenberg se empleó para analizar el comportamiento de liberación del aceite de ajonjolí encapsulado en esferas de hidrogel, utilizando diferentes formulaciones: alginato puro (AS), alginato con mucílago de nopal (B1) y alginato con mucílago de tamarindo (B2). El objetivo fue evaluar cómo la incorporación de mucílagos naturales modifica la resistencia de la matriz frente a la erosión y, por consiguiente, el perfil de liberación del aceite.

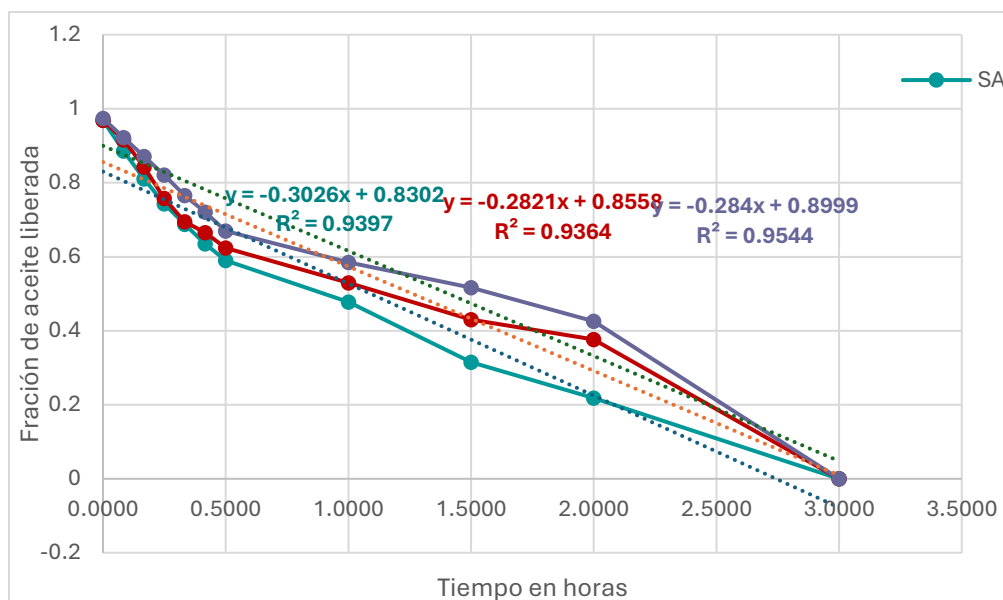


Figura 11. Ajuste del modelo de Modelo de Hopfenberg para los sistemas AS, B1 y B2.

El análisis de la cinética de liberación utilizando el modelo de Hopfenberg indica que las tres formulaciones evaluadas presentan un comportamiento compatible con un mecanismo de erosión superficial de la matriz polimérica. Los valores altos del coeficiente de determinación (R^2 mayores a 0.93) muestran que el modelo describe de manera adecuada el proceso de liberación del aceite en los tres sistemas analizados.

Los resultados obtenidos muestran que las esferas elaboradas únicamente con alginato (AS) presentan la mayor velocidad de erosión superficial, con un valor aproximado de $k_0 = 2.33 \text{ h}^{-1}$. Esto significa que el aceite encapsulado se libera con mayor rapidez en comparación con las otras formulaciones. Por otro lado, cuando se incorporan mucílagos naturales a la matriz de alginato, la velocidad de erosión disminuye. En el caso de la formulación B1, compuesta por alginato y mucílago de nopal, la velocidad de erosión es cercana a 1.93 h^{-1} . Mientras tanto, la formulación B2, que contiene alginato y mucílago de tamarindo, presenta la tasa de erosión más baja, aproximadamente 1.83 h^{-1} .

Estos resultados permiten sugerir que la incorporación de mucílagos vegetales contribuye a reforzar la estructura del hidrogel, formando matrices que ofrecen mayor resistencia frente a la erosión superficial. En particular, el mucílago de tamarindo parece favorecer la formación de una red polimérica ligeramente más compacta o densa, lo que ayuda a retardar el proceso de liberación del aceite encapsulado.

Tabla 12. Parámetros cinéticos y estadísticos del modelo de Hopfenberg aplicados a los sistemas AS, B1 y B2.

Sistema	k_0 [h ⁻¹]	R ² grafica
AS	2.32699	0.93970
B1	1.93380	0.93640
B2	1.83464	0.95440

El análisis de los parámetros obtenidos con el modelo de Hopfenberg permite notar diferencias claras entre las tres formulaciones. Los valores de k_0 dan una idea de qué tan rápido se va desgastando la superficie del hidrogel, y eso influye directamente en la forma en que el aceite sale hacia el medio. En este caso, AS tiene el valor más alto de la constante, mientras que B1 y B2 presentan valores más bajos. Esto deja ver que al agregar otros componentes a la matriz, su estructura cambia y también lo hace su comportamiento durante la liberación.

Si se ve desde el lado estructural, esa disminución de k_0 de AS a B2 puede interpretarse como una mayor estabilidad en las mezclas. En varios estudios sobre hidrogeles de alginato se menciona que cuando se incorporan otros polisacáridos se generan más interacciones dentro de la red. Esto hace que la estructura sea más compacta y más resistente. Como resultado, al medio le cuesta más penetrar y el desgaste de la superficie se vuelve más lento. En este caso, los mucílagos vegetales podrían estar cumpliendo justo esa función, haciendo la red más firme y cambiando tanto sus propiedades mecánicas como su resistencia a la erosión (Peppas y Narasimhan, 2014).



Otro punto que vale la pena notar es el ajuste del modelo. Los valores de R^2 en los tres sistemas son altos, todos cerca o por encima de 0.94. Eso indica que el modelo logra describir bastante bien lo que pasa en el experimento. En este tipo de estudios, valores así suelen considerarse buenos, sobre todo cuando el proceso está dominado por lo que ocurre en la superficie del material (Siepmann y Siepmann, 2012). No es un ajuste perfecto, pero sí lo suficientemente sólido como para confiar en la tendencia que muestra.

Si se comparan estos resultados con otros modelos, también se entiende mejor lo que está pasando. Modelos como el de Higuchi o Korsmeyer-Peppas funcionan mejor cuando la difusión es lo principal. Pero aquí, donde el material se va desgastando desde afuera, el modelo de Hopfenberg encaja mejor. Es más adecuado para describir cómo va cambiando la liberación conforme la superficie se erosiona con el tiempo (Costa y Lobo, 2001).

En conjunto, los resultados muestran que cambiar la composición de la matriz sí tiene un efecto directo en su comportamiento. La diferencia en los valores de k_0 y en el ajuste del modelo deja claro que al combinar alginato con otros polisacáridos se pueden obtener sistemas con respuestas distintas. Esto es importante porque permite pensar en materiales donde la liberación se pueda controlar dependiendo de lo que se necesite.

6.10 Modelo de Gompertz

El modelo de Gompertz es una función matemática ampliamente utilizada para describir procesos cinéticos que presentan un comportamiento sigmoide. Este modelo se emplea con frecuencia en estudios de liberación controlada, crecimiento microbiano y degradación de materiales, ya que permite representar sistemas en los que existe una fase inicial lenta, seguida por un incremento acelerado del proceso y finalmente una etapa de estabilización. En estudios de liberación de compuestos encapsulados, el modelo de Gompertz resulta útil cuando el mecanismo no ocurre de forma constante, sino que cambia a lo largo del tiempo

debido a fenómenos como hinchamiento del material, difusión o reorganización de la matriz polimérica.

Para aplicar este modelo a los datos experimentales se realizó un proceso de linealización utilizando transformaciones logarítmicas de la fracción liberada (Q_t). A partir de esta transformación se obtuvo una expresión lineal de la forma:

$$y = -kt + b$$

donde y representa la variable transformada del modelo, k es la constante cinética asociada a la velocidad del proceso y b corresponde al intercepto de la recta. Esta forma lineal permite estimar los parámetros del modelo mediante regresión lineal.

El análisis se realizó en Excel. Primero se organizaron los datos experimentales de tiempo y fracción liberada (Q_t). Posteriormente se aplicó la transformación matemática correspondiente para calcular la variable Y del modelo de Gompertz. Con estos valores se construyeron las gráficas de Y contra tiempo para cada sistema (AS, B1 y B2). Finalmente, se agregaron líneas de tendencia lineales para obtener las ecuaciones de ajuste, así como los valores de la pendiente, el intercepto y el coeficiente de determinación (R^2), los cuales permiten evaluar la calidad del ajuste del modelo a los datos experimentales.

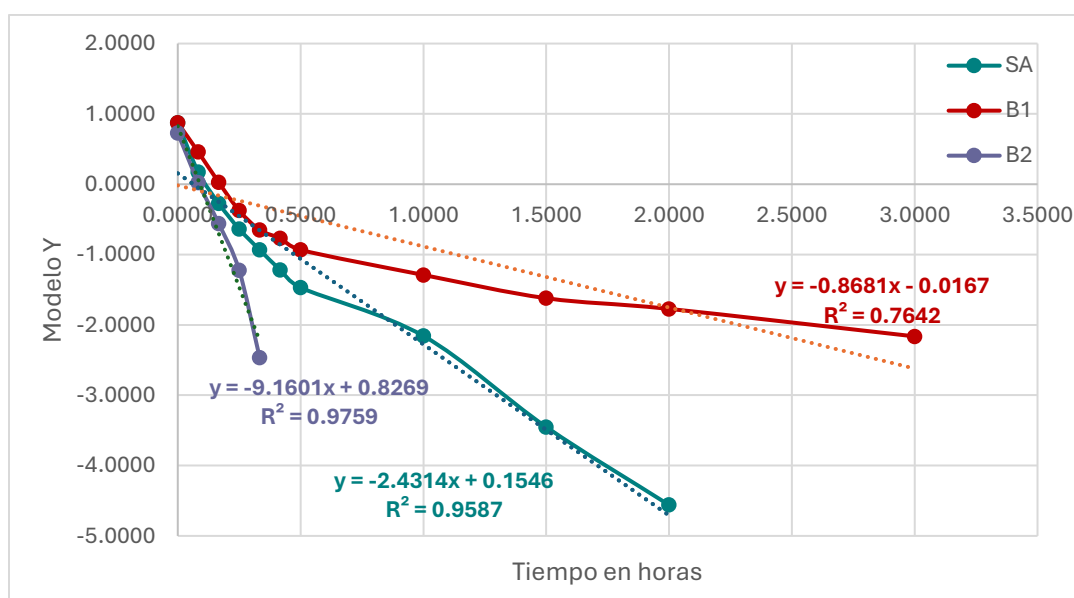


Figura 12. Ajuste del modelo de Modelo de Gompertz para los sistemas AS, B1 y B2.



Las gráficas permiten ver con bastante claridad cómo se comportan los tres sistemas cuando se aplica la transformación del modelo de Gompertz. En el caso de AS, la relación entre la variable transformada y el tiempo se ve bastante ordenada, casi como una línea recta bien definida. Esto se refleja en el valor alto de R^2 (0.9587), que indica que el modelo sí logra seguir la tendencia de los datos experimentales. En términos prácticos, esto sugiere que la liberación tiene ese comportamiento sigmoide típico: empieza más lenta, luego se acelera y finalmente se va estabilizando conforme se acerca al máximo.

Para B1 el panorama cambia un poco. La pendiente es mucho menor ($k \approx 0.868 \text{ h}^{-1}$), lo que ya da una pista de que el proceso es más lento o más gradual. No hay cambios tan bruscos como en AS. Además, el valor de R^2 baja a 0.7642, lo que indica que los puntos están más dispersos y que la recta no logra representarlos tan bien. Esto normalmente pasa cuando no hay un solo mecanismo dominando el proceso. Aquí es probable que no solo sea difusión, sino también hinchamiento del hidrogel o incluso cambios en la estructura mientras el sistema está en contacto con el medio. Todo eso hace que el comportamiento sea más difícil de ajustar con un solo modelo.

El caso de B2 es donde aparece el detalle más interesante. Al momento de calcular la variable Y en Excel, empiezan a salir errores (#NUM!) en los últimos puntos. Esto no es tanto un problema del experimento como de la forma en que está planteada la ecuación. El modelo de Gompertz usa logaritmos, y esos solo funcionan bien dentro de ciertos valores. Cuando la fracción liberada se acerca demasiado a 1 o incluso la supera, la operación deja de tener sentido matemático y Excel ya no puede calcular el resultado.

Justo eso es lo que pasa aquí. En el último dato, Q_t llega a 1.076, es decir, un poco más del 100 %. Aunque suene raro, esto puede pasar por pequeñas variaciones en la medición o porque el valor de referencia usado como máximo no es completamente exacto. El problema es que, al meter ese valor en la ecuación, la

transformación se rompe y aparecen los errores. Por eso hay un punto a partir del cual ya no se puede seguir graficando de la misma forma.

Aun así, en la parte donde sí se pudo trabajar, el ajuste de B2 es bastante bueno. El R^2 llega a 0.9759, incluso más alto que en los otros sistemas. Eso indica que, dentro de ese rango válido, el modelo describe muy bien el comportamiento. Este tipo de situaciones ya se han visto en otros estudios, sobre todo cuando se usan transformaciones logarítmicas. Cuando los datos se acercan a los límites del modelo, los cálculos se vuelven inestables y aparecen este tipo de errores, aunque el ajuste en la zona intermedia siga siendo bueno.

Tabla 13. Parámetros cinéticos y estadísticos del modelo de Gompertz aplicados a los sistemas AS, B1 y B2.

Sistema	k (h^{-1})	b (intercepto)	R^2
AS	2.43140	0.15460	0.95870
B1	0.86810	-0.01670	0.76420
B2	9.1601	0.82690	0.97590

El análisis de los parámetros cinéticos obtenidos para el modelo de Gompertz permite ver diferencias importantes entre los tres sistemas evaluados. En particular, el parámetro k indica qué tan rápido avanza el proceso dentro del modelo, es decir, cómo cambia la variable transformada con el tiempo. Al comparar los valores, se observa que el sistema AS presenta un valor de k de $2.4314 h^{-1}$, mientras que B1 muestra un valor mucho menor de $0.8681 h^{-1}$. Por su parte, el sistema B2 tiene el valor más alto, con $k \approx 9.1601 h^{-1}$.

Esta diferencia sugiere que el comportamiento del sistema B2 es más marcado en el rango donde el modelo pudo ajustarse correctamente. Una pendiente mayor implica que la variable transformada cambia de forma más rápida con el tiempo, lo que puede interpretarse como un paso más brusco entre las etapas del proceso descrito por la función de Gompertz. Dicho de otra forma, el sistema B2 podría



mostrar un cambio más rápido entre la fase inicial y la fase donde el proceso se acelera, al menos en el intervalo donde los datos sí funcionan para el modelo.

En contraste, el sistema B1 presenta la menor pendiente de los tres, lo que indica que el proceso avanza de forma más lenta y progresiva. Este comportamiento puede estar relacionado con cambios en la estructura de la matriz polimérica cuando se incorpora el mucílago de nopal, ya que la presencia de estos polisacáridos hace la red más compleja y dificulta el paso del compuesto encapsulado. Como resultado, el avance del proceso descrito por el modelo se vuelve más gradual.

Otro aspecto importante es el intercepto. En el sistema AS se obtiene un valor positivo de 0.1546, lo que indica que el modelo parte de un valor inicial un poco más alto en la variable transformada. En B1, el intercepto es ligeramente negativo (-0.0167), lo que puede indicar que el modelo no representa del todo bien los primeros momentos del experimento. Este tipo de comportamiento suele aparecer cuando al inicio ocurren fenómenos como la hidratación del material o ciertos ajustes en la matriz antes de que comience la liberación real.

El sistema B2 presenta un intercepto de 0.8269, el más alto entre las formulaciones analizadas. Esto sugiere que, dentro del rango de datos utilizados, el sistema inicia en un nivel más elevado en la variable transformada. Sin embargo, es importante considerar que el cálculo del modelo para B2 solo se pudo hacer en los primeros puntos experimentales debido a los errores numéricos que aparecen después. Por esta razón, tanto la pendiente como el intercepto describen principalmente el comportamiento inicial y no todo el perfil de liberación.

En cuanto a la calidad del ajuste, los coeficientes de determinación también muestran diferencias claras. El sistema AS presenta un R^2 de 0.9587, lo que indica un buen ajuste entre el modelo y los datos experimentales. El sistema B1 tiene un R^2 menor, de 0.7642, lo que refleja una mayor dispersión y una menor precisión del modelo para describir todo el comportamiento. En cambio, el sistema B2 muestra el



valor más alto de R^2 , con 0.9759, lo que indica que la relación lineal describe muy bien la tendencia de los puntos que sí se pudieron ajustar.

En conjunto, el modelo de Gompertz permite describir bien el comportamiento general de los sistemas, sobre todo en la parte intermedia del proceso de liberación. Los resultados muestran que el sistema SA presenta una evolución más rápida, mientras que las formulaciones con mucílagos tienen un comportamiento más gradual.

El caso del sistema B2, donde aparecen errores numéricos en los últimos puntos, se debe a las limitaciones matemáticas de la transformación logarítmica usada en la linealización del modelo y a que algunos valores experimentales superan el límite teórico de liberación. A pesar de esto, los valores altos de R^2 indican que el modelo describe bien la tendencia general en el rango donde los cálculos sí son válidos.

En general, el modelo de Gompertz es una herramienta útil para interpretar el perfil sigmoide de liberación del aceite encapsulado y permite comparar las diferencias en la cinética entre las distintas formulaciones evaluadas.



CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se logró desarrollar un análisis completo del comportamiento de liberación de aceite de ajonjolí a partir de sistemas encapsulados basados en alginato y mezclas con mucílagos. Desde el inicio, el objetivo principal fue entender cómo la composición de la matriz influye en la cinética de liberación y, al mismo tiempo, evaluar qué modelos matemáticos describen mejor este tipo de sistemas. Con base en los resultados obtenidos, se puede decir que ambos propósitos se cumplieron de manera clara, ya que fue posible no solo comparar los sistemas entre sí, sino también interpretar el papel que juega cada componente dentro de la estructura del hidrogel.

En cuanto a los datos experimentales, se observó que todos los sistemas presentaron un comportamiento típico de liberación, con una tendencia ascendente a lo largo del tiempo. Sin embargo, las diferencias entre ellos fueron evidentes desde las primeras etapas. El sistema de alginato puro mostró una liberación más rápida, especialmente en los primeros minutos, lo que indica una menor resistencia estructural. En cambio, los sistemas que incorporan mucílago, particularmente B2, presentaron una liberación más lenta y controlada. Esto sugiere que la adición de estos biopolímeros modifica la red del hidrogel, haciéndola más compacta y dificultando el paso del compuesto encapsulado.

Este comportamiento se confirmó a través del ajuste con distintos modelos cinéticos. Cada modelo permitió observar el proceso desde una perspectiva diferente, lo cual fue clave para entender que la liberación no está gobernada por un solo mecanismo. Por ejemplo, el modelo de orden cero dio una idea general de la tasa promedio de liberación, pero no logró representar adecuadamente la forma real de las curvas experimentales. Esto dejó claro que el proceso no ocurre a una velocidad constante, sino que cambia con el tiempo.

Por otro lado, el modelo de primer orden y el de Higuchi mostraron un mejor ajuste en ciertas regiones, especialmente en aquellas donde la difusión tiene un papel importante. En estos casos, se observó que la constante cinética disminuye al pasar de AS a B2, lo cual refuerza la idea de que la estructura de la matriz influye directamente en la movilidad del aceite. Aun así, estos modelos tampoco lograron describir completamente todo el perfil, lo que indica que hay otros factores involucrados.

Los modelos que consideran la erosión, como Hixson Crowell y Hopfenberg, aportaron información importante sobre el desgaste de la superficie del hidrogel. A partir de estos ajustes, se pudo ver que la pérdida de material también influye en la liberación, sobre todo en etapas intermedias. Los valores obtenidos mostraron que el sistema AS presenta una erosión más rápida, mientras que B1 y B2 son más resistentes. Esto coincide con lo esperado, considerando la presencia de mucílagos en la matriz.



En el caso del modelo de Gompertz, se logró describir de mejor manera la forma sigmoide del proceso, especialmente en la región intermedia. Este modelo permitió entender cómo el sistema pasa de una fase inicial más lenta a una etapa de mayor velocidad, antes de estabilizarse. Sin embargo, también se identificaron limitaciones, como los errores numéricos en el sistema B2 cuando los datos superan ciertos límites. Este punto fue importante porque demuestra que no todos los modelos funcionan en todo el rango experimental y que es necesario interpretar los resultados con cuidado.

Tomando en cuenta todos estos análisis, se puede concluir que la composición de la matriz tiene un efecto directo en el comportamiento de liberación. La incorporación de mucílagos no solo modifica la velocidad del proceso, sino también el mecanismo dominante en cada etapa. Esto se refleja tanto en los datos experimentales como en los parámetros obtenidos de los modelos.

Además, el uso de diferentes modelos permitió tener una visión más completa del sistema. En lugar de depender de un solo enfoque, se logró integrar información de difusión, erosión y comportamiento sigmoide, lo que da una interpretación más realista del proceso. Esto es importante porque en sistemas como estos, donde intervienen varios fenómenos al mismo tiempo, un solo modelo no es suficiente para describir todo lo que ocurre.

Finalmente, este trabajo aporta una base sólida para el diseño de sistemas de liberación controlada. Los resultados muestran que es posible modificar el comportamiento del sistema a través de cambios en la formulación, lo que abre la posibilidad de adaptarlos según la aplicación que se busque. Más allá de los valores obtenidos, lo más importante es la comprensión del comportamiento del sistema, ya que esto permite tomar decisiones más informadas en futuros desarrollos.

En general, se puede decir que el estudio cumple con los objetivos planteados y deja claro que el modelamiento físico matemático es una herramienta fundamental para analizar y entender este tipo de sistemas.



REFERENCIAS

REFERENCIAS

1. Arpagaus, C., & Collenberg, A. (2018). *Nano spray drying for encapsulation of pharmaceuticals*. *International Journal of Pharmaceutics*, 536(1), 278–284. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.11.012>
2. Badui Dergal, S. (2006). *Química de los alimentos* (4ª ed.). Pearson Educación.
3. Bae, S.-H., & Lee, H.-G. (2008). Effects of the process variables of microencapsulation of sesame oil by spray drying to generate the desired powder quality. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(2), 477–490.
4. Baker, R. W., & Lonsdale, H. K. (1974). Controlled release: Mechanisms and rates. En K. E. Brogden & J. H. Brace (Eds.), *Controlled Release of Biologically Active Agents* (pp. 15–71). Plenum Press.
5. Bakry, A. M., Smetanska, I., Haas, A., & El Gohary, A. E. (2019). Microencapsulation and its uses in food science and technology: A review. En *Microencapsulation in Food Science and Technology* (pp. 1–36). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79655>
6. Barrón Vilchis, D., Zavala Martínez, L. G., San Juan Meza, P. X., & Reyes Escogido, M. de L. (2020). Evaluación del mucílago de nopal para la encapsulación de *Lactobacillus plantarum* 1449. *Jóvenes en la Ciencia*, 16, 1–6. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/download/3560/3056/11800>
7. Boostani, S., & Jafari, S. M. (2021). Controlled release of encapsulated food ingredients: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 303–321. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.040>
8. Cortés-Camargo, I., & Román-Guerrero, L. (2023). *Análisis de semillas silvestres de Vitis sp.* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio Institucional UAEMEX.
9. Cortés-Camargo, S. K. V.-G., Alpizar-Reyes, E., Cruz-Olivares, J., et al. (2020). Ionic gelation encapsulation of sesame oil with sodium alginate–nopal mucilage blends: Encapsulation efficiency and oxidative stability. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(S1), 1–15.
10. Cortés-Camargo, S., Román-Guerrero, A., Álvarez-Ramírez, J., & Pérez-Alonso, C. (2023). Microstructural influence on physical properties and release profiles of sesame oil encapsulated into sodium

- alginate–tamarind mucilage hydrogel beads. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 5, 100302. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100302>
11. Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion* (2^a ed.). Oxford University Press.
 12. da Silva, P. T., Conto, L. C., & Amaral, P. H. R. (2014). Microencapsulation: Concepts, mechanisms, methods and some applications in food technology. *Ciência Rural*, 44(7), 1309–1317. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20130571>
 13. Díaz Sandoval, M. A. (2019). *Caracterización y aplicación de aceite de ajonjolí en sistemas poliméricos* [Tesis de licenciatura, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano]. Biblioteca Digital Zamorano.
 14. Flores, F., & Kong, F. (2017). In vitro release kinetics of microencapsulated materials and the effect of the food matrix. *Annual Review of Food Science and Technology*, 8, 237–259. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-030125>
 15. Flores-González, P. (2016). *Estabilidad oxidativa de aceites vegetales de alto contenido insaturado* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio de Tesis DGBSDI.
 16. Fredenberg, S., Wahlgren, M., Reslow, M., & Axelsson, A. (2011). The mechanisms of drug release in poly(lactic-co-glycolic acid)-based drug delivery systems: A review. *International Journal of Pharmaceutics*, 415(1–2), 34–52. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2011.05.049>
 17. Gómez Morales, R. (2015). *Obtención de ácidos grasos insaturados por hidrólisis ácida de aceites vegetales* [Tesis de ingeniería química, Instituto Politécnico Nacional].
 18. González, A. G., Rosas, J. M., & Lupo, J. I. (2014). Formación de microcápsulas por gelación iónica: fundamentos y aplicaciones. *Infotec*, 26(6), 45–52.
 19. Guillot-Sánchez, A. (2012). *Fundamentos de la química de lípidos* [Tesis de maestría, Universidad de Guanajuato].
 20. Hielscher, T. (2007). Ultrasonic production of nano-size dispersions and emulsions. *arXiv preprint*, arXiv:0708.1831. <https://arxiv.org/abs/0708.1831>
 21. Hixson, A. W., & Crowell, J. H. (1931). Dependence of reaction velocity upon surface and agitation: I. Theoretical consideration. *Industrial & Engineering Chemistry*, 23(8), 923–931.
 22. Hopfenberg, H. B. (1976). Controlled release from erodible slabs, cylinders, and spheres. En *Controlled Release Polymeric Formulations* (pp. 26–32). American Chemical Society.
 23. Huerta Hernández, J. (2020). *Desarrollo de geles mucílago de nopal – alginato de sodio conteniendo aceite de ajonjolí mediante gelación iónica* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. <https://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/104808>
 24. Jiang, G., Huang, Z., & Chen, Y. (2014). Chitosan–tripolyphosphate nanoparticles for oral insulin delivery. *International Journal of*

25. Juárez Dávila, M. (2020). *Efecto de la insaturación sobre la viscosidad de aceites en matrices hidrogeles* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio Institucional UAEMEX.
26. Khaw, T., Lee, B., & Chen, F. (2024). Process optimization for developing ultrasound-assisted and spray-dried microcapsules of vegetable oils. *Journal of Food Process Engineering*, 47(1), e14598. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14598>
27. Korsmeyer, R. W., & Peppas, N. A. (1984). Mechanisms of solute release from porous hydrophilic polymers. *International Journal of Pharmaceutics*, 15(1), 25–35.
28. Laurrabaquio Rodríguez, J. (2014). *Estudio de los monoinsaturados en aceites vegetales* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
29. Mane, M. M., Maheshwari, R. G., Ghode, P. S., Sharma, S. S., & Tekade, R. K. (2019). Modeling of drug release: Concept and applications. En R. K. Tekade (Ed.), *Dosage Form Design Considerations* (Vol. 2, pp. 377–421). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814424-3.00014-2>
30. Peppas, N. A., & Sahlin, J. J. (1989). A simple equation for the description of solute release: III. Coupling of diffusion and relaxation. *International Journal of Pharmaceutics*, 57(2), 169–172.
31. Ramírez-Cruz, K. B., Jiménez-Estrada, M. C., & Solano-Martínez, N. (2019). Microencapsulation of sesame seed oil by tamarind seed mucilage. *Research in Pharmaceutical Sciences*, 14(6), 504–512. <https://doi.org/10.4103/1735-5362.270962>
32. Rodrigo, R., Linares, M., & Pérez, L. (2012). Encapsulación con alginato y almidón de yuca para protección de caroteno en sistemas alimentarios. *Revista Tecnológicas*, 26(3), 33–41.
33. Siepmann, J., & Peppas, N. A. (2001). Modeling of drug release from delivery systems based on hydroxypropyl methylcellulose (HPMC). *Advanced Drug Delivery Reviews*, 48(2–3), 139–157.
34. Velázquez-Gutiérrez, S. K., Alpizar-Reyes, E., Guadarrama-Lezama, A. Y., et al. (2021). Influence of the wall material on the moisture sorption properties and conditions of stability of sesame oil hydrogel beads by ionic gelation. *LWT*, 140, 110695. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110695>
35. Voragen, A. G. J., Coenen, G.-J., Verhoef, R. P., & Schols, H. A. (2009). Pectin, a versatile polysaccharide present in plant cell walls. *Structural Chemistry*, 20(2), 263–275. <https://doi.org/10.1007/s11224-009-9442-z>
36. Costa, P., y Lobo, J. (2001). Modeling and comparison of dissolution profiles. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 13(2), 123–133.

- 
37. Peppas, N., y Narasimhan, B. (2014). Mathematical models in drug delivery: How modeling has shaped the way we design new drug delivery systems. *Journal of Controlled Release*, 190, 75-81.
 38. Siepmann, J., y Siepmann, F. (2012). Modeling of diffusion controlled drug delivery. *Journal of Controlled Release*, 161(2), 351-362.
 - 39.