



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO  
FES CUAUTITLÁN**

**Caracterización reológica de dispersiones de  
alginato/goma arábica y evaluación de las condiciones de  
extrusión en la estabilidad de microcápsulas para  
probióticos**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN ALIMENTOS**

**P R E S E N T A :**

**GABRIELA LÓPEZ CORTÉS**

**ASESORES: DRA. ADRIANA LLORENTE BOUSQUETS**

**DR. JONATHAN CORIA HERNÁNDEZ**



**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2021**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

U.N.A.M.  
ACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN  
**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**



**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: **Tesis**

**Caracterización reológica de dispersiones de alginato/goma arábiga y evaluación de las condiciones de extrusión en la estabilidad de microcápsulas para probióticos**

Que presenta la pasante: **Gabriela López Cortés**

Con número de cuenta: **413107358** para obtener el Título de: **Ingeniera en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de agosto de 2021.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	
<b>PRESIDENTE</b>	<u>Dra. Adrianá Llorente Bousquets</u>	_____
<b>VOCAL</b>	<u>I.B.Q. Saturnino Maya Ramírez</u>	_____
<b>SECRETARIO</b>	<u>Dra. María Eugenia Ramírez Ortiz</u>	_____
<b>1er. SUPLENTE</b>	<u>I.A. Miriam Alvarez Velasco</u>	_____
<b>2do. SUPLENTE</b>	<u>I.A. Verónica Romero Arreola</u>	_____

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

U.N.A.M.  
ACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN  
ASUNTO: VOTO APROBATORIO



M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: **Tesis**

Caracterización reológica de dispersiones de alginato/goma arábica y evaluación de las condiciones de extrusión en la estabilidad de microcápsulas para probióticos

Que presenta la pasante: **Gabriela López Cortés**

Con número de cuenta: **413107358** para obtener el Título de: **Ingeniera en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de agosto de 2021.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. Adriana Llorente Bousquets	
VOCAL	I.B.Q. Saturnino Maya Ramírez	
SECRETARIO	Dra. María Eugenia Ramírez Ortiz	
1er. SUPLENTE	I.A. Miriam Alvarez Velasco	
2do. SUPLENTE	I.A. Verónica Romero Arreola	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.

LMCF/javg



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

U.N.A.M.  
ACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN  
**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**



**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: **Tesis**

**Caracterización reológica de dispersiones de alginato/goma arábiga y evaluación de las condiciones de extrusión en la estabilidad de microcápsulas para probióticos**

Que presenta la pasante: **Gabriela López Cortés**

Con número de cuenta: **413107358** para obtener el Título de: **Ingeniera en Alimentos**


Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de agosto de 2021.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Dra. Adrianá Llorente Bousquets	_____
<b>VOCAL</b>	I.B.Q. Saturnino Maya Ramírez	_____
<b>SECRETARIO</b>	Dra. María Eugenia Ramírez Ortiz	
<b>1er. SUPLENTE</b>	I.A. Miriam Alvarez Velasco	_____
<b>2do. SUPLENTE</b>	I.A. Verónica Romero Arreola	_____

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.

LMCF/javg



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

U.N.A.M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN  
**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**



**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: **Tesis**

**Caracterización reológica de dispersiones de alginato/goma arábiga y evaluación de las condiciones de extrusión en la estabilidad de microcápsulas para probióticos**

Que presenta la pasante: **Gabriela López Cortés**

Con número de cuenta: **413107358** para obtener el Título de: **Ingeniera en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de agosto de 2021.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Dra. Adriana Llorente Bousquets	_____
<b>VOCAL</b>	I.B.Q. Saturnino Maya Ramírez	_____
<b>SECRETARIO</b>	Dra. María Eugenia Ramírez Ortiz	_____
<b>1er. SUPLENTE</b>	I.A. Miriam Alvarez Velasco	_____
<b>2do. SUPLENTE</b>	I.A. Verónica Romero Arreola	_____

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

U.N.A.M.  
ACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.



DEPARTAMENTO DE  
TITULACIÓN DE  
INGENIEROS PROFESIONALES

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: **Tesis**

**Caracterización reológica de dispersiones de alginato/goma arábiga y evaluación de las condiciones de extrusión en la estabilidad de microcápsulas para probióticos**

Que presenta la pasante: **Gabriela López Cortés**

Con número de cuenta: **413107358** para obtener el Título de: **Ingeniera en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de agosto de 2021.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Dra. Adrianá Llorente Bousquets	
<b>VOCAL</b>	I.B.Q. Saturnino Maya Ramírez	
<b>SECRETARIO</b>	Dra. María Eugenia Ramírez Ortiz	
<b>1er. SUPLENTE</b>	I.A. Miriam Alvarez Velasco	
<b>2do. SUPLENTE</b>	I.A. Verónica Romero Arreola	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.

LMCF/javg

## DEDICATORIAS

A mi amado hijo Icker Lián... En ti saboreé el amor más sutil que pueda existir y has sido el más grande de mis impulsos todos estos años, la razón de mi fuerza, coraje, valentía y ganas... mi mejor maestro, aun siendo tan pequeñito. Ojalá algún día entiendas que todo el esfuerzo ha valido la pena y que, aunque no soy la mejor, en verdad, lo intento... que cada día me esfuerzo por ser tu mejor guía y que, pese a mis errores, siempre he tratado de brindarte con todo mi amor, las herramientas necesarias para comprendas que: **¡EL SECRETO... ESTÁ EN LAS GANAS!** Te amo infinitamente mi príncipe y éste logro, es nuestro.

A mi maravillosa madre, Carmen: Somos tan idénticas, tan perseverantes, tan persistentes, necias y aferradas... que es por ello, que éste logro, te lo debo también a ti. Gracias, mamá por apoyarme e inculcarme la sed de prepararme, por amarme de la forma en que lo haces y por cuidar de mi hijo mientras he tenido que estar ausente. Jamás terminaré de agradecerte todo lo que haces por nosotros. **¡TE AMO!** porque no sería la mujer que soy, sino fuera por ti.

A mis hermanas Elizabeth y Araceli... **par de maravillosas mujeres de inspiración palpable...**

Mi Eli: Eres tú quién ha sido fuente de inspiración y orgullo. Te admiro no solo como profesionista, sino por la gran mujer que eres, aquella llena de bondad, nobleza, inteligencia, sabiduría y calidez humana. Gracias por siempre cuidarme, apoyarme y diseñarme.

Mi Ara: Infinitas gracias, porque de ti, la raíz de mi temple fuerte y valiente; y es que te admiro y te amo tanto... que el mundo siempre se me podrá venir encima y sé muy bien que tú, siempre llegarás a hacer soporte. "Tu princesita" ... ¿lo recuerdas? Por fin, ¡lo logró!...

A la ingeniería en alimentos no solo de debo las bases de mi carrera profesional, sino también, el haberme brindado la dicha de coincidir con aquel hombre de letra bonita, quien resultó ser, el hombre que siempre idealicé...

Para el amor de mi vida, Octavio: Amor, dentro de mi brevedad... solo me queda decirte **¡infinitas gracias!**, por todo ese cúmulo de intensidades y maravillosos momentos que hemos vivido juntos; y es que hay tanta historia, que es verdad que todo lo resumo en ti, porque no solo has sido mi mejor amigo, sino también mi gran soporte, mi cuestión de tiempo, mi tremendo equipo. Hoy celebramos un logro más juntos y estoy completamente decidida de que eres tú con quien quiero seguir sumando éxitos el resto de mis días... **¡TE AMO!**



A quienes se les apagó la luz...

Para Alfonso<sup>†</sup> y Lola<sup>†</sup>: Quizás mis dos grandes raíces ya no estén físicamente, pero sé que me acompañan en cada paso que doy, llenándolos de bendiciones y firmeza; y aun cuando piso en falso y no encuentro las respuestas, siento su luz aquí conmigo para guiarme a encontrar de nuevo el camino... Con la mirada en el cielo... **Tan solo soy el resultado de la suma de todos sus esfuerzos...** Los amo y los llevo en cada parte de mi ser.

Para David E. Pascacio (Pasqui)<sup>†</sup>: Mi querido amigo, cuando te arrebataron la vida, te prometí que me titularía en tu memoria... eres ingeniería petrolera en nuestros cielos... Tú siempre creíste en mí, en mi potencial, decías que yo estaba diseñada para el éxito y tus palabras, siempre fueron aliento... Con la mirada en cielo... **¡Gracias Pestañitas!**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi maravillosa casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, FES Cuautitlán, por haberme dado la oportunidad de desarrollarme dentro de sus aulas.

A la Dra. Adriana Llorente Bousquets y al Dr. Jonathan Coria por ser parte fundamental para el cierre de esta etapa tan importante y maravillosa de mi vida.

Al resto de amigos, profesores, y demás personas que en su momento fueron parte de mi historia y hoy ya no están... **¡GRACIAS!**, porque de cada uno atesoré en mis recuerdos y vivires increíbles, grandes aprendizajes y cualidades positivas que me han servido de enriquecimiento como ser humano y profesionalista.

## CONTENIDO

<b>TABLA DE FIGURAS</b> .....	2
<b>TABLA DE CUADROS</b> .....	4
<b>RESUMEN</b> .....	5
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	6
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	8
1.1 Polisacáridos .....	8
1.1.1 Homopolisacáridos y heteropolisacáridos .....	8
1.1.2 Comportamiento en dispersión .....	8
1.1.3 Viscosidad y estabilidad de las dispersiones de polisacáridos .....	9
1.2 Alginato de sodio .....	11
1.2.1 Propiedades de los alginatos .....	13
1.2.2 Comportamiento de los alginatos en dispersión .....	14
1.2.3 Viscosidad de los alginatos .....	15
1.3 Goma Arábica .....	15
1.3.1 Propiedades de la Goma Arábica .....	16
1.4 Sistemas dispersos .....	19
1.4.1 Soles .....	19
1.4.2 Propiedades reológicas de los soles .....	20
1.4.3 Fluidos Newtonianos .....	21
1.4.4 Fluidos no newtonianos .....	24
1.4.5 Fluidos independientes del tiempo (Estado estacionario) .....	26
1.4.5.1 Fluidos sin esfuerzo umbral o esfuerzo de cedencia .....	27
1.4.7 Fluidos dependientes del tiempo (Estado no estacionario) .....	28
1.5 Geles .....	30
1.5.1 Mecanismos de formación de un gel .....	30
1.5.2 Geles de alginato .....	30
1.5.3 Gelificación iónica interna .....	31
1.5.4 Gelificación iónica externa .....	32
1.6 Microencapsulación .....	34
1.6.1 Métodos de encapsulación .....	35
1.6.2 Encapsulación por extrusión .....	37

1.6.3 Ventajas de la microencapsulación.....	37
1.6.4 Usos de la microencapsulación en la industria alimenticia .....	38
<b>Justificación del trabajo</b> .....	40
<b>Hipótesis del trabajo</b> .....	41
<b>Objetivo general</b> .....	41
<b>Objetivos particulares</b> .....	41
<b>2. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b> .....	42
2.1.5 Evaluación de las cápsulas por microscopía óptica .....	49
2.1.6 Determinación del diámetro de los extruidos .....	49
<b>3. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	52
3.1 Análisis Estadístico .....	52
3.2 Caracterización reológica de las dispersiones de polisacáridos .....	52
3.3 Resultados durante la extrusión de las dispersiones de polisacárido .....	61
3.4 Microscopía óptica .....	63
3.5 Microscopía electrónica de barrido.....	66
<b>4. CONCLUSIONES</b> .....	69
<b>5. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	70
ANEXOS. ....	74
ANEXO 1. Especificaciones técnicas del alginato de sodio .....	74
.....	74
ANEXO 2. Especificaciones técnicas de la goma arábica .....	77

## **TABLA DE FIGURAS**

Figura 1. Volúmenes relativos ocupados por un polímero lineal y uno ramificado	10
Figura 2. Distribución por bloques de los monómeros en el polímero del alginato	12
Figura 3. Modelo de “Caja de huevo” que describe la estructura del alginato	13
Figura 4. Estructura de la Goma Arábica	16
Figura 5. Efecto del pH en la viscosidad de soluciones de alginato	18
Figura 6. Tipos de fluidos reológicos	21
Figura 7. Representación de un fluido Newtoniano	22
Figura 8. Curvas de fluidez y viscosidad de un fluido Newtoniano	22

Figura 9. Comportamiento reológico de los fluidos	24
Figura 10. Esfuerzo cortante frente a la velocidad de corte para diversos tipos de fluidos no Newtonianos independientes del tiempo	25
Figura 11. Viscosidad aparente frente a la velocidad de cizalla	28
Figura 12. Pseudoplasticidad, efecto de cizalla en sustancias fluidificantes	29
Figura 13. Comportamiento de los fluidos dependientes del tiempo	30
Figura 14. Mecanismos de gelificación iónica	34
Figura 15. Microcápsulas esféricas (a), miltipared (b), matriciales (c, d, e, y f) irregulares (g) y multinúcleo (h)	36
Figura 16. Tipos de dispositivos extrusores	39
Figura 17. Alginato de Sodio y Goma Arábiga	44
Figura 18. Agitador de propelas, KIKA WERK, Rw 16	45
Figura 19. Viscosímetro de cilindros concéntricos, Rheomat, Mettler RM	46
Figura 20. Extrusión de dispersiones	47
Figura 21. Revco Ultima II, Thermo	48
Figura 22. Liofilizadora (LABOCONCO, Freezone 4.5)	49
Figura 23. Cápsulas liofilizadas	49
Figura 24. Microscopio óptico Olympus mod. CX31	50
Figura 25. Medición del diámetro con vernier	51
Figura 26. Ionizadora de oro (Desk V, Denton Vaccum, USA)	52
Figura 27. MEB JEOL JSM-6010LA	52
Figura 28. Resultados de la caracterización reológica de la dispersión de Alginato de Sodio al 2%	53
Figura 29. Viscosidad del alginato de sodio 2%	55
Figura 30. Resultados de la caracterización reológica de la dispersión de Alginato de sodio al 2% - Goma arábiga 1%	57
Figura 31. Viscosidad aparente del alginato de sodio 2% - Goma Arábiga 1%	58
Figura 32. Resultados de la caracterización reológica de la dispersión de Alginato de sodio al 2% - Goma arábiga 2%	60
Figura 33. Viscosidad aparente del alginato de sodio 2% - Goma Arábiga 2%	61
Figura 34. Número de microcápsulas obtenidas mediante distintos extrusores	64

Figura 35. Tamaño de las cápsulas obtenidas mediante el extrusor de 1.00 mm 67

Figura 36. Tamaño de las cápsulas obtenidas mediante el extrusor de 1.75 mm 68

## **TABLA DE CUADROS**

Cuadro 1. Viscosidad relativa de la goma arábica en concentraciones porcentuales	17
Cuadro 2. Tipos de dispersiones	19
Cuadro 3. Clasificación de fluidos no Newtonianos	27
Cuadro 4. Distintos métodos de encapsulación	37
Cuadro 5. Resultados promedio de la obtención de microcápsulas con extrusores de 1 y 1.75 mm	62
Cuadro 6. Comparativo de la morfología de las microcápsulas obtenidas mediante microscopia óptica con aumento de 4X	65
Cuadro 7. Resultados obtenidos mediante MEB, de las cápsulas obtenidas con el extrusor de 1 mm de diámetro	69
Cuadro 8. Resultados obtenidos mediante MEB, de las cápsulas obtenidas con el extrusor de 1 mm de diámetro	69

## RESUMEN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define a los probióticos como “microorganismos vivos” que cuando se administran en cantidades adecuadas confieren un efecto beneficioso a la salud del hospedador a través del balance microbiano intestinal. Los microorganismos probióticos más conocidos son las bacterias del género *Lactobacillus* y *Bifidobacteria*. El éxito de estas sustancias se debe a los efectos positivos que desarrollan en la flora microbiana del tracto digestivo.

Para que estas bacterias probióticas intervengan de manera apropiada y esperada, se depende de su viabilidad bajo condiciones de estrés (temperatura, pH, y almacenamiento) para que éstas lleguen vivas al intestino del hospedador en un número adecuado; lo cual, ha sido un inconveniente significativo. Dicha viabilidad puede ser controlada con la técnica de microencapsulación mediante el uso de polímeros como agentes encapsulantes, al proteger las sustancias activas mediante una barrera física favoreciendo la supervivencia de los probióticos.

El alginato ha sido utilizado como agente encapsulante debido a su matriz biodegradable, no tóxica y versátil que protege a sustancias activas de condiciones adversas del entorno. Por lo que, la presente investigación tiene por objetivo el estudio de la caracterización reológica de dispersiones de alginato de sodio en mezcla con goma arábica y la evaluación de distintas condiciones de extrusión en la estabilidad de microcápsulas para probióticos.

## INTRODUCCIÓN

Los polisacáridos (gomas e hidrocoloides) se utilizan en los alimentos fundamentalmente como espesantes o gelificantes de sistemas acuosos, para el control de la fluidez y la textura de productos líquidos y las de ductilidad de productos semisólidos. En los productos alimenticios se utilizan habitualmente a concentraciones de 0.25-0.50%, lo que permite desarrollar la gran capacidad que tienen para aumentar viscosidades y formar geles (Badui, 2006).

El alginato sódico y la goma arábiga son polisacáridos aniónicos que, debido a sus características y biocompatibilidad, han tenido numerosas aplicaciones en la industria de alimentos y en la elaboración de productos farmacéuticos (Laurienzo, *et al.*, 2015).

El alginato comercial es una sal, normalmente sódica, de estructura lineal que se obtiene a partir de algas rojas y sus dispersiones son muy viscosas, particularmente cuando en el medio hay bajas concentraciones de iones calcio; es por ello, que las dispersiones de alginato sódico tienden a formar geles espontáneamente, en presencia de soluciones de cloruro de calcio.

La goma arábiga es un polisacárido ramificado obtenido de los exudados de los árboles de Acacia que tiene como característica principal su capacidad como estabilizador de los alimentos. Otra característica es su capacidad de asociación con otros polisacáridos en dispersiones acuosas, las más importantes son asociaciones mediadas por iones, formación de puentes de hidrógeno e interacciones electrostáticas (Montenegro *et al.*, 2012).

Las dispersiones son entonces moléculas o agregados hidratados. Su fluidez depende de tamaño, forma y facilidad con que se deforman (flexibilidad), así como también de la presencia y magnitud de cargas en las moléculas y agregados hidratados. Las dispersiones de polisacáridos con aptitud gelificante, exhiben distintos tipos de flujos el pseudoplástico y el tixotrópico. Ambos se caracterizan por una fina fuerza de cizalla (Fennema, 2008)

La Reología es una disciplina científica que se dedica al estudio de la deformación y flujo de la materia o, más precisamente, de los fluidos. Las características reológicas de un fluido son criterios esenciales en el desarrollo de productos en el ámbito industrial. Frecuentemente, éstas determinan las propiedades funcionales de algunas sustancias e intervienen durante el control de calidad, los tratamientos (comportamiento mecánico), el diseño de operaciones básicas e incluso en el momento del consumo (textura) (Gómez-Díaz, 2020)

Las propiedades reológicas se definen a partir de la relación existente entre una fuerza o sistema de fuerzas externas y su respuesta, ya sea como deformación o flujo. Por lo que, desde el punto de vista reológico, un gel es un material que muestra predominantemente un comportamiento elástico en la escala de tiempo considerado y tiene un módulo que es relativamente pequeño ( $<10^7\text{Pa}$ ) si se compara con sólidos verdaderos (Fennema, 2008).

Uno de los fenómenos que se presentan al mezclar dispersiones de goma arábica y alginato de sodio y someterlas a soluciones de  $\text{CaCl}_2$ , es la microencapsulación, la cual es explicada por una interacción entre estos polisacáridos expuestos a los cationes divalentes de una solución de  $\text{CaCl}_2$  favorecen una interacción iónica electrostática entre los cationes de calcio cargados positivamente y los grupos carboxilos del polímero aniónico cargados negativamente (Sandoval, 2016). La microencapsulación es una tecnología de empaquetamiento de diferentes materiales, como lo son los probióticos para protegerlos de situaciones adversas y su posterior liberación bajo condiciones controladas (Rokka y Rantamaki, 2010).



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Polisacáridos

Los polisacáridos son polímeros de monosacáridos (azúcares simples) que están compuestos de unidades o enlaces glucosídicos en disposición lineal o ramificada, lo cual se debe a que los enlaces glucosídicos pueden estar formados por cualquiera de los hidroxilos de un monosacárido (Voet, 2006). Los monosacáridos son moléculas de carbohidratos que no pueden ser degradadas a moléculas de carbohidratos más simples por hidrólisis, por lo que son conocidos a menudo como azúcares simples (Fennema, 2008)

### 1.1.1 Homopolisacáridos y heteropolisacáridos

Si todas las unidades glicosídicas están constituidas por el mismo azúcar, son homogéneos y se llaman homopolisacáridos. Cuando un polisacárido está compuesto de dos o más unidades diferentes de monosacáridos, se le conoce como heteropolisacárido. El que contiene dos tipos de diferentes de moléculas de monosacáridos es un diheteroglicano y así sucesivamente. Los diheteroglicanos son, con frecuencia, polímero lineales o grupos de unidades similares que alternan a lo largo de la cadena, como los son los alginatos (Fennema, 2008)

### 1.1.2 Comportamiento en dispersión

Debido a que la mayoría de los polisacáridos contienen unidades glucosilo que, como media, tienen tres grupos hidroxilo, cada uno de los grupos hidroxilos tiene la posibilidad de ligar un hidrógeno con una o más moléculas de agua. Asimismo, los átomos de oxígeno del anillo y el glucosídico que conecta un anillo de azúcar al otro, pueden formar también puentes de hidrógeno con el agua. Puesto que todas las unidades de azúcar de la cadena tienen la capacidad de mantener unidas moléculas de gran avidez, los glicanos poseen una gran afinidad por ella, y se hidratan con mucha facilidad cuando hay agua disponible.

Por lo tanto, en sistemas acuosos, las partículas de polisacáridos pueden tomar moléculas de agua, hincharse con ellas y solubilizarse total o parcialmente.

Los polisacáridos modifican la movilidad del agua en los sistemas que forman los alimentos, al mismo tiempo que el agua juega un importantísimo papel en las propiedades físicas y funcionales de los polisacáridos, ya que conjuntamente controlan muchas propiedades funcionales en los alimentos. El agua de hidratación, que está unida por puentes de hidrógeno y solvata a las moléculas de polisacárido, se describe a menudo como agua cuya estructura ha sido modificada lo suficiente por la presencia de la molécula de polímero como para que no pueda congelarse. Esta agua ha sido denominada, “plastificante”. Las moléculas que componen esta agua no se encuentran unidas energéticamente entre sí, en el sentido químico. A pesar de que su capacidad de movimiento está reducida, son capaces de intercambiarse libremente y rápido con otras moléculas de agua. Esta agua de hidratación constituye sólo una pequeña parte del agua total que se encuentra en los geles o en los tejidos de los alimentos frescos. El agua en exceso de la hidratación esta simplemente retenida en los capilares y cavidades de varios tamaños en el gel o tejido.

Los polisacáridos solubles en agua y los polisacáridos modificados utilizados en los alimentos y en otras aplicaciones industriales son conocidos como gomas o hidrocoloides. Estas gomas se comercializan en forma de polvo de diversos tamaños de partícula (Fennema, 2008)

### 1.1.3 Viscosidad y estabilidad de las dispersiones de polisacáridos

La viscosidad de una disolución de un polímero depende del tamaño y forma de sus moléculas y de las conformaciones que adoptan el solvente.

Las moléculas de un polímero lineal en disolución disponen de una gran zona para su movimiento. Cuando colisionan unas y otras se crean fricciones, se consume energía y, de ese modo, se origina la viscosidad. Este tipo de polisacáridos dan lugar a disoluciones muy viscosas a bajas concentraciones. La viscosidad depende

del peso molecular y de la forma y flexibilidad de la cadena del polímero que se trate; mientras más grande más extensa y rígida será la viscosidad.

Por otra parte, las moléculas extremadamente ramificadas colisionarán con menos frecuencia y darán lugar a una baja viscosidad que las moléculas lineales de un polisacárido del mismo peso molecular (figura 1). También una molécula de un polisacárido altamente ramificado ocupará menos espacio que otro polisacárido lineal del mismo peso molecular. Como resultado de ello, las moléculas muy ramificadas colisionan entre sí con menos frecuencia y producen por tanto una viscosidad mucho menor que las lineales de mismo peso molecular.

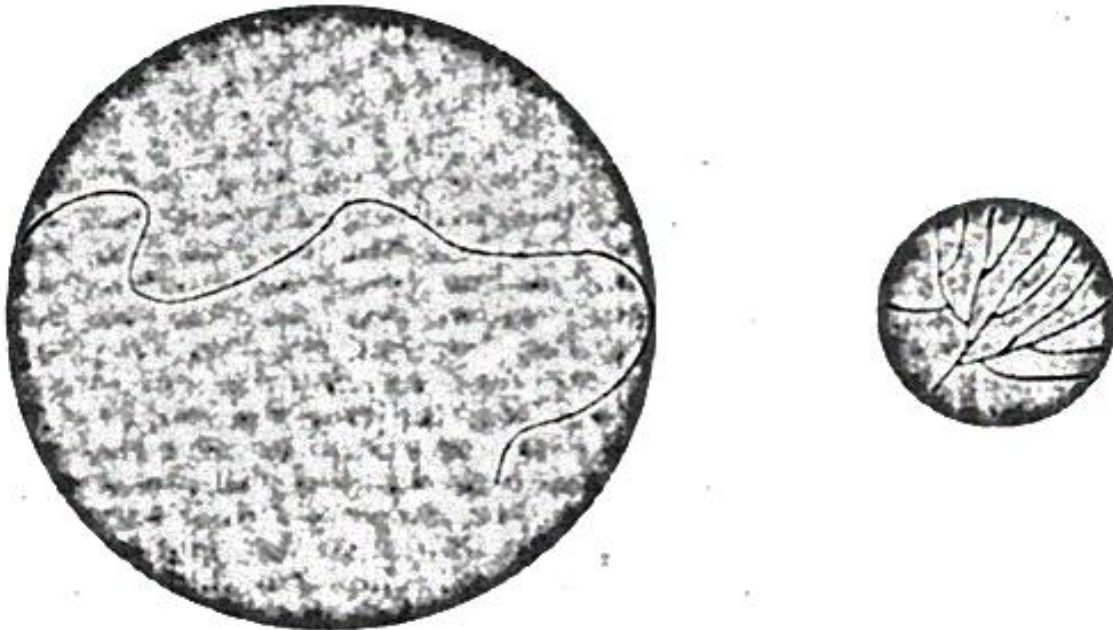


Figura 1. Volúmenes relativos ocupados por un polímero lineal y uno ramificado

Fuente: Fennema, 2008.

Esto implica también que las moléculas de polisacárido muy ramificadas deberán ser muchísimo mayor que las de los lineales para dar lugar a la misma viscosidad a la misma concentración. Del mismo modo, las cadenas de polisacáridos lineales que poseen solo un tipo de carga iónica (que siempre es una carga negativa derivada de la ionización de los grupos carboxílicos o semiésteres de sulfato) se

disponen en una configuración extendida debida a la repulsión de las cargas del mismo signo. Esto incrementa la longitud de la cadena de extremo a extremo, por lo que el volumen ocupado por la molécula es mayor. En consecuencia, estos polímeros tienden a producir soluciones de alta viscosidad.

## 1.2 Alginato de sodio

El ácido algínico es un compuesto químico que se encuentra en la pared celular de las algas marinas pardas (feofíceas). Los alginatos son sales de ácido algínico que pueden ser formadas con Na, K, Mg, Ca, entre otros, formando sales con diferentes grados de solubilidad en agua, lo cual confiere diversos grados de viscosidad (Yabur *et al.*, 2007). En su forma salina, es un biopolímero biodegradable y biocompatible, que forma geles con facilidad en presencia de iones calcio.

Los alginatos son los polisacáridos cuya función principal es dar rigidez, elasticidad, flexibilidad y capacidad de enlazar agua (Hernández *et al.*, 2005). En su estado natural, los alginatos se presentan como una mezcla de sales de los cationes que comúnmente se localizan en el agua de mar, principalmente  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ . Las proporciones en las que estos iones están unidos al alginato dependen de su composición, así como de la selectividad de enlace de los cationes alcalinotérreos por el alginato (Yabur *et al.*, 2007)

Los alginatos son una familia de polisacáridos lineales, conteniendo cantidades variables de ácido  $\beta$ -D-manurónico y el ácido  $\alpha$ -L-gulurónico. Este polímero debe su carácter polianiónico a los grupos carboxilo que aparecen a lo largo de la cadena. Estos se agrupan o distribuyen en secciones construyendo homopolímeros tipo G (-GGG-), bloques M (-MMM-) o heteropolímeros en los que los bloques M y G se alternan (-MGMG-) como se muestra en la figura 2.

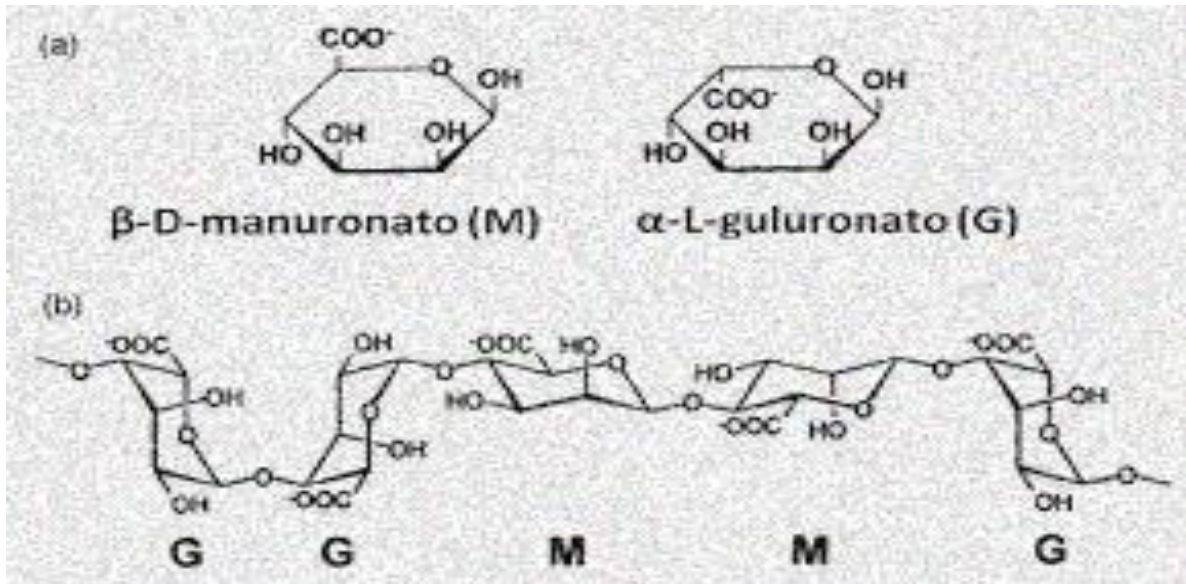


Figura 2. Distribución por bloques de los monómeros en el polímero del alginato

Fuente: Pawar y Edgar, 2012.

Tanto la distribución de los monómeros en la cadena polimérica como la carga y volumen de los grupos carboxílicos confieren al gel formado características de flexibilidad o rigidez dependiendo del contenido glucurónico. Si en la estructura polimérica hay mayor cantidad de bloques G, generalmente la estructura es en zigzag, formando un gel es duro, frágil y que presenta sinéresis, mientras que con la presencia de mayor proporción de bloques M, el gel formado se presenta suave, elástico, dúctil, flexible y con poca sinéresis (Cubero *et al.*, 2002). Los bloques de secuencias MM, MG se encuentran unidos por enlaces glucosídicos  $\beta$  (1-4); y los bloques GG, GM por enlaces  $\alpha$  (1-4) que se visualizan en la figura 2 (Lupo *et al.*, 2012).

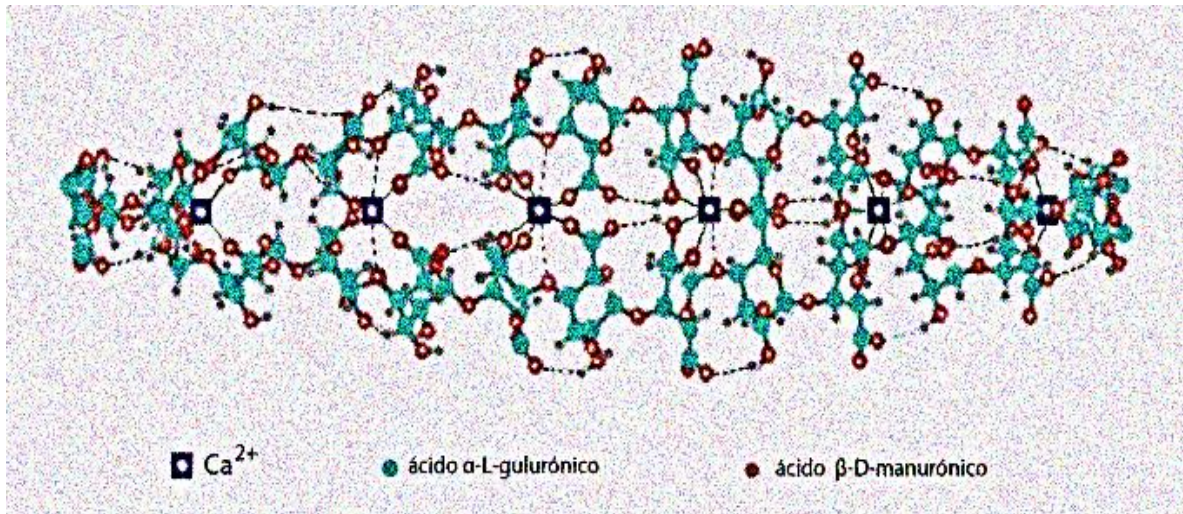


Figura 3. Modelo de “Caja de huevo” que describe la estructura del alginato

Fuente: Reddy y Reddy, 2010.

### 1.2.1 Propiedades de los alginatos

La aplicación de los alginatos se basa en cuatro principales propiedades en dispersión:

- Su habilidad como espesantes al ser dispersados en agua, generando un aumento en la viscosidad de la dispersión, la cual está en función de su grado de polimerización (GP), el cual es una medida del peso molecular promedio de las cadenas que lo constituyen y se relaciona directamente con la viscosidad de sus soluciones. La pérdida de la viscosidad en el almacenamiento es una medida del grado de despolimerización del alginato (McHugh, 1987).
- Su capacidad de retener agua; es decir, pueden formar retículos poliméricos tridimensionales que poseen grupos hidrófilos capaces de absorber grandes volúmenes de agua desde diez hasta miles de veces su peso y son capaces de tenerlos a baja presión (Hernández, *et al.*, 2005)
- Su habilidad para formar geles, a partir de una serie de reacciones químicas de intercambio iónico que dan lugar a la formación de enlaces entre las cadenas adyacentes del polímero de alginato. Particularmente

se realiza un intercambio de iones sodio por cationes divalentes o trivalentes.

- Su capacidad de formar películas (Funami *et al.*, 2009).

### 1.2.2 Comportamiento de los alginatos en dispersión

El comportamiento del alginato se ve afectado, en general, por los siguientes factores:

- Temperatura: La viscosidad de las soluciones de alginato decrece en aproximadamente 2.5% por cada grado de incremento de temperatura, siendo el proceso reversible. Si a este aumento de temperatura se le suma un aumento del pH y del tiempo, se consigue una despolimerización de la molécula, lo cual, baja la viscosidad. Tras un proceso de congelación/descongelación se mantiene la viscosidad inicial.
- pH: La viscosidad es casi independiente del pH en un rango de entre 5 y 10 debido a un grupo repulsivo de los grupos carboxilos cargados negativamente, los que mantiene extendidas las cadenas del polímero e incrementan su capacidad de unión con las moléculas del agua. A pH entre 3 y 3.5, el alginato es insoluble y precipita en forma de ácido algínico, mientras que un incremento del pH por encima de 10 causaría la despolimerización.
- Fuerza iónica: la viscosidad de las soluciones de alginato de sodio decrece levemente con la presencia de sales con cationes monovalentes, debido a que, el polímero tiende a contraerse en solución al aumentar la fuerza iónica, efecto que se hace máximo en concentraciones salinas de 0.1 N (Cubero *et al.*, 2002)

### 1.2.3 Viscosidad de los alginatos

La viscosidad es la característica principal de las soluciones de alginato junto a la reactividad de los cationes polivalentes, es la que genera características como espesante, estabilizante y gelificante.

Con el fin de preparar dispersiones efectivas de alginato, es necesario dispersar completamente las partículas de alginato en el sistema, lo que puede lograrse mediante la adición lenta y progresiva del polímero durante un mezclado con alta cizalladura (Imeson, 2010)

Una dispersión viscosa de alginato exhibe un comportamiento pseudoplástico (Díaz y Navaza, 2002). Esto es una consecuencia de las largas cadenas de polímero y la rigidez de las moléculas hidratadas. A bajas velocidades de cizalla, las moléculas del alginato se encuentran distribuidas al azar debido al movimiento browniano. Al aumentar la velocidad de cizallamiento, las moléculas comienzan a unirse en forma paralela ordenándose en la dirección del flujo y disminuyendo, por tanto, la resistencia a fluir. Como resultado la viscosidad aparente disminuirá al aumentar la velocidad de cizalla más allá de la zona newtoniana primaria del sistema (Imeson, 2010).

### 1.3 Goma Arábica

Es un polisacárido que procede del exudado de árboles de acacia, el cual es un material heterogéneo cuya característica estructural principal es una cadena de unidades de B-Galactopiranososa unida a través de las posiciones 1-3, con cadenas laterales de unidades de Galactopiranososa 1-6 terminales en residuos de ácido glucurónico. Algunos grupos adicionales se unen también a las posiciones C-3 sobre las cadenas naturales de galactosa. La hidrólisis completa de su molécula produce los cuatro azúcares constituyentes básicos: D-Galactosa, L-Arabinosa, L-Raminosa y D-Ácido Glucurónico; por lo que cuenta con un peso molecular (250.000 -1,0 x10<sup>6</sup>D) (figura 4). La forma de la molécula es la de una espiral, corta pero rígida. Además de formar geles de alto contenido de sólidos de este tipo, por lo que se



puede utilizar a concentraciones mucho menores con otras gomas, como espesante y ligador.

Los grados alimenticios de la goma arábica dan soluciones que son esencialmente incoloras y no imparte sabor. También es insoluble en aceites y en la mayor parte de los solventes orgánicos. Es soluble en soluciones de etanol, hasta un límite de aproximadamente 60%.

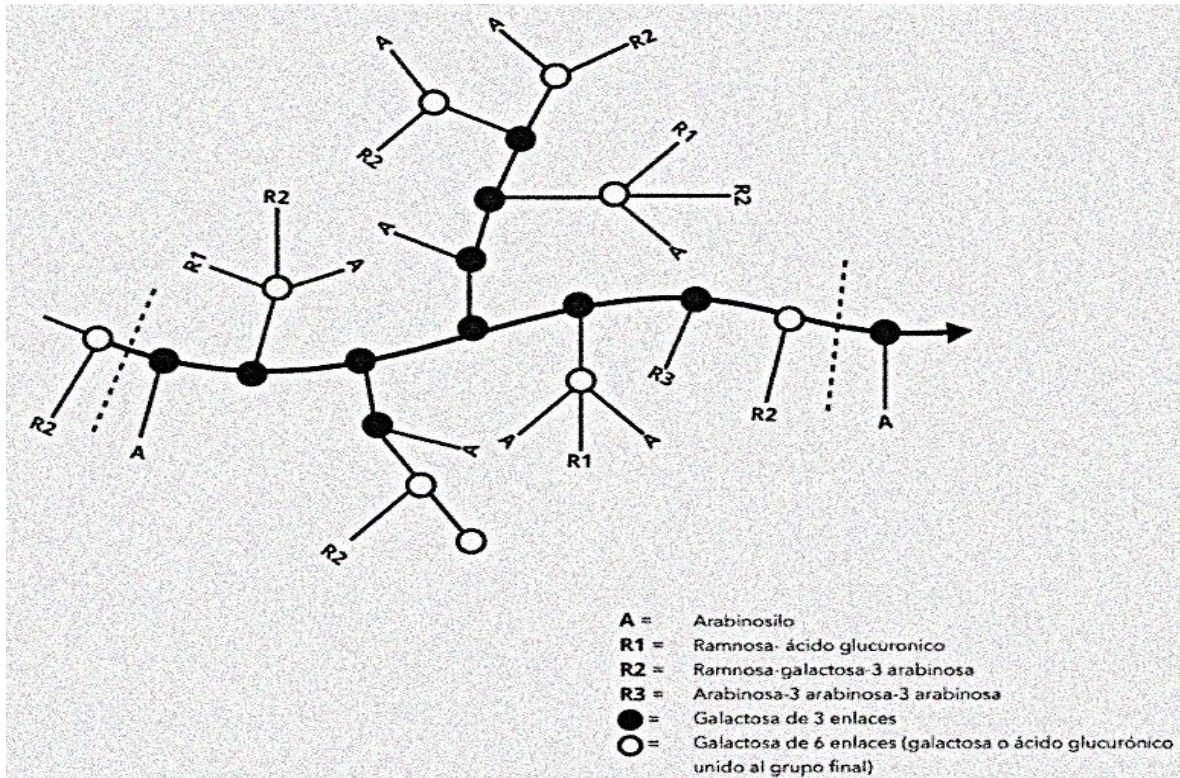


Figura 4. Estructura de la Goma Arábica

Fuente: Phillips G. & Williams, P., 2009.

### 1.3.1 Propiedades de la Goma Arábica

- Solubilidad: Debido a su extrema solubilidad en agua, puede producir soluciones hasta con un 50% de concentración. En estos altos niveles puede formar una masa gelatinosa, similar en características a las de un gel fuerte de almidón.

- Viscosidad: Las altas viscosidades que imparte la goma arábica solo se consiguen hasta que la concentración es de aproximadamente 40% a 50%. Esta característica es responsable de sus propiedades estabilizantes y emulsificantes. A concentraciones inferiores al 40%, sus soluciones tienen un comportamiento reológico newtoniano y por encima de esas concentraciones, pseudoplástico (cuadro 1).

<b>Relación de la viscosidad a concentración en soluciones de goma arábica</b>	
<b>Concentración (%)</b>	<b>Viscosidad Relativa (Cps)</b>
1.22	1.65
2.10	2.00
2.7	2.92
3.85	2.30
3.95	2.93
4.77	3.23
6.64	3.59
7.33	4.87
8.55	5.5
11.73	8.84
15.68	11.90
16.48	17.5
18.69	23.70
34.92	300
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se usó goma purificada y pipeta Ostwald a 30°, manteniendo el pH en 7.14 +/- 0.02</li> </ul>	

Cuadro 1. Viscosidad relativa de la goma arábica en concentraciones porcentuales. Adaptación de Gracia, 2006

Fuente: Gracia, 2008.

- Comportamiento reológico: A concentraciones de 40%, las soluciones de goma arábica presentan un comportamiento típicamente newtoniano, por

encima del 40% las soluciones pueden adquirir características fluidificantes, por lo que se puede observar un decremento en la viscosidad con aumento en el esfuerzo cortante.

- pH: Varios autores concuerdan en que el ácido arábigo es un ácido monobásico fuerte. La viscosidad de la goma arábica se aumenta con el incremento del pH hasta un máximo que se alcanza a un pH de 5 a 7; luego desciende en pH superiores de 10 a 14. Como se muestra en la figura 6, normalmente las soluciones de esta goma son ligeramente ácidas, presentando un pH de 4.5 a 5.5, aproximadamente y por lo tanto están en un área de máxima viscosidad (figura 5).

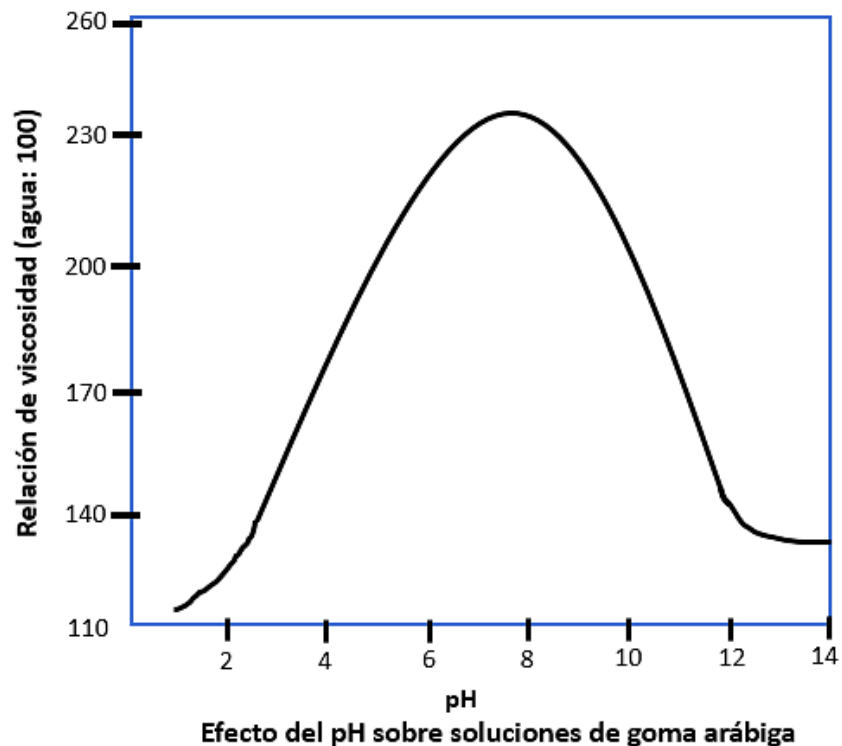


Figura 5. Efecto del pH en la viscosidad de soluciones de alginato. Adaptación de Gracia, 2008

Fuente: Gracia, 2008.

#### 1.4 Sistemas dispersos

Una dispersión o coloide es un sistema de multifases no homogéneas en equilibrio, consta de una o más fases dispersas o discontinuas, contenidas en una fase continua. Todos los coloides poseen una carga eléctrica que puede ser positiva o negativa. La carga de la fase dispersa en un coloide es del mismo signo tienden a repelerse unas a otras, lo que evita su agregación y facilita que se mantengan en suspensión y distribuidas de una manera casi uniforme en la fase continua (Badui, 2006). En el cuadro 2, se presentan algunos tipos de sistemas dispersos.

<b>Fase dispersa</b>	<b>Fase continua</b>	<b>Tipo de dispersión</b>
Gas	Líquido	<i>Espuma</i>
Líquido	Gas	<i>Niebla, aerosol</i>
Líquido	Líquido	<i>Emulsión</i>
Sólido	Gas	<i>Humo, polvo</i>
Sólido	Líquido	<i>Suspensión</i>

Cuadro 2. Tipos de dispersiones

Fuente: Fennema, 2008.

##### 1.4.1 Soles

Un sistema coloidal muy común en los alimentos es el formado por una fase sólida en una fase dispersante líquida, al que se denomina sol. En general, las partículas de la fase dispersa están constituidas por grandes macromoléculas tales como proteínas, polisacáridos y lípidos. Una característica relevante de los soles es su capacidad para pasar al estado de gel, un sistema muy común en los alimentos. En algunos casos, los soles pueden pasar al estado de gel por simple enfriamiento o por mantenerse sin alteración por un periodo corto de tiempo. En otros casos el mecanismo de gelificación requiere de otros agentes externos más complejos, como se describirán posteriormente para los geles.

### 1.4.2 Propiedades reológicas de los soles

La reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los materiales bajo la acción de una fuerza. En el caso de los soles y otros coloides fluidos, al aplicar una fuerza se obtiene un flujo por unidad de tiempo (Badui, 2006). La relación entre el esfuerzo de corte requerido para inducir una determinada velocidad de corte caracteriza el comportamiento reológico de un fluido (Alvarado, 1996).

Existen 3 tipos de fluidos:

- **Newtonianos** (proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte)
- **No newtonianos** (no hay proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte)
- **Viscoelásticos** (se comportan como líquidos y sólidos, presentando propiedades de ambos).

La relación entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de corte viene dada por la ecuación 1:

$$\sigma_{xy} = \mu \frac{dv}{dt} = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Siendo:  $\sigma_{xy}$  el esfuerzo cortante (mPa),  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido (mPa·s),  $dv/dt$  la velocidad de corte del fluido (s<sup>-1</sup>) reología) =  $\dot{\gamma}$ .

Un esquema conciso de los tipos de fluidos existentes en reología es el observado en la figura 6. En la figura 9 se han representado los diferentes tipos de fluidos en el plano esfuerzo de corte vs velocidad de corte (Ramírez, 2006).

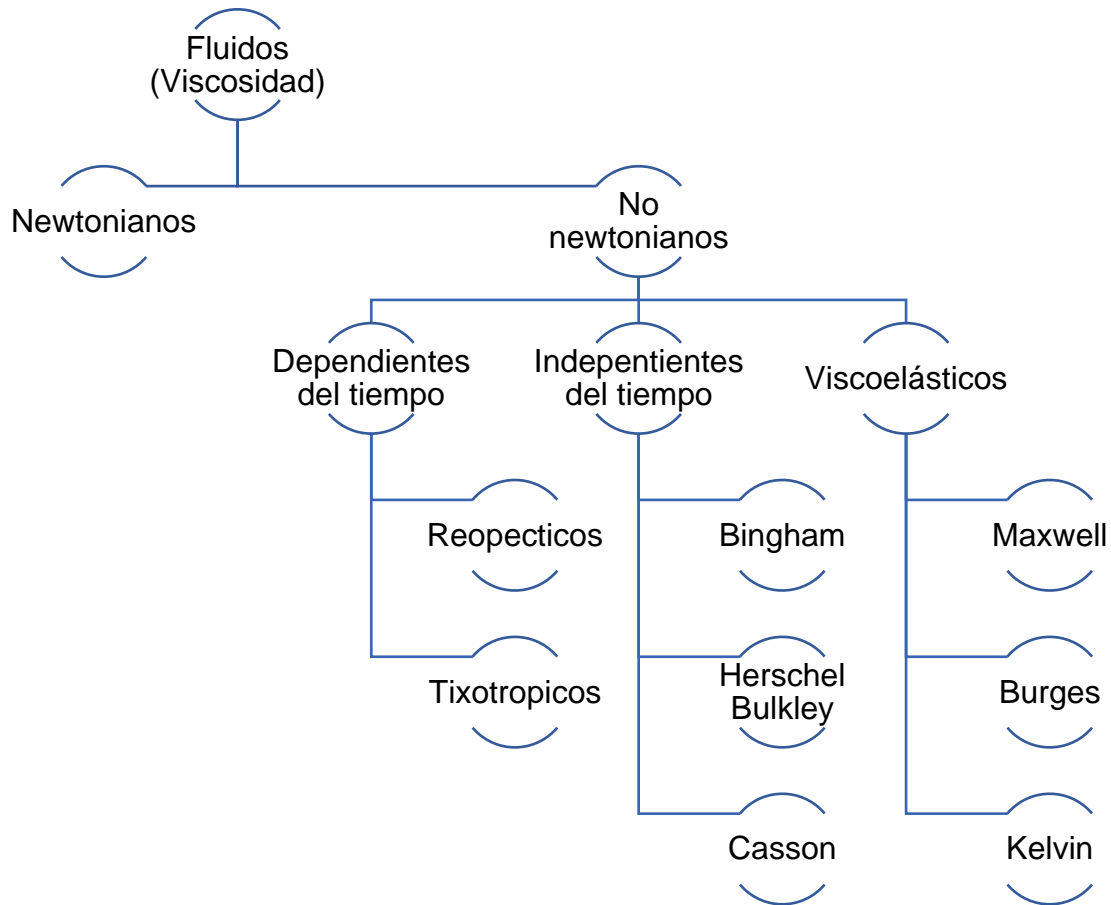


Figura 6. Tipos de fluidos reológicos, adaptación de Ramírez, 2006

Fuente: Ramírez, 2006.

#### 1.4.3 Fluidos Newtonianos

Los fluidos que obedecen la ley de viscosidad de Newton, se llaman fluidos newtonianos. En los fluidos newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante  $\sigma_{xy}$  y el gradiente de velocidad  $\frac{dv}{dt}$  (velocidad de corte). Esto significa que la viscosidad  $\mu$  es constante e independiente de la velocidad corte.

Hay que tener en cuenta también que la viscosidad de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo, aunque sí puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre. Para una mejor comprensión de este tipo de fluido se representan dos tipos de gráficas, la “Curva

de Fluidez” y la “Curva de Viscosidad”. En la curva de fluidez se grafica el esfuerzo cortante frente a la velocidad de corte ( $\sigma$  vs  $\dot{\gamma}$ ), mientras que en la curva de viscosidad se representa la viscosidad en función de la velocidad de corte ( $\sigma$  vs  $\dot{\gamma}$ ). Para un fluido newtoniano se obtienen las siguientes curvas (Figuras 7 y 8)

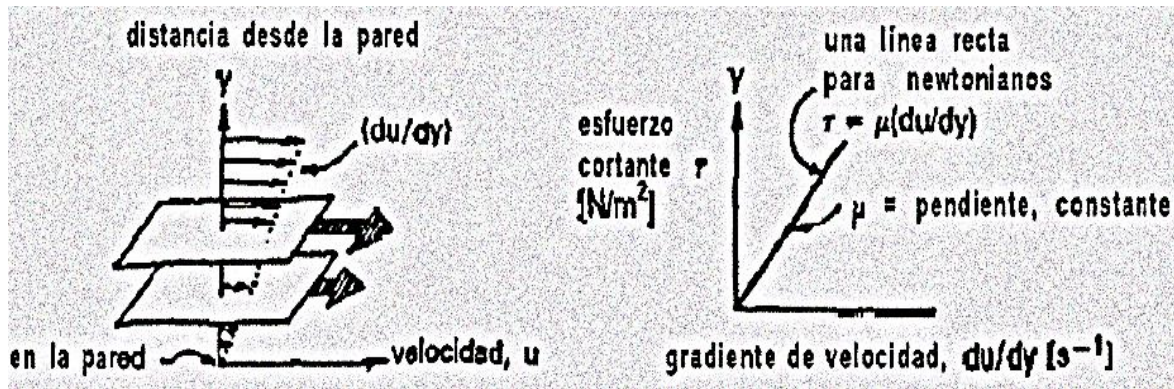


Figura 7. Representación de un fluido newtoniano

Fuente: Ramírez, 2006.

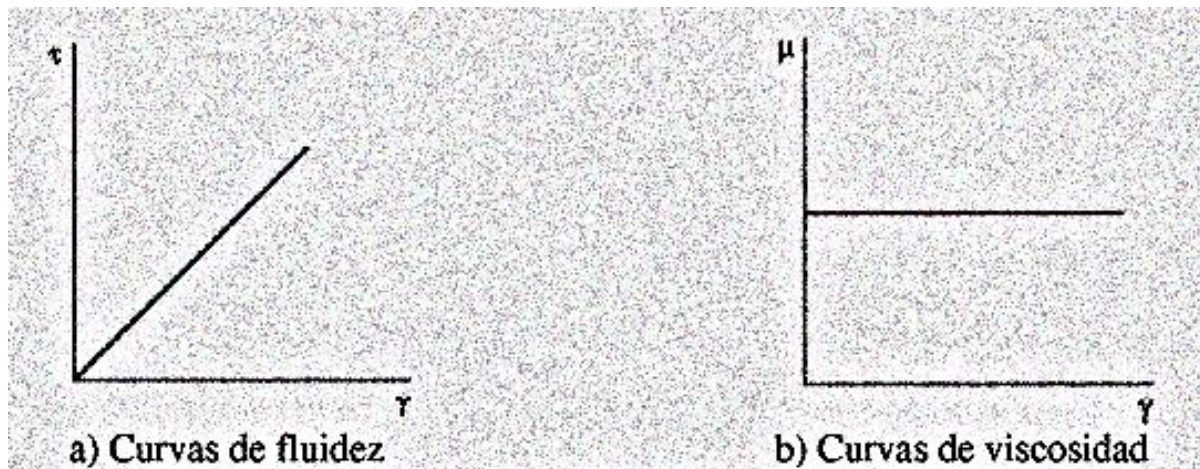


Figura 8. Curvas de fluidez y viscosidad de un fluido newtoniano

Fuente: Ramírez, 2006.

Como se puede observar en la curva de fluidez, el valor de la viscosidad es la tangente del ángulo que forman el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, la cual es constante para cualquier valor aplicado. Además, se observa en la curva de

viscosidad (figura 8) que la viscosidad es constante para cualquier velocidad de corte aplicada (Ramírez, 2006).

El flujo de un líquido newtoniano viene descrito por la siguiente ecuación 2:

$$\sigma = \eta \left( \frac{dv}{dy} \right) \quad (2)$$

dónde:

$\sigma$  = Esfuerzo cortante (N/m<sup>2</sup> o Pa)

$\eta$  = Coeficiente de viscosidad (Pa.s)

$\left( \frac{dv}{dy} \right)$  = Velocidad de corte (1/s)

Esto significa que la tensión tangencial (esfuerzo cortante) es igual a la velocidad de corte, que es el cambio de velocidad en función de la distancia de aplicación del esfuerzo cortante y se define como, velocidad de corte ( $dv/dy$ ). multiplicada por una constante: el coeficiente de viscosidad.

La representación de  $\sigma$ - $y$  es una línea recta que pasa por el origen, tal y como se puede observar en la figura 8. La pendiente de esta línea viene dada por  $\eta$ . Como  $\eta$  es una constante, basta con una determinación para caracterizar completamente el comportamiento en flujo del líquido (Quintáns, 2009), ya que, al aplicar un esfuerzo cortante a un fluido, se presentará una distribución de velocidades que disminuye su valor conforme se aleja del plano de aplicación del esfuerzo.

A temperatura constante, un fluido newtoniano presenta el mismo valor de coeficiente de viscosidad (o simplemente viscosidad), independientemente del nivel de esfuerzo de corte que se le aplique. Sin embargo; muy pocos fluidos alimenticios presentan un comportamiento newtoniano. Soles hidrofílicos muy diluidos (como la leche descremada) o con moléculas iguales de bajo peso molecular (miel de abeja pura), se acercan al comportamiento newtoniano. La mayoría de los soles alimenticios presentan desviaciones marcadas del comportamiento ideal y; por lo tanto, su viscosidad cambia al aplicar diversos valores de esfuerzo de corte, y



presentan un comportamiento no-lineal entre estos dos parámetros, como se ilustra en la figura 9.

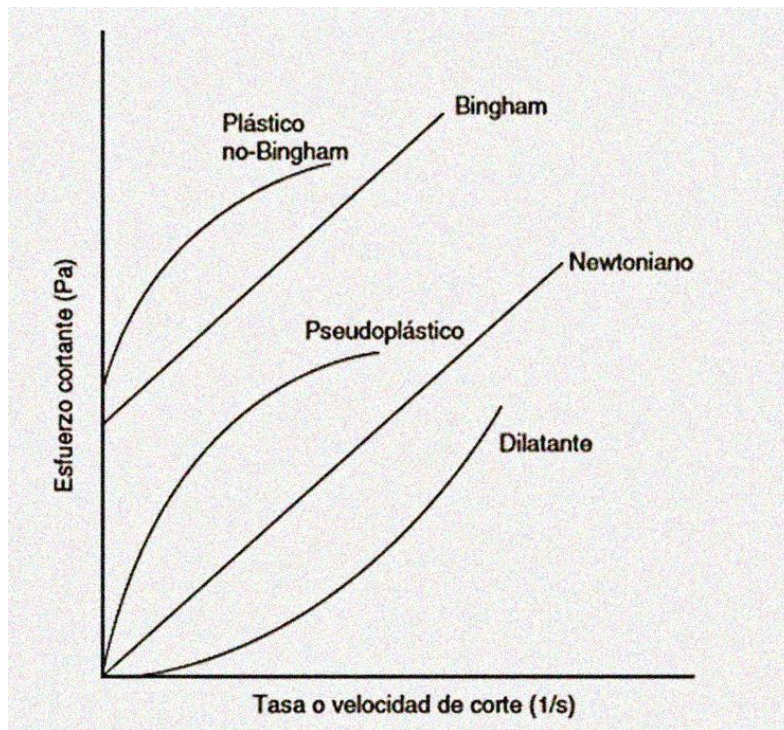


Figura 9. Comportamiento reológico de los fluidos

Fuente: Badui, 2006.

#### 1.4.4 Fluidos no newtonianos

Un fluido no Newtoniano, se define como aquel que exhibe un flujo uniforme, pero para el que no es constante la relación entre la tensión tangencial y la velocidad de corte (la viscosidad no es constante). Por lo que, la relación entre  $\sigma_{yz}$  y  $dv_z/dy$ , no es lineal; es decir, la viscosidad, no permanece constante, sino que está en función de la velocidad cortante.

Los fluidos no-newtonianos han sido denominados “Pseudoplásticos”, “dilatantes” y “plásticos”. Actualmente también, ya hay una nueva forma de definirlos como: “fluidificantes a la cizalla” y “espesantes a la cizalla”. Estos últimos se subdividen en Bingham o lineales y no-Bingham o exponenciales. Los soles fluidificantes y dilatantes muestran flujo al aplicar cualquier valor de esfuerzo cortante, mientras

que los fluidos plásticos requieren un valor inicial finito de esfuerzo (esfuerzo de umbral o cedencia)  $\sigma_0$ , antes de que presenten flujo (Badui, 2006) (figura 10).

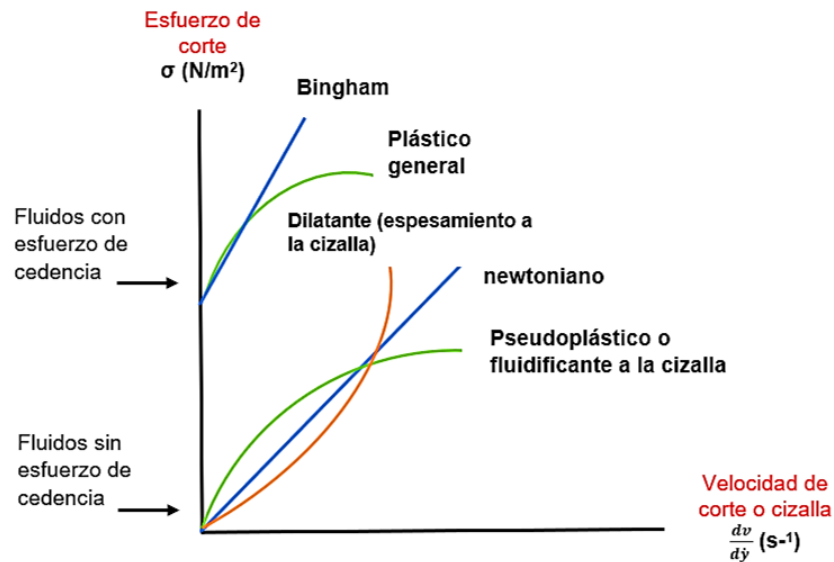


Figura 10. Esfuerzo cortante frente a la velocidad de corte para diversos tipos de fluidos no newtonianos independientes del tiempo. Adaptación de Ramírez, 2006

Fuente: Ramírez, 2006.

Existen varias ecuaciones y modelos propuestos para analizar a los fluidos no-newtonianos. El modelo más aceptado y utilizado es el modelo de la Ley de la Potencia cuya ecuación es la número 3:

$$\sigma = K \left( \frac{dv}{dy} \right)^n \quad (3)$$

dónde:

$\sigma$  = Esfuerzo cortante ( $N/m^2$  o Pa)

$K$  = Índice de consistencia (Pa.s)

$\left( \frac{dv}{dy} \right)$  = Velocidad de corte (1/s)

$n$  = Índice de flujo (adimensional)

Esta ecuación se aplica en forma logarítmica y necesita al menos dos mediciones experimentales en las que se apliquen diferentes esfuerzos cortantes, y por medio de una regresión lineal se obtiene de la pendiente el índice de flujo, y del intercepto al origen se obtiene el índice de consistencia. Este último parámetro es una representación de la viscosidad del fluido y su valor es válido sólo en el rango de los esfuerzos de corte aplicados y no puede ser extrapolado fuera de estos valores. El índice de flujo ( $n$ ) es una representación del comportamiento del sol de acuerdo con su valor, como se indica a continuación:

- ❖  $n < 1$ , flujo pseudoplástico o fluidificante y plástico no-Bingham cuando hay  $\sigma_0$ .
- ❖  $n = 1$  flujo newtoniano o plástico Bingham cuando hay  $\sigma_0$ .
- ❖  $n > 1$  flujo dilatante.

Los fluidos no newtonianos a su vez, se clasifican en dependientes del tiempo e independientes del tiempo (cuadro 3).

	Independientes del tiempo	Dependientes del tiempo
Dilución	Pseudoplasticidad o fluidificancia	Tixotropía
Espesamiento	Dilatancia	Antitixotropía

Cuadro 3. Clasificación de fluidos no Newtonianos

Fuente: Quintáns, 2009.

#### 1.4.5 Fluidos independientes del tiempo (Estado estacionario)

Estos fluidos se pueden clasificar dependiendo de si tienen o no esfuerzo de cedencia; es decir, si necesitan un mínimo valor de esfuerzo cortante para que el fluido se ponga en movimiento.

#### 1.4.5.1 Fluidos sin esfuerzo umbral o esfuerzo de cedencia

##### Fluidos pseudoplásticos o fluidificantes

Este tipo de fluidos se caracterizan por una disminución de su viscosidad, y de su esfuerzo cortante, con la velocidad de corte (Ramírez, 2006). La viscosidad aparente depende en ellos de la velocidad de corte por cizalladura, pero no del tiempo durante el que están sometidos al esfuerzo cortante.

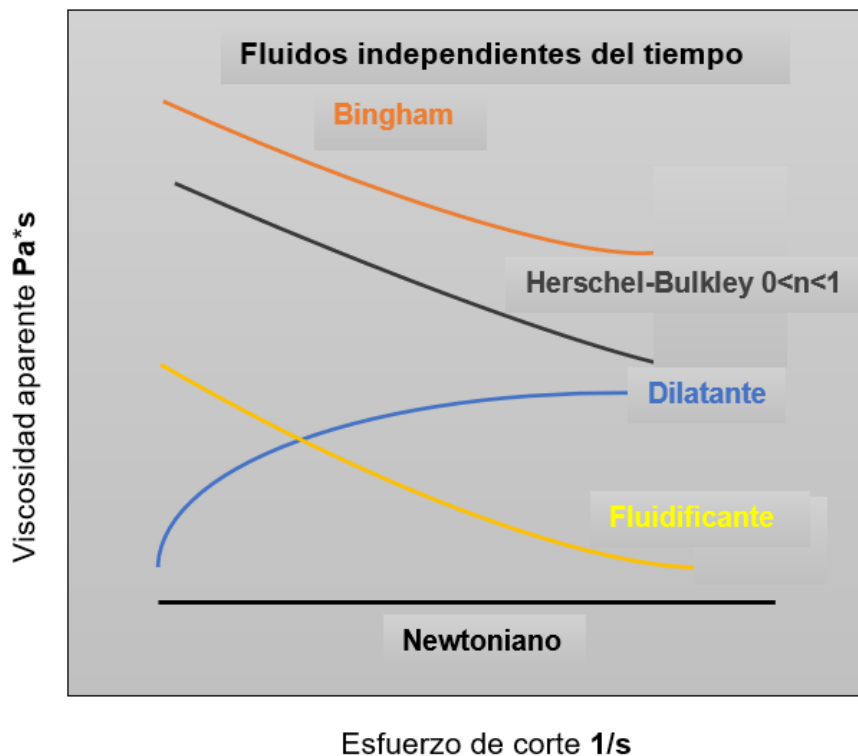


Figura 11. Viscosidad aparente frente a la velocidad de cizalla

Fuente: Ramírez, 2006.

La gráfica de  $\tau$  en función de  $\left(\frac{dv}{dy}\right)$  no es una línea recta, a cada valor de  $\tau$  le corresponde otro valor de  $\left(\frac{dv}{dy}\right)$  y a la inversa, como se ilustra en la figura 12. El calificativo de pseudoplasticidad o fluidificancia, deriva de muestras en las que las tensiones bajas corresponden velocidades de corte muy bajas, de manera que las gráficas se parecen mucho a las de un plástico de Bingham. El comportamiento

fluidificante es el más común en los soles alimenticios, ejemplos de estos soles son dispersiones de gomas (Badui, 2006).

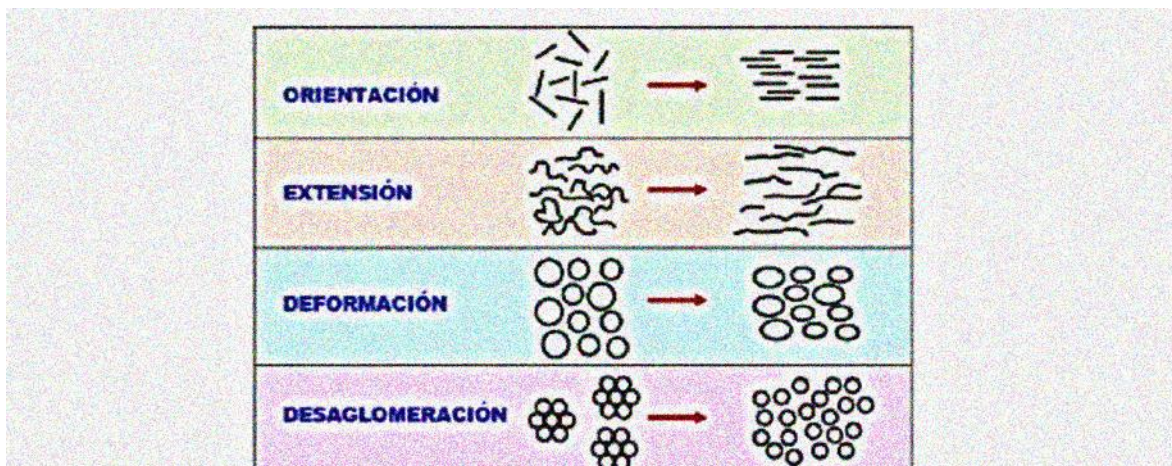


Figura 12. Pseudoplasticidad, efecto de cizalla en sustancias fluidificantes

Fuente: Ramírez, 2006.

#### Dilatancia

Es un fenómeno de espesamiento independiente del tiempo, que se da a altas velocidades de corte; se trata del fenómeno opuesto al de fluidificación. La gráfica no es lineal, pero los valores de  $\sigma$  y  $\left(\frac{dv}{dy}\right)$  relacionados ya que espesan en estado estacionario, pues la aumenta al aumentar la  $\left(\frac{dv}{dy}\right)$ , que es lo contrario de lo que ocurre con la fluidificancia, lo cual se observa en la figura 13 (Quintáns, 2009)

#### 1.4.7 Fluidos dependientes del tiempo (Estado no estacionario)

##### a) Tixotropía

La tixotropía hace referencia a que cuando un en un fluido se mantiene constante la velocidad de corte  $\left(\frac{dv}{dy}\right)$ ,  $\eta$  desciende con el tiempo, de tal manera que  $\eta$  no solo depende de la velocidad de corte, sino también del tiempo. La representación

gráfica de  $\sigma$  en función de  $(\frac{dv}{dy})$ , se obtiene aumentando  $(\frac{dv}{dy})$ , a intervalos definidos, hasta un máximo, y descendiendo luego del mismo modo, hasta que alcance el valor 0. Cuando la velocidad de corte desciende, el fluido se espesa hasta reasumir su comportamiento original como se observa en la figura 13 (Quintáns, 2009).

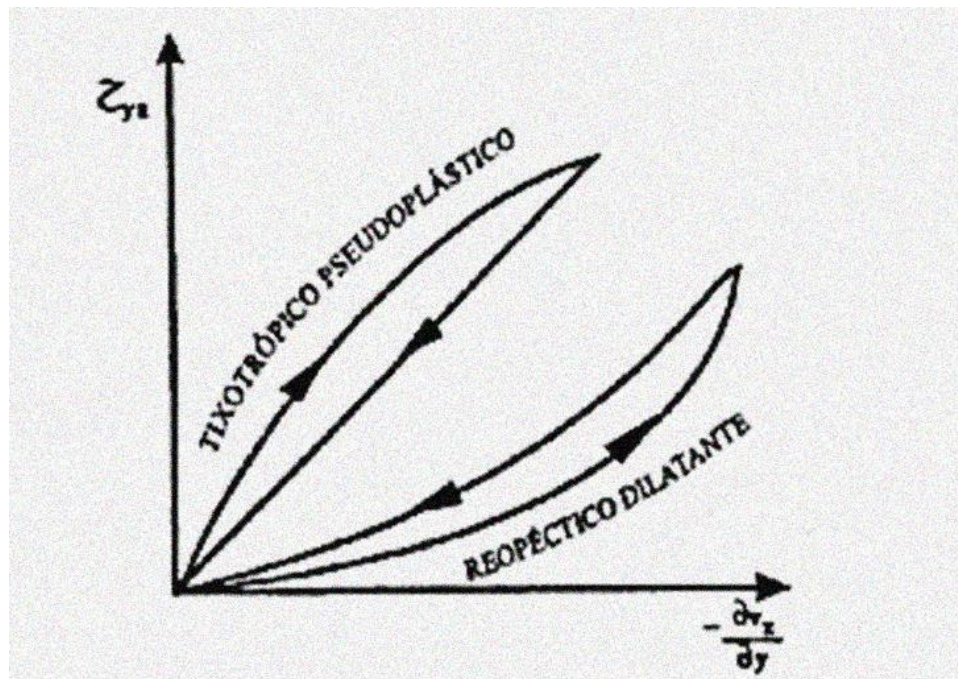


Figura 13. Comportamiento de los fluidos dependientes del tiempo

Fuente: Quintáns, 2009.

b) Antitixotropía

Los fluidos antitixotropicos (anteriormente llamados reopécticos) en cambio, se caracterizan por tener un comportamiento contrario a los tixotrópicos; es decir, que su viscosidad aumenta con el tiempo y con la velocidad de corte aplicada. Esto es debido a que si se aplica una fuerza se produce una formación de enlaces intermoleculares conllevando un aumento de la viscosidad, mientras que, si cesa, ésta se produce una destrucción de los enlaces, dando lugar a una disminución de la viscosidad (Ramírez, 2006).

## 1.5 Geles

Desde el punto de vista estructural, un gel consta de una matriz o red de macromoléculas interconectadas, que atrapan e inmovilizan a la fase líquida en sus espacios. Los geles presentan varios grados de rigidez y elasticidad, y muestran estructuras semisólidas y sólidas. Por lo general, la fase dispersante (líquido) está en mayor concentración, y aún así, cuando se obtiene el gel, se inmoviliza y la estructura final tiene cierto grado de rigidez y elasticidad.

### 1.5.1 Mecanismos de formación de un gel

Un sol puede transformarse en gel por medio de mecanismos físicos y químicos. Los agentes físicos pueden ser energía térmica y altas presiones, mientras que los agentes químicos que se pueden adicionar para inducir la gelificación son:

- 1) Iones, como el calcio para gelificación de gomas.
- 2) Ácidos orgánicos e inorgánicos, para la elaboración de carne reestructurada.
- 3) Enzimas, como la transglutaminasa bacteriana, utilizada en productos a base de surimi.
- 4) Urea, poco utilizada a nivel industrial, pero que puede producir geles transparentes de clara de huevo o albúmina bovina.

### 1.5.2 Geles de alginato

El proceso de formación del gel se inicia a partir de una solución de sal de alginato y una fuente de calcio externa o interna desde donde el ión calcio se difunde hasta alcanzar la cadena polimérica, como consecuencia de esta unión se produce un reordenamiento estructural en el espacio resultando en un material sólido con las características de un gel. El grado de gelificación depende de la hidratación del alginato, la concentración del ión calcio y el contenido de los G-bloques (Funami *et al.*, 2009).

La transición sol-gel se ha visto esencialmente controlada por la habilidad de introducir el ión vinculante al alginato. También se ha observado que la cinética de gelificación y las propiedades del gel pueden depender del tipo de contra-ión; es decir, el ión monovalente de la sal de alginato ( $K^+$  o  $Na^+$ ). De hecho, se ha encontrado que los alginatos de potasio presentan un proceso de transición sol-gel más rápido respecto de los alginatos de sodio preparados a bajas concentraciones de calcio. Y, a pesar, de que los geles de alginato de calcio obtenidos mostraron semejante estabilidad a simple vista, al ser analizadas sus propiedades reológicas, se evidenciaron marcadas diferencias en los módulos elásticos; siendo menores los valores de módulos elásticos para los geles preparados a partir del alginato de sodio que en aquellos con alginato de potasio. En este sentido, se ha señalado que este aspecto de las propiedades viscoelásticas de los geles puede ser contrarrestado utilizando alginatos con mayor composición de ácido gulurónico en su estructura (Draget, 2000).

### 1.5.3 Gelificación iónica interna

El proceso de gelificación interna consiste en la liberación controlada del ión calcio desde una fuente interna de sal de calcio insoluble o parcialmente soluble dispersa en la dispersión de alginato de sodio. Donde la liberación del ión calcio puede ocurrir de dos formas, si se tiene una sal de calcio insoluble a pH neutro pero soluble a pH ácido; por lo que, es necesario adicionar un ácido orgánico que al difundirse hasta la sal permita la acidificación del medio consiguiendo solubilizar los iones calcio. En este caso, las sales de calcio más empleadas son el carbonato de calcio y el fosfato tricálcico, y en casos específicos el fosfato dicálcico y el citrato tricálcico. Para la acidificación del medio se cuenta con ácidos orgánicos como el acético, adípico y el glucono delta-lactona. Si la sal de calcio es parcialmente soluble, el proceso de gelificación interna consiste en la adición a la mezcla alginato-sal de calcio, un agente secuestrante como el fosfato, sulfato o citrato de sodio. Al adicionar un secuestrante, este se enlaza con el calcio libre retardando así el proceso de gelificación, el sulfato de sodio ha sido comúnmente el más empleado debido a su



bajo costo y conveniente solubilidad. Los mecanismos de gelificación iónica son descritos en la figura 14 (Helgerud *et al.*, 2010).

#### 1.5.4 Gelificación iónica externa

El proceso de gelificación externa ocurre con la difusión del ión calcio desde una fuente que rodea al hidrocoloide hacia la solución de alginato de pH neutro. La formación del gel se inicia en la interfase y avanza hacia el interior a medida que la superficie se encuentra saturada de iones calcio, de manera que el ión sodio proveniente de la sal de alginato es desplazado por el catión divalente solubilizado en agua. Este interacciona con los G-bloques de diferentes moléculas poliméricas, enlazándolas entre sí. Aunque, la fuente de calcio más usada ha sido el  $\text{CaCl}_2$  debido a su mayor porcentaje de calcio disponible, existen otras sales empleadas con menor frecuencia tales como el acetato monohidratado y el lactato de calcio (Helgerud *et al.*, 2010)

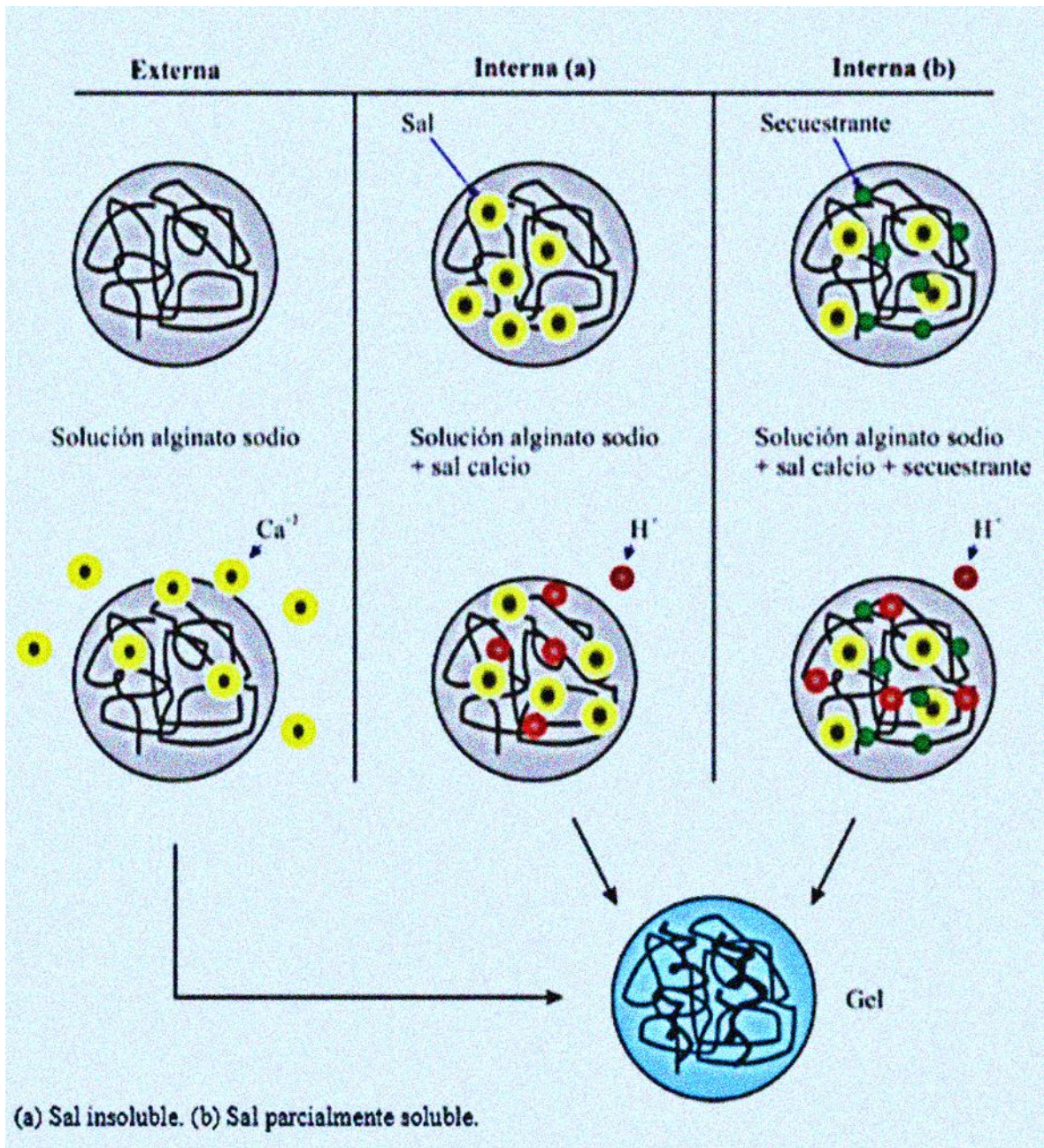


Figura 14. Mecanismos de gelificación iónica

Fuente: Helgerud, *et al.*, 2010.

La principal diferencia entre el mecanismo de gelificación externa e interna es la cinética del proceso. Si lo que se pretende es el control de la transición sol-gel, en el proceso de gelificación externa los factores a manipular son la concentración de

calcio y composición del polímero. Mientras que, para el proceso de gelificación interna se deben considerar la solubilidad y concentración de la sal de calcio, concentración del agente secuestrante y del ácido orgánico empleado (Draget, 2000)

### 1.6 Microencapsulación

La encapsulación se puede definir como una técnica por la cual gotas líquidas, partículas sólidas o gaseosas, son cubiertas con una película polimérica porosa conteniendo una sustancia activa (Araneda y Valenzuela, 2009), esta membrana, barrera o película está generalmente hecha de componentes con cadenas para crear una red con propiedades hidrofóbicas y/o hidrofílicas (Fuchs *et al.*, 2006).

Esta técnica provee un medio de envasar, separar y almacenar materiales en escala microscópica, para su posterior liberación bajo condiciones controladas (Desai y Park, 2005). Se utiliza de igual manera el término de microencapsulación en la industria alimentaria, cuando se encapsulan sustancias de bajo peso molecular o en pequeñas cantidades, aunque los dos términos, encapsulación y microencapsulación, se emplean indistintamente (Yáñez *et al.*, 2002).

En la microencapsulación, a la sustancia activa se le denomina fase interna o relleno, mientras que al material encapsulante se le llama recubrimiento o material pared (Escalona-López, 2004). Los productos obtenidos se denominan micropartículas, microesferas, microcápsulas o nano cápsulas (Reyes-Nava, 2010) (figura 15).

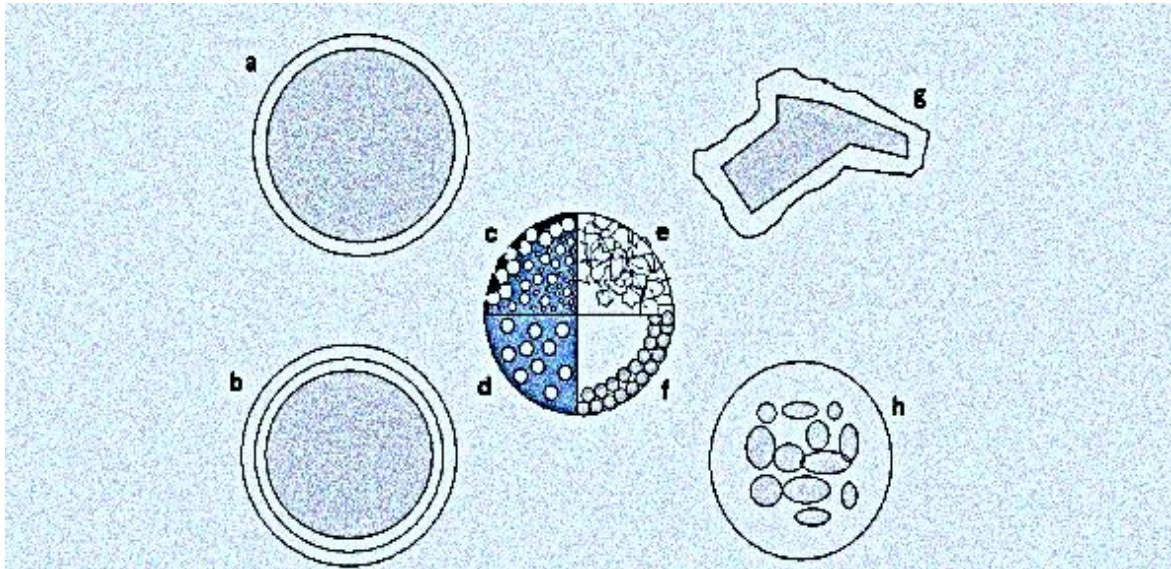


Figura 15. Microcápsulas esféricas (a), multipared (b), matriciales (c, d, e, y f) irregulares (g) y multinúcleo (h)

Fuente: Reyes-Nava, 2010.

Se pueden obtener microcápsulas de diferente tamaño (1-100  $\mu\text{m}$ ) y morfología; pueden ser de forma esférica, irregular, tener uno o varios núcleos (Reyes-Nava, 2010). La estructura de las microcápsulas depende de las características fisicoquímicas del compuesto activo, de la composición del material encapsulante y del método de encapsulación (Desai y Park, 2005).

#### 1.6.1 Métodos de encapsulación

Los métodos de encapsulación pueden ser divididos en los siguientes grupos: físicos, químicos y fisicoquímicos (Parra-Huertas, 2010). En el cuadro 4 se observan los principales métodos que se utilizan para encapsular sustancias.

Físicos	Químicos	Fisicoquímicos
Extrusión	Coacervación	Inclusión de complejos
Lecho fluidizado	Atrapamiento en liposomas	Polimerización interfacial

Cuadro 4. Distintos métodos de encapsulación

Fuente: Parra-Huertas, 2010.

Los métodos químicos incluyen principalmente la conservación y el atrapamiento de liposomas (Parra-Huertas, 2010). La conservación consiste en formar un sistema de tres fases químicamente inmiscibles (fase líquida, material a recubrir y material de cobertura), seguido de la deposición del material polimérico sobre el material a cubrir y la solidificación del recubrimiento (Martin Villena *et al.*, 2009). El atrapamiento en liposomas utiliza vesículas huecas que encapsulan parte del disolvente en el que se ha preparado y cuya membrana está formada por una o más bicapas lipídicas, generalmente de fosfolípidos (Martin Villena *et al.*, 2009).

Estos métodos físicos son muy eficientes, pero son de alto costo y su procedimiento es complicado (Yáñez *et al.*, 2002).

La inclusión de complejos y la polimerización interfacial son los métodos fisicoquímicos más utilizados para micro encapsular compuestos (Parra-Huertas, 2010). La inclusión de complejos utiliza  $\beta$ -ciclodextrinas para retener moléculas (Desai y Park, 2005). Mientras que la polimerización interfacial se basa en la formación de un polímero por reacción de dos solutos que se encuentran en fases líquidas (Bansode *et al.*, 2010). Tanto la inclusión por complejos y la polimerización interfacial son métodos efectivos; sin embargo, su costo es muy elevado (Yáñez *et al.*, 2002).

Los métodos físicos como la extrusión, el lecho fluidizado y el secado por aspersion son de bajo costo y fácil manejo (Yáñez *et al.*, 2002). La extrusión consiste en hacer pasar la emulsión conformada por el material activo y encapsulante, a través de un extrusor para darle forma de microesferas (Desai y Park, 2005). El lecho fluidizado

se basa en hacer pasar un fluido sobre un lecho con partículas sólidas, para lograr una mezcla homogénea entre las partículas y el fluido (Yáñez *et al.*, 2002). El secado por aspersión se fundamenta en la atomización de un material que se encuentra en estado líquido en una corriente de aire caliente, dentro de una cámara de secado (Escalona-López, 2004).

### 1.6.2 Encapsulación por extrusión

Este método consiste en la formación de gotas de la solución de alginato que contiene el componente a encapsular al hacer pasar dicha solución por un dispositivo extrusor de tamaño y velocidad de goteo controlado. Estas gotas caen sobre un baño que contiene la fuente del ión divalente, quien induce la gelificación mediante el mecanismo de gelificación externa (Chan *et al.*, 2009). La principal limitación presentada por esta técnica ha sido el gran tamaño de las microcápsulas, lo cual depende del diámetro de la boquilla del dispositivo extrusor. Entre otras desventajas, la dificultad de producción a gran escala debido a que la formación de las microcápsulas se logra una a una lo cual trae como consecuencia largos tiempos de gelificación (Mofidi *et al.*, 2000). Adicionalmente, es de considerar aspectos que influyen en su forma esférica y tamaño como la distancia de separación de la boquilla al baño, el efecto de la gravedad y la tensión superficial de la solución que induce la gelificación (Chan *et al.*, 2009). A pesar de todos estos factores, la técnica de microencapsulación por extrusión ha sido empleada tradicionalmente al permitir la producción de microcápsulas con tamaños uniformes.

### 1.6.3 Ventajas de la microencapsulación

Recientes estudios, demuestran que la aplicación de esta técnica mejora notablemente al incorporar dispositivos extrusores como boquillas múltiples y discos aspersores (Champagne *et al.*, 2000), inyectoros con impulsos vibratorios (Dohnal y Štěpánek, 2010) e incluso con flujo de aire incorporado (Mark *et al.*, 2009), todos diseñados bajo el mismo objetivo, la producción masiva de microcápsulas. Como

ejemplo, en la figura 16 se muestran diferentes tipos de dispositivos extrusores para la preparación de microcápsulas (Zuidam y Shimoni, 2010).

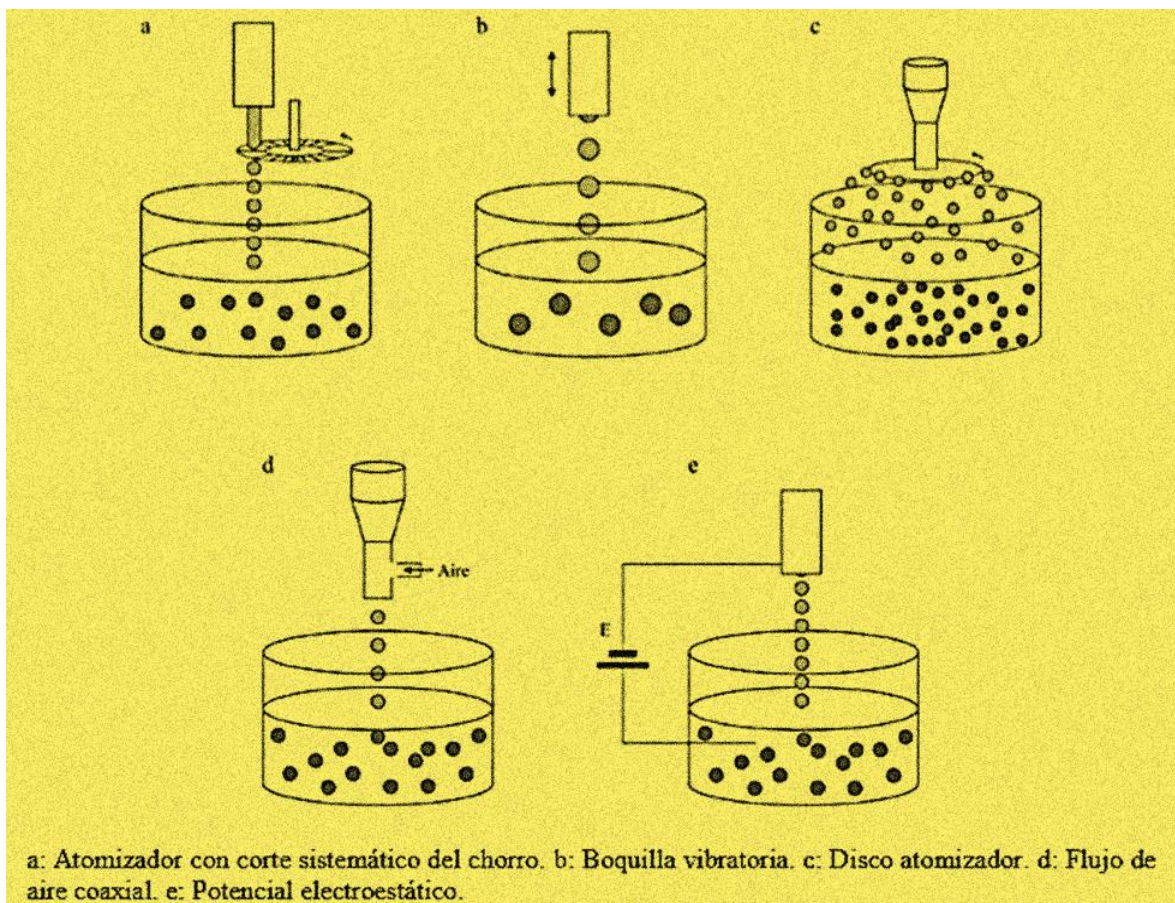


Figura 16. Tipos de dispositivos extrusores

Fuente: Zuidam y Shimoni, 2010.

#### 1.6.4 Usos de la microencapsulación en la industria alimenticia

Respecto al área de alimentos, las aplicaciones de esta técnica se han ido incrementando debido a la protección de los materiales encapsulados de factores como calor y humedad, permitiendo mantener su estabilidad y viabilidad. Las microcápsulas, ayudan a que los materiales alimenticios empleados resistan las condiciones de procesamiento y empaque mejorando sabor, aroma, estabilidad, valor nutritivo y apariencia de sus productos (Yáñez *et al.*, 2002; Montes, De Paula y Ortega, 2007). Una aplicación especialmente importante en alimentos es la nano

encapsulación que involucra la incorporación, absorción o dispersión, de componentes bioactivos en pequeñas vesículas con diámetro nano (o submicrón) (Bouwmeester *et al.*, 2009), estas nanopartículas encapsuladas en la interfase de gotas de emulsión pueden mejorar la estabilidad y controlar las gotas (Prestidge, 2006); y ser utilizadas como transportadores comestibles para componentes de sabor-aroma o para encapsulación o nutraceuticos, así como para mejorar la elasticidad de plásticos y paquetes de alimentos bioactivos (Sozer y Kokini, 2009).

La técnica de microencapsulación ha permitido solucionar algunos problemas limitando las aplicaciones de ingredientes y aditivos alimenticios, puesto que puede controlar la eliminación de saborizantes, así como reducir volatilidad, higroscopicidad y reactividad incrementando la estabilidad de productos bajo condiciones ambientales adversas (Favaro *et al.*, 2010).

Hoy en día muchas sustancias pueden ser encapsuladas en partículas en polvo sólidas o ellas pueden ser micro encapsuladas en emulsiones estructuradas (Palzer, 2009). A continuación, se presentan algunas de ellas: perfumes, fertilizantes, precursores en impresión (Madene, Scher y Desobry, 2006), aceite de limón, fármacos (Muthuselvi y Dhathathreyan, 2006), lípidos, sabores volátiles (Fuchs *et al.*, 2006; Murúa, Beristain y Martínez, 2009), conservación de tejidos (Rai *et al.*, 2009), probióticos (Champagne y Fustier, 2007), prebióticos, nutraceuticos (Ferreira, Rocha y Coelho, 2006; Sozer y Kokini, 2009; Sultana *et al.*, 2003; Bastos, Araujo y Leao, 2009), semillas de frutas como banano, uvas, guayaba, papaya, manzana, mora, granadilla y semillas de cítricos también han sido encapsuladas entre otras sustancias (Rai *et al.*, 2009). Al respecto, la encapsulación ofrece grandes alcances para la conservación, germinación e intercambio de varias especies frutales, resultando en técnica promisoría para la conservación, transporte de plantas transgénicas y plantas no productoras de semillas (Rai *et al.*, 2009), lactasa (Kwak, Ihm y Ahn, 2001), colorantes, enzimas, fitoesteroles, luteína, ácidos grasos, pigmentos vegetales, antioxidantes (Champagne y Fustier, 2007), componentes de aromas y oleorresinas, vitaminas, minerales (Young, Sarda y Rosenberg, 1992; Fuchs *et al.*, 2006).



## Justificación del trabajo

En el campo de la producción animal se ha estudiado el uso de bacterias lácticas (BL) como probióticos, para ayudar a mantener un perfil microbiano favorable, en el intestino, al reducir la microbiota colibacilar en los animales, durante periodos de estrés. El término probiótico cuyo significado griego es “a favor de la vida” se utiliza para designar las bacterias que tienen efectos beneficiosos para los seres humanos y los animales con respecto a la salud no solo del tracto gastrointestinal, sino también respiratorio, urogenital, así como modulador del sistema inmune.

En 1907, Elías Metchnikoff fue ganador del Premio Nobel por el desarrollo de la teoría fagocítica e identificado como el padre de las bacterias lácticas, en su libro “La prolongación de la vida” recomendó el uso de productos lácteos fermentados que contuvieran *Lactobacillus bulgaricus*, capaces de vivir, crecer y producir efectos favorables en el tracto digestivo (Sandoval, 2016)

Diversos estudios demuestran que la microencapsulación de cepas microbianas con el uso de soportes (prebióticos) mejora su viabilidad bajo condiciones de estrés (temperatura, pH y almacenamiento).

Dichos estudios han demostrado que los cultivos probióticos pueden protegerse mediante una variedad de materiales encapsulantes. Dentro de estos se consideran los alginatos y sus combinaciones con el almidón, los derivados de celulosa, la gelatina, la mezcla de xantano-gelatina, carrageno, goma arábiga, quitosano, las maltodextrinas y las proteínas de suero de leche.

Por lo anterior expuesto, se planteó la necesidad de desarrollar un sistema de microcápsulas para ser utilizadas como medio de transporte de probióticos, para lo cual, se evaluó el comportamiento reológico de dispersiones de alginato de sodio 2% y en mezcla con goma arábiga 1% y 2%. Posteriormente se evaluó el efecto del uso de dos diámetros de extrusor distintos mediante la caracterización de las microcápsulas extruidas, para la evaluación de la morfología, características de sus superficies y tamaños obtenidos con microscopía óptica y el uso del vernier. También, se sometieron a un proceso de liofilización para determinar mediante

microscopía electrónica de barrido, el efecto del uso de distintos diámetros de extrusor, así como las interacciones de la mezcla del alginato de sodio y la goma arábica, sus estructuras, formas y tamaños. Finalmente se determinaron aquellas condiciones de extrusión y concentración de polímeros que favorecen la estabilidad de las microcápsulas.

### **Hipótesis del trabajo**

La naturaleza aniónica de la dispersión de alginato de sodio/goma arábica expuesta a los cationes divalentes de la solución de  $\text{CaCl}_2^+$  favorecerá a la formación de microcápsulas debido a una interacción iónica electrostática entre los cationes del Ca y los grupos  $\text{OH}^-$  de los polímeros.

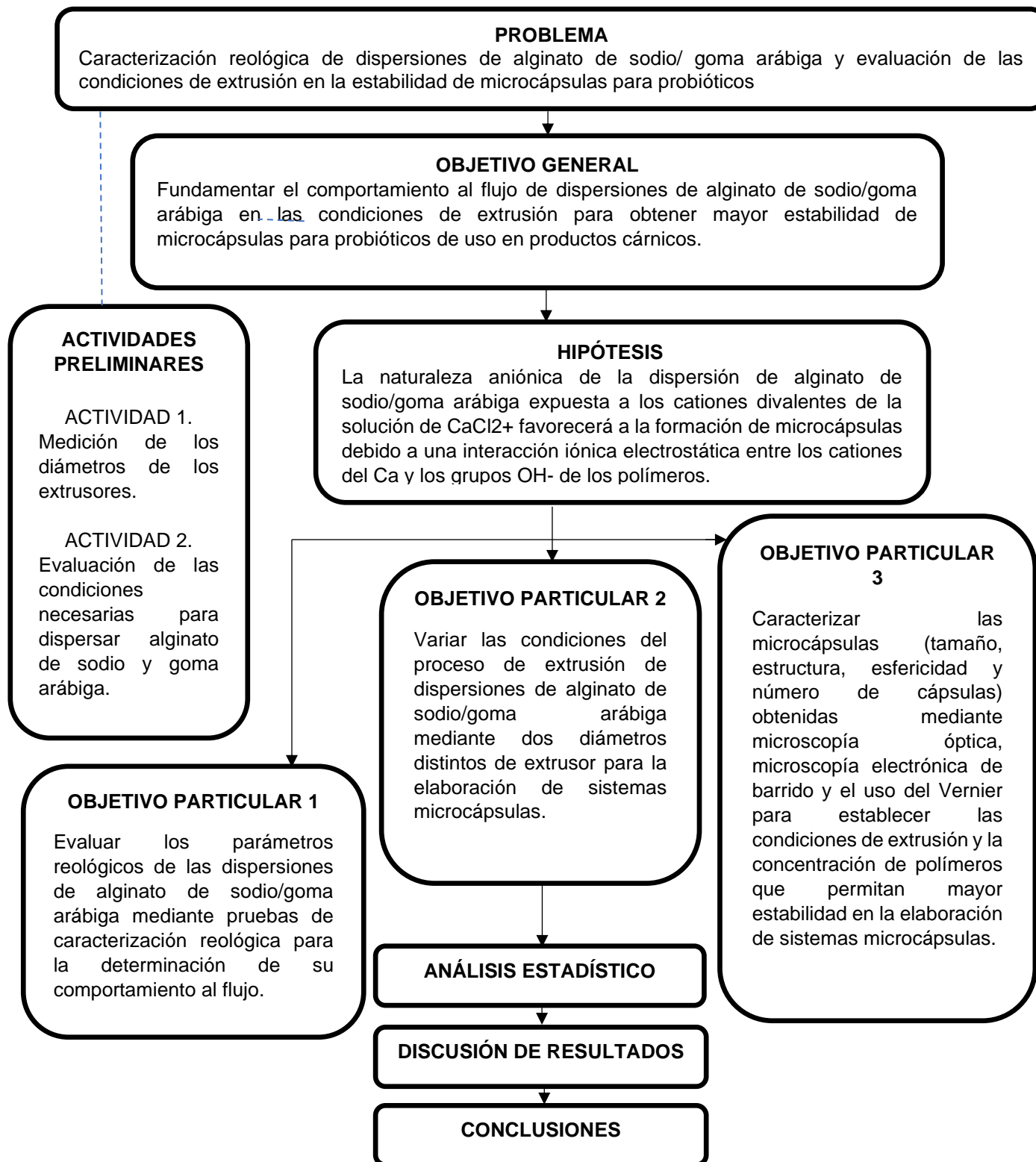
### **Objetivo general**

Fundamentar el comportamiento al flujo de dispersiones de alginato de sodio/goma arábica en las condiciones de extrusión para obtener mayor estabilidad de microcápsulas para probióticos de uso en productos cárnicos.

### **Objetivos particulares**

- I. Evaluar los parámetros reológicos ( $\sigma_0$ , K y n) de las dispersiones de alginato de sodio/goma arábica mediante pruebas de caracterización reológica para la determinación de su comportamiento al flujo.
- II. Variar las condiciones del proceso de extrusión de dispersiones de alginato de sodio/goma arábica (Alg 2%, Alg 2%mm-G. Ará 1% y Alg 2%-G. Ará 2%) mediante dos diámetros distintos de extrusor (1mm y 1.75 mm) para la elaboración de sistemas microcápsulas.
- III. Caracterizar las microcápsulas (tamaño, estructura, esfericidad y número de cápsulas) obtenidas mediante microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y el uso del Vernier para establecer las condiciones de extrusión y la concentración de polímeros que permitan mayor estabilidad en la elaboración de sistemas microcápsulas.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL



## 2.1 Metodología Experimental Desarrollada

### 2.1.1 Preparación de dispersiones de alginato de sodio y goma arábica.

Para la elaboración de las dispersiones se utilizaron dos polisacáridos que fueron alginato de sodio DVA, MEXICANA (Anexo 1) y goma arábica MAKYMAT (Anexo 2), con las cuales se prepararon dispersiones al 2% en el caso del alginato de sodio, y en mezcla con goma arábica al 1 y 2 %. Estas se dispersaron en 200 ml de agua destilada, con el objetivo de que el volumen de dispersión fuera suficiente para realizar las pruebas reológicas, así como la elaboración de las microcápsulas.



Figura 17. Alginato de Sodio y Goma Arábica

Debido a lo reportado en la bibliografía en cuanto a la naturaleza y comportamiento de estos polisacáridos, para su dispersión total, se utilizó un agitador de propelas (KIKA WERKE, Rw 16) (figura 18) a velocidades de 500 a 900 rpm sin necesidad de aplicar temperatura, por lo que se dispersó a temperatura ambiente de 20 a 22 °C, y aproximadamente por periodos de 50 a 90 min.



Figura 18. Agitador de propelas, KIKA WERK, Rw 16

### 2.1.2 Caracterización reológica de dispersiones de Alginato de sodio y goma arábica

Una vez preparadas las dispersiones se hizo la caracterización reológica con un viscosímetro de cilindros concéntricos (Rheomat, Mettler RM 180) (figura 19) utilizando el huso No 2 del equipo, que permitió hacer la lectura de la prueba.



Figura 19. Viscosímetro de cilindros concéntricos, Rheomat, Mettler RM

### 2.1.3 Elaboración del sistema extruido con alginato de sodio y goma arábica

Las microcápsulas fueron elaboradas por medio de la extrusión de las dispersiones de polisacárido de acuerdo con la metodología descrita por Krasaekoopt (2004), en la cual se varió el diámetro del extrusor (figura 20).

Ocho mililitros de cada dispersión de polímeros fue extruido a través de diámetros de 1 mm y 1.75 mm -en 30 ml de una solución de  $\text{CaCl}_2$  al 0.05M, con un tiempo de permanencia de 30 min para permitir su completa gelificación.



Figura 20. Extrusión de dispersiones

Después de la gelificación, las microcápsulas se colectaron por decantación, depositando 5 cápsulas en cada caja Petri, para ser observadas por microscopia óptica y el resto en tubos de ensayo para someterlas a un proceso de ultracongelación en un (Revco Ultima II, Thermo Co.) a  $-55^{\circ}\text{C}$  durante un periodo de 24h (figura 21)



Figura 21. Revco Ultima II, Thermo



#### 2.1.4 Liofilización de los extruidos

Los extruidos ultracongelados se secaron a punto crítico, liofilización en una liofilizadora (LABOCONCO, Freezone 4.5) (figura 22) a  $-47^{\circ}\text{C}$  durante 24 h y a una presión de vacío de 0.07mBar (figuras 20 y 21)



Figura 22. Liofilizadora (LABOCONCO, Freezone 4.5)



Figura 23. Cápsulas liofilizadas

### 2.1.5 Evaluación de las cápsulas por microscopía óptica

La morfología y superficie de las microcápsulas fue examinada mediante microscopía óptica en un microscopio Olympus mod. CX31 (figura 24) con el aumento de 4x y nivel 2 de luz ya que fue el aumento y la intensidad de luz que permitieron observar lo mejor posible la superficie y morfología de los extruidos.



Figura 24. Microscopio óptico Olympus mod. CX31

### 2.1.6 Determinación del diámetro de los extruidos

La medición del diámetro de los extruidos con los dos diámetros distintos se realizó con ayuda del vernier (figura 25).

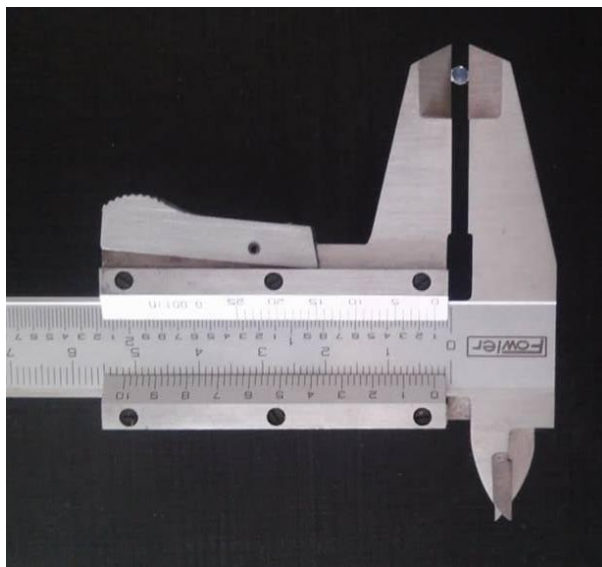


Figura 25. Medición del diámetro con vernier

#### 2.1.7 Evaluación de las microcápsulas por microscopía electrónica de barrido (MBE)

Para la determinación del tamaño y la estructura de las cápsulas se estudiaron mediante MBE, en un equipo JEOL JSM-6010LA, para lo cual, las cápsulas liofilizadas fueron previamente fijadas y bañadas con oro durante 300 s a 7 mApe, utilizando una ionizadora de oro Desk V, Denton Vacuum (USA) y se evaluaron las características estructurales y morfológicas a diferentes aumentos (18X, 37X y 43X). las microcápsulas y cubrieron con oro durante utilizando una ionizadora de oro (Desk V, Denton Vacuum, USA) (figura 26) y se evaluaron las características estructurales y morfológicas a diferentes aumentos (43X, 250X y 1500X) estableciendo las mediciones de sus ejes con un microscopio electrónico de barrido (Modelo JSM-6010LA, JEOL USA) a 10 kV (figura 27).



Figura 26. Ionizadora de oro (Desk V, Denton Vacuum, USA)



Figura 27. MEB JEOL JSM-6010LA

### 3. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 Análisis Estadístico

Para realizar el análisis de los resultados obtenidos con respecto al número de cápsulas obtenidos durante la extrusión y la interacción que hay entre la distintas concentraciones de polisacárido y los dos diámetros del extrusor y así poder determinar las mejores condiciones de la extrusión de polisacáridos y la concentración que resulte más adecuada para fungir como soporte de probióticos, se utilizó un análisis ANOVA de una vía, con una prueba de Tukey con nivel de significancia del ( $P < 0.05$ ).

#### 3.2 Caracterización reológica de las dispersiones de polisacáridos

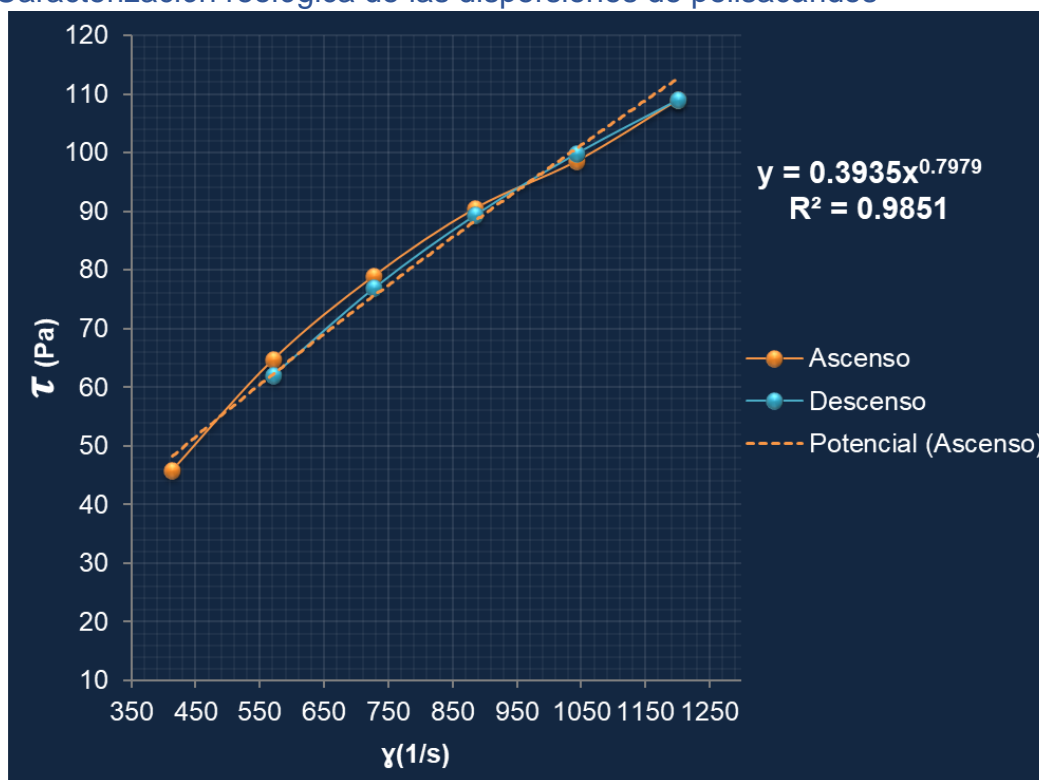


Figura 28. Resultados de la caracterización reológica de la dispersión de Alginato de Sodio al 2%

Como se puede apreciar en la figura 28, al caracterizar reológicamente la dispersión de alginato de sodio al 2%, mostró un comportamiento no Newtoniano, ya que la relación entre el esfuerzo corte y la velocidad de corte no se comportó constante, pues no presento proporcionalidad entre los mismos, lo cual indica que, al aumentar la velocidad de corte, las moléculas comenzaron a unirse en forma paralela, ordenándose en dirección del flujo y, por ende, disminuyendo la resistencia a fluir, característica de las dispersiones de alginato (Imeson, 2010). Al determinar su índice de comportamiento al flujo (n), se obtuvo un valor de 0.7979, menor a 1, que; además presentó un esfuerzo de cedencia, comportándose como un fluido del tipo Herschel Bulkley (Badui, 2008)

Por lo anterior mencionado y mediante extrapolación, se determinó el esfuerzo umbral necesario de la dispersión, el cual fue de 38.31 Pa; es decir, que a partir de esta fuerza, la dispersión dejó de comportarse con características de un sólido y comenzó a mostrar cedencia al flujo, coincidiendo con Imeson (2010), quien le atribuye este comportamiento a sus largas cadenas de polímeros y la rigidez de las moléculas hidratadas del alginato, demostrando también que este fluido en reposo tiene características de un material sólido en el cual no tiene influencia el efecto de la gravedad, en una superficie plana y hasta que sobrepasa el esfuerzo de cedencia se comporta realmente como un fluido.

Por lo tanto, se deduce que el comportamiento reológico de la dispersión de alginato de sodio al 2% es del tipo Herschel-Bulkley el cual se representa mediante el siguiente modelo matemático de la ecuación 5:

$$\sigma = \sigma_0 + k (\dot{\gamma}^n) \quad (4)$$

$$\sigma = 38.31Pa + 0.3935 cP (\dot{\gamma}^{0.7979}) \quad (5)$$

Dónde:

$\sigma_0$  = Esfuerzo umbral inicial (Pa)

$k$  = Índice de consistencia (cP)

$n$  = Índice de comportamiento al flujo

$\dot{\gamma}$  = Velocidad de corte(1/s)

Posteriormente en la figura 29, se representó el comportamiento de la viscosidad aparente en función de la velocidad de corte, donde se aprecia la disminución de la viscosidad aparente al incrementar la velocidad de corte, lo cual coincide con lo reportado en la literatura por Ramírez (2006).

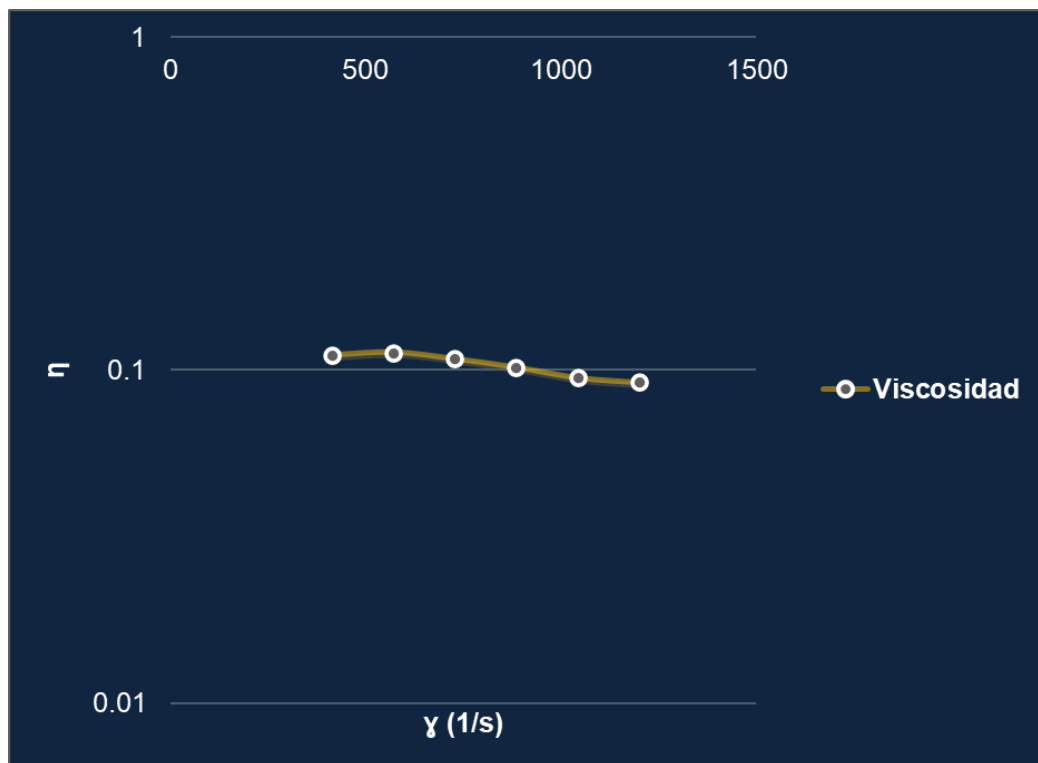


Figura 29. Viscosidad del alginato de sodio 2%

También, este descenso de la viscosidad se debe a que, al aplicar velocidades de corte de forma creciente, las moléculas del alginato se encuentran distribuidas al azar debido al movimiento browniano. Por lo que, al incrementar la velocidad de corte, las moléculas comienzan a unirse en forma paralela ordenándose en la dirección del flujo y disminuyendo, por tanto, la resistencia a fluir. Como resultado, la viscosidad aparente disminuirá al aumentar la velocidad de corte más allá de la zona newtoniana primaria del sistema (Imeson, 2010).

Este comportamiento también lo referencia Mackosco (1994), quien menciona que la pseudoplasticidad o fluidificancia de las dispersiones de alginato de sodio se puede explicar de acuerdo con la formación de puentes de hidrógeno y fuerzas intermoleculares de Van Der Waals y la ruptura de éstas mismas interacciones entre las moléculas del alginato de sodio, y al desenmarañamiento de estas. En ausencia de cizalla, la dispersión se encontraría en un estado aleatorio de “equilibrio”, en el cual la movilidad en las cadenas del polímero, propiciada por la temperatura, produce la simultánea desaparición y formación de interacciones entre las distintas cadenas poliméricas; la presencia de dichas interacciones y los posibles enmarañamientos entre las cadenas poliméricas son los responsables de la viscosidad del fluido.

Cuando comienza a actuar un esfuerzo de corte sobre el fluido se produce una mayor destrucción de las interacciones entre las cadenas poliméricas del alginato de sodio, pero la movilidad térmica es capaz de compensarlas creándose por otra parte, dando lugar a cambios apenas observables en la viscosidad del fluido. Sin embargo, si se continúa aumentando el esfuerzo de corte, se puede alcanzar un momento a partir del cual, se destruyen más interacciones de las que se crean, dando lugar a una pérdida de la estructura presente; por otra parte, se puede producir también un desenmarañamiento y una alineación de las cadenas poliméricas, que produce una mayor separación entre ellas, siendo el resultado neto de ambos efectos un descenso en la viscosidad del fluido (Banres, 1989).



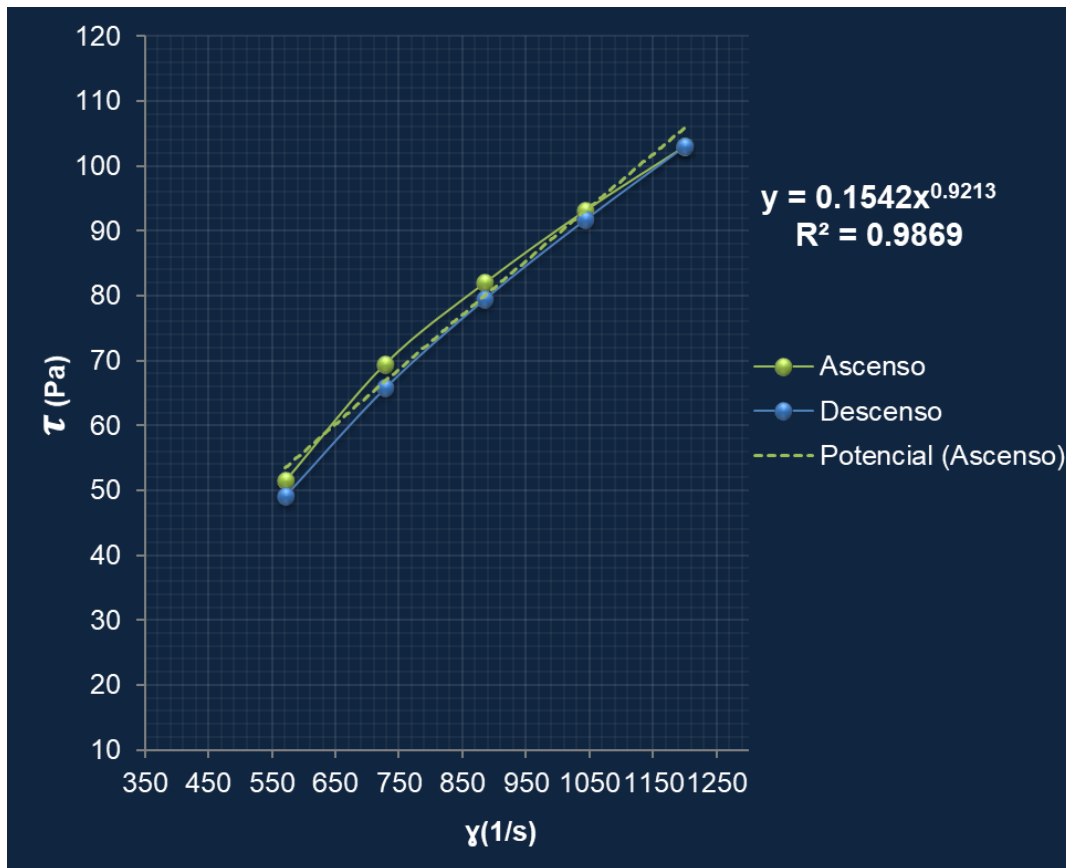


Figura 30. Resultados de la caracterización reológica de la dispersión de Alginato de sodio al 2% - Goma arábica 1%

La caracterización reológica de la dispersión de la mezcla de Alginato de sodio 2% - Goma arábica 1% (figura 30) tampoco presentó una relación proporcional entre la velocidad de corte y el esfuerzo cortante; presentando también un comportamiento no newtoniano. El valor de la dispersión en cuanto al índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) fue de 0.9213, con un esfuerzo inicial de cedencia al flujo de 41.88 Pa, caracterizándose como un fluido del tipo Herschel-Bulkley, siendo menor a 1, además de mostrar un esfuerzo de cedencia al flujo.

Uno de los efectos que se visualizó fue que el índice de consistencia ( $K$ ), tuvo un valor de 0.1542, valor que es menor con respecto al que se obtuvo de la dispersión de alginato de sodio al 2%, lo cual se debe al carácter polianiónico propio de los polímeros y las fuerzas intermoleculares de Van Der Waals que surgen al dispersarse en conjunto.

La caracterización reológica de la dispersión de igual forma quedó representada mediante la ecuación 7:

$$\sigma = \sigma_0 + k (\dot{\gamma}^n) \quad (6)$$

$$\sigma = 41.88Pa + 0.1542cP (\dot{\gamma}^{0.9213}) \quad (7)$$

Dónde:

$\sigma_0$  = Esfuerzo umbral inicial (Pa)

$\dot{\gamma}$  = Velocidad de corte (1/s)

$k$  = Índice de consistencia (cP)

$n$  = Índice de comportamiento al flujo

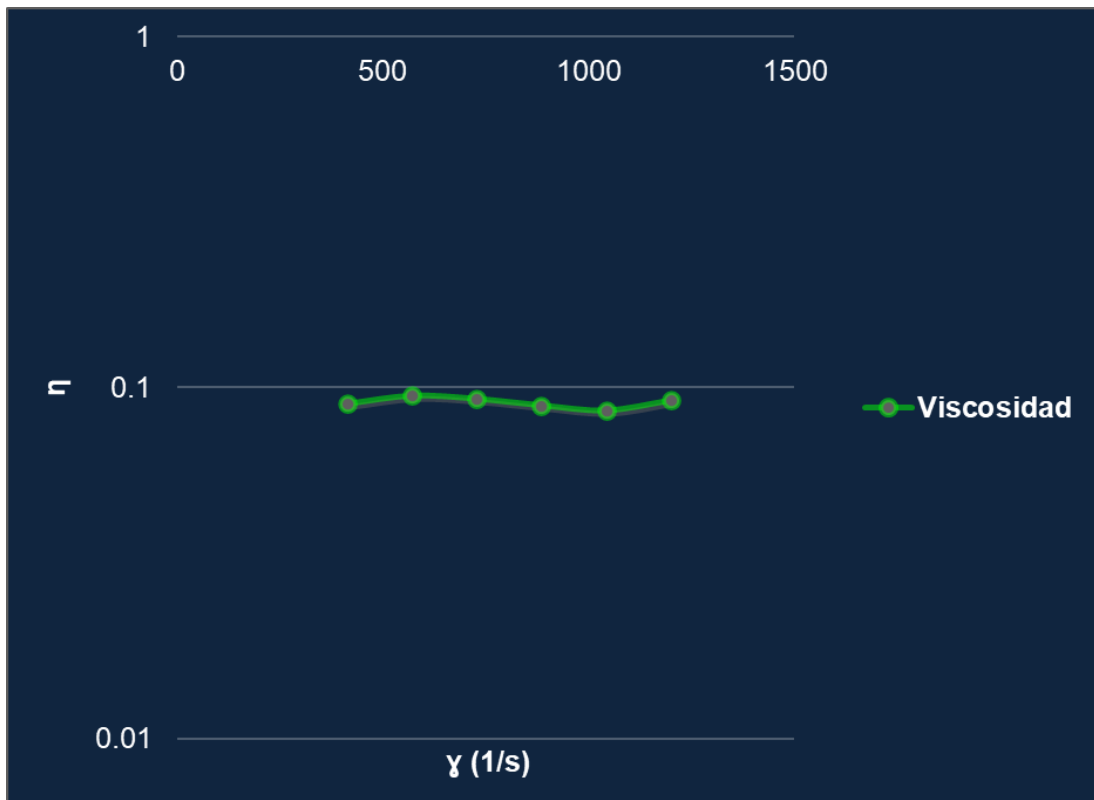


Figura 31. Viscosidad aparente del alginato de sodio 2% - Goma Arábica 1%

La Figura 31, muestra la disminución de la viscosidad aparente con la respecto al aumento de la velocidad de corte, lo cual coincide también, con lo reportado en la literatura por Ramírez, (2006)

Este efecto, se le atribuye a que, al dispersar el alginato de sodio y la goma arábica, esta última exhibe una estructura ramificada corta y como resultado de ello, sus moléculas colisionan entre sí con menos frecuencia y produciendo por tanto menor viscosidad (Fennema 2008). Además, se generan interacciones moleculares entre los polisacáridos y fuerzas de repulsión que afectan a la viscosidad de la dispersión.

Por otra parte, la caracterización reológica de la dispersión de Alginato de sodio 2% - Goma arábica 2% (figura 32) mostró con un índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) de 0.9215, menor a 1, caracterizándose también como un fluido Hershel-Bulckley, con un esfuerzo umbral inicial de 29.56 Pa. El índice de consistencia ( $K$ ), tuvo un valor de 0.1503, el cual muestra una disminución mayor en comparación a la dispersión de alginato de sodio 2% - goma arábica 1%. Esto se debe probablemente a la naturaleza estructural ramificada y grado de polimerización de la goma arábica, que, pese a que se adiciono en proporción con el alginato de sodio, está se caracteriza por proporcionar fluidos del tipo newtonianos a concentraciones por debajo del 40%, por que el comportamiento reológico de las dispersiones fue el mismo; sin embargo, se demostró un ligero descenso en el índice de consistencia, debido a las interacciones moleculares entre los polímeros.

El comportamiento reológico quedó representado matemáticamente de la siguiente manera (ecuación 9):

$$\sigma = \sigma_0 + k (\dot{\gamma}^n) \quad (8)$$

$$\sigma = 29.56 \text{ Pa} + 0.1503 \text{ cP} (\dot{\gamma}^{0.9275}) \quad (9)$$

Donde:

$\sigma_0$  = Esfuerzo umbral inicial (Pa)

$\dot{\gamma}$  = Velocidad de corte (1/s)

$k$  = Índice de consistencia (cP)

$n$  = Índice de comportamiento al flujo

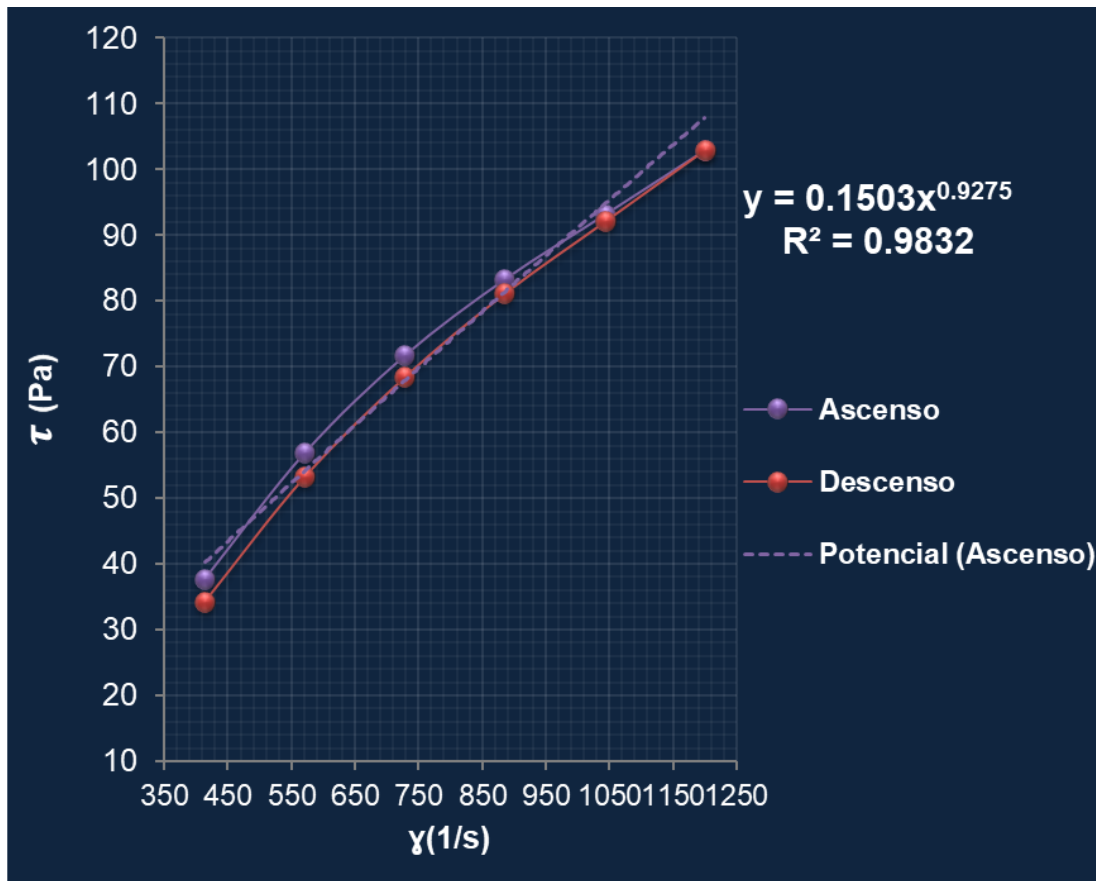


Figura 32. Resultados de la caracterización reológica de la dispersión de Alginato de sodio al 2% - Goma arábica 2%

De igual forma, la viscosidad aparente de la dispersión mostró un comportamiento decreciente en función al incremento de la velocidad de corte (figura 33)

Esta disminución de la viscosidad en función a la adición y aumento de concentración de la goma arábica en la mezcla, se les atribuye a interacciones moleculares entre los polisacáridos y fuerzas de repulsión por su carácter polianiónico de los polímeros que afectan a la viscosidad de la dispersión. También

al grado de polimerización y estructura ramificada y corta de la goma arábica, por la que las moléculas de esta no colisionan con mayor frecuencia, generando viscosidades inferiores incluso a los polímeros de mismo peso molecular (Fennema, 2008).

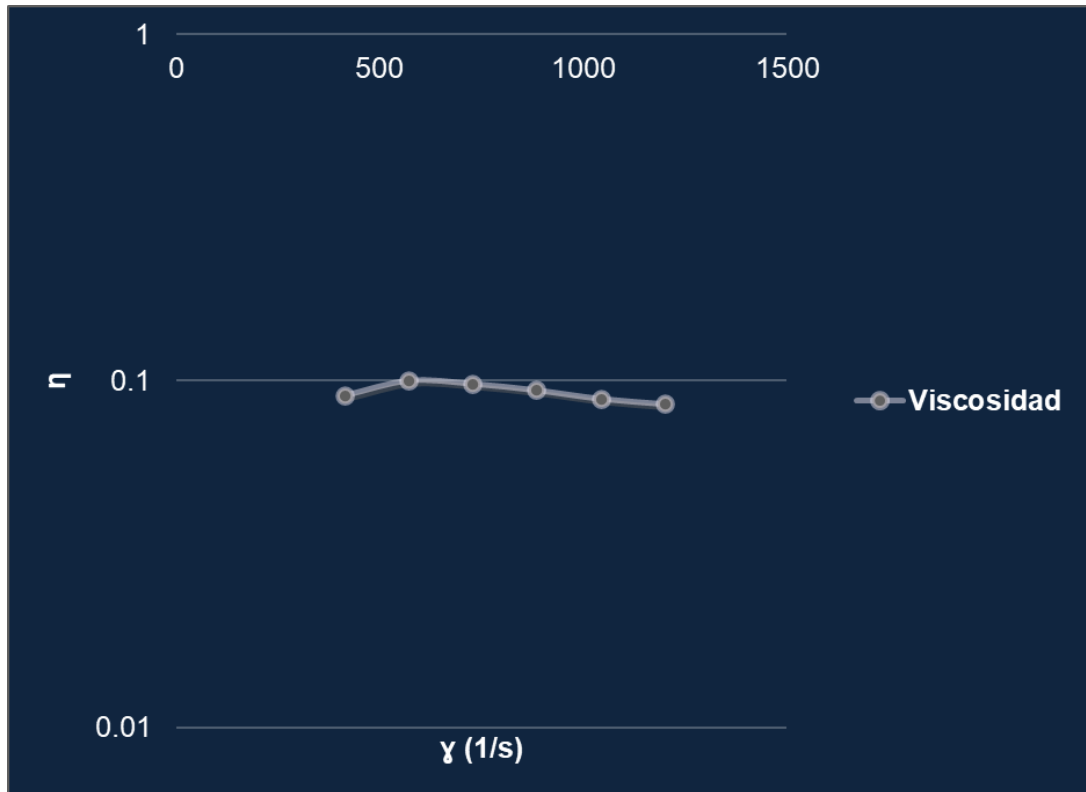


Figura 33. Viscosidad aparente del alginato de sodio 2% - Goma Arábica 2%

Mediante la caracterización reológica se concluye que, las tres dispersiones analizadas se caracterizaron como fluidos del tipo Herschel-Bulkley ya que no se mostró proporcionalidad entre la velocidad de corte y es esfuerzo cortante; además de que ambas presentaron un esfuerzo umbral inicial para su cedencia al flujo en las que la gravedad no tuvo efecto. Por otra parte, la dispersión que se comportó con mayor viscosidad fue la de alginato de sodio al 2% debido a la reactividad de sus cationes polivalentes y en consecuencia también de sus largas cadenas de polímero y la rigidez de las moléculas hidratadas; además de que este polímero en dispersión se caracteriza por generar fluidos pseudoplásticos o fluidificantes (Díaz

y Navaza, 2002). Al añadir goma arábica a la mezcla, no demostró un impacto considerable que modifique el comportamiento reológico del fluido, ya que ambas, se caracterizaron por ser fluidos pseudoplásticos o fluidificantes; sin embargo, se observó la disminución de la viscosidad del fluido, la cual se le atribuye a interacciones moleculares entre los polisacáridos y fuerzas de repulsión por su carácter polianiónico de los polímeros que afectan a la viscosidad de la dispersión. También al grado de polimerización y estructura ramificada y corta de la goma arábica, por la que las moléculas de esta no colisionan con mayor frecuencia, generando viscosidades inferiores incluso a los polímeros de mismo peso molecular (Fennema, 2008).

### 3.3 Resultados durante la extrusión de las dispersiones de polisacárido

En el cuadro 5, muestran los diámetros de los extruidos de distinta formulación. En el caso del extrusor de diámetro de 1 mm, la dispersión de Alginato de sodio 2% - Goma arábica 2%, permitió obtener un promedio de 352 cápsulas en 6.32 min. Esto se le atribuye a que dicho tratamiento mostró tener un índice de consistencia menor ( $K=0.1503$  cP) en comparación con las dispersiones de alginato de sodio al 2% y en mezcla con goma arábica al 1%, por lo que, al momento de extruirlo, el esfuerzo necesario de cedencia al flujo fue mínimo, generando así un flujo más continuo en un menor tiempo.

	EXTRUSIÓN DE CÁPSULAS CON DIÁMETRO 1 Y 2					
	ALGINATO 2%		ALG 2% - G. ARÁ1%		ALG 2% - G. ARÁ 2%	
	TIEMPO (min)	No. DE CÁPSULAS	TIEMPO (min)	No. DE CÁPSULAS	TIEMPO (min)	No. DE CÁPSULAS
<b>Ø1 (1 mm)</b>	7.17	345.00	6.70	342.00	6.32	352.00
<b>Ø2 (1.75 mm)</b>	4.70	185.00	5.05	146.00	6.20	132.00

Cuadro 5. Resultados promedio de la obtención de microcápsulas con extrusores de 1 y 1.75 mm

En este sentido, se determina que, mientras la viscosidad del fluido descende, se obtiene un mayor número de cápsulas, ya que a pesar de que la dispersión de alginato de sodio 2% permitió un promedio de 345 cápsulas, el tiempo para su obtención y extrusión total de los 8 ml de la dispersión, fue mayor; mientras que con la dispersión de Alginato de sodio 2% – Goma arábica 1% se obtuvieron en 342 cápsulas en un tiempo de 6.7 min.

En cuanto al número de cápsulas obtenidos con el extrusor de 1.75 mm de diámetro, se tiene que existió mayor número de extruidos con la dispersión de Alginato de sodio 2% en un tiempo de 4.7 minutos. En este caso, el número de extruidos se encuentra proporcionalmente en función del índice de consistencia de los tratamientos; sin embargo, es inversamente proporcional al tiempo de obtención.

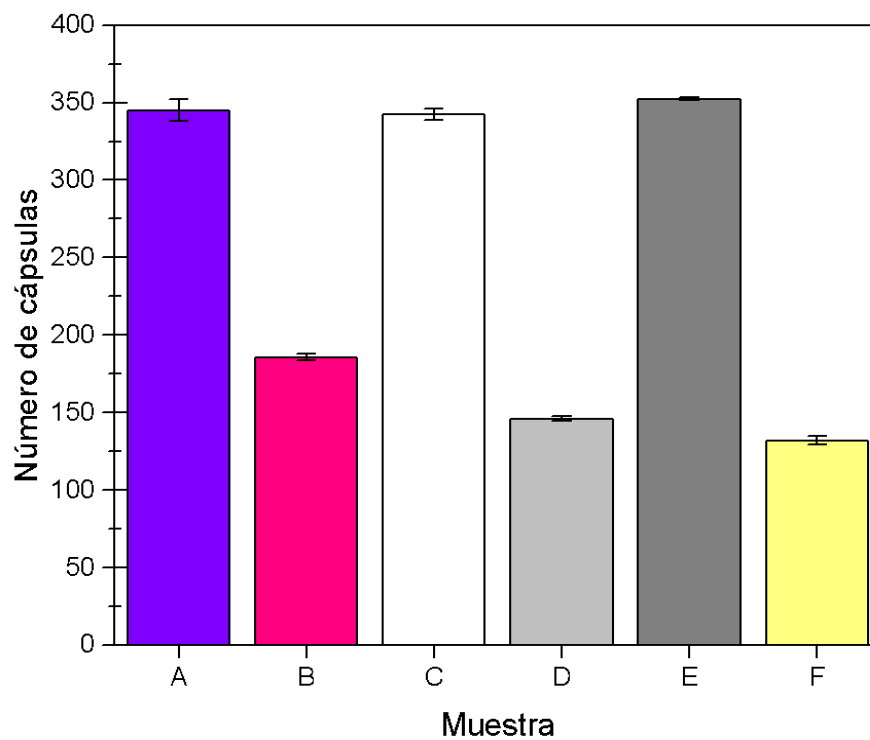


Figura 34. Número de microcápsulas obtenidas mediante distintos extrusores.

**A:** Alginato 2%, 1mm, **B:** Alginato 2%,1.75mm, **C:** Alginato 2%-G. arábica 1%, 1mm, **D:** Alginato 2%-G. arábica 1%, 1.75mm, **E:** Alginato 2%-G. arábica 2%, 1mm y **F:** Alginato 2%-G. arábica 2%, 1.75 mm

La Figura 34 presenta el efecto del diámetro del extrusor con respecto al número de cápsulas obtenidas, por lo que se tiene que, para el diámetro de 1 mm, la dispersión de Alginato de sodio 2% - Goma arábica 2%, existió menor variación comparada con el resto, debido a lo anteriormente mencionado con respecto a que fue la dispersión que presento el menor índice de consistencia con respecto al resto.

En cuanto al uso del extrusor de 1.75 mm fue la dispersión de Alginato de sodio 2% - Goma arábica 1%, la que presentó los datos más significativos en cuanto a la obtención del número de cápsulas.

### 3.4 Microscopia óptica

Al analizar la morfología de las microcápsulas mediante microscopia óptica, se tiene que las cápsulas de alginato 2% extruidas en los dos diferentes diámetros, resultaron con una superficie no uniforme, además de que no se presentó una forma regular esférica mostrando pliegues irregulares, oquedades y estructuras ovaladas o elípticas. En este sentido, una de las variables que tuvo mayor influencia en la forma esférica de las microcápsulas, fue la concentración de la dispersión de alginato de sodio 2%, la cual mostro un mayor índice de consistencia en comparación al resto de las dispersiones en mezcla con goma arábica, lo cual coincide con lo reportado por (Burgain *et al.*, (2011), quien comenta que otros factores que son determinantes en la forma de las capsulas, son la concentración de alginato, la carga bacteriana y el tiempo de exposición al cloruro de calcio.

Por lo que, se observa que conforme se incrementa el diámetro del extrusor y la concentración de la goma arábica, y a su vez, desciende el índice de consistencia de las dispersiones, se obtienen cápsulas con mayor uniformidad en cuanto a la forma esférica, disminuyendo las superficies irregulares y oquedades; coincidiendo también con (Krasaekoopt *et al.*, 2003) y (Pal, 2009), quienes mencionan que a pesar de que el alginato ha sido adecuado para la encapsulación, el gel presenta sensibilidad a pH extremos y matrices porosas que condicionan tanto la liberación como la protección de los compuestos. Esta característica puede ser contrarrestada



al modificar la estructura del gel, empleando sistemas mixtos poliméricos para la formación de la matriz o con el recubrimiento de las. Por lo que, la concentración que permitió obtener extruidos más uniformes en cuanto a su forma esférica fue la mezcla de Alginato de sodio 2% y Goma arábica al 2% con un diámetro de 1.75 mm (cuadro 6).

Cuadro 6. Comparativo de la morfología de las microcápsulas obtenidas mediante microscopía óptica con aumento de 4X

Dispersión	Diámetro 1 (1mm)	Diámetro 2 (1.75 mm)
Alginato 2%		
Alginato 2% - G. arábica 1%		
Alginato 2% - G. arábica 2%		

El diámetro del extrusor fue determinante para la variación de las microcápsulas obtenidas, coincidiendo con (Chan *et al.*, 2009), quienes mencionan que aspectos como la distancia de separación entre la boquilla al baño, el diámetro de la boquilla, el efecto de la gravedad y la tensión superficial de la solución que induce a la gelificación son importantes en la obtención de microcápsulas.

El análisis estadístico del tamaño de las microcápsulas con el diámetro de 1 mm muestra que en las dispersiones de Alginato 2% y Alginato 2% - Goma arábica 1%, no existen diferencias significativas, mostrando mayor homogeneidad en sus tamaños, ya que se obtuvieron extruidos en promedio de 2.5 mm, lo cual concuerda con lo reportado por Muthukumasaramy (2006), quien menciona que el tamaño de las cápsulas de Alginato de sodio a concentraciones de entre 1 y 3% tienden a resultar con un diámetro aproximado de 2 y 3 mm (figura 35).

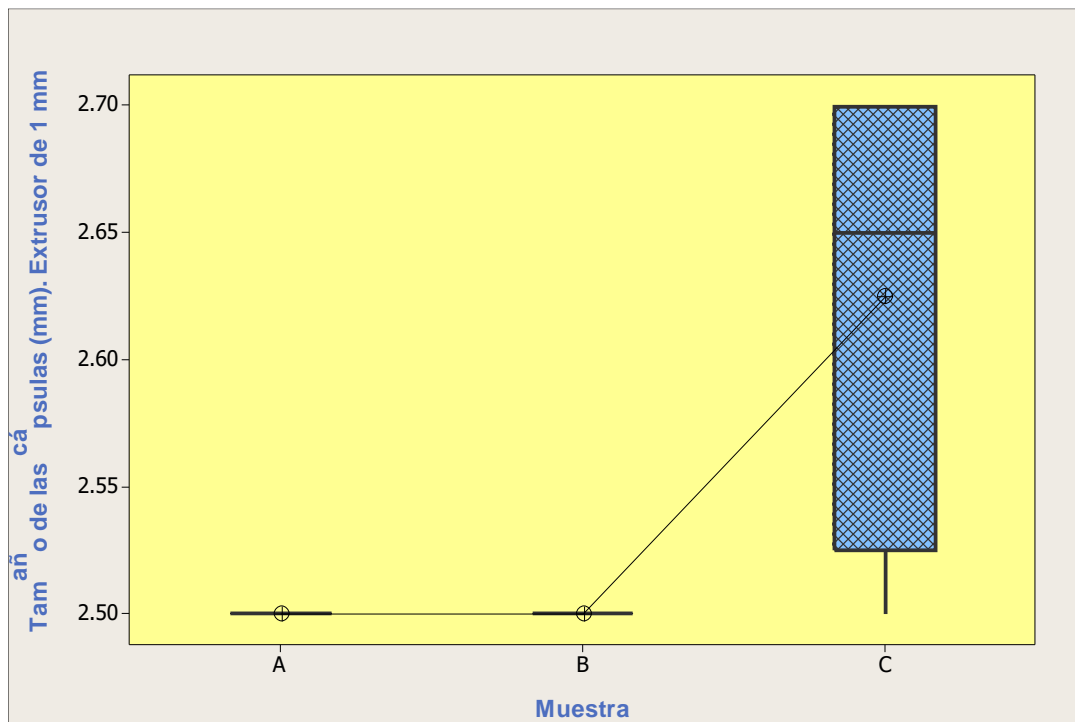


Figura 35. Tamaño de las cápsulas obtenidas mediante el extrusor de 1.00 mm  
**A:** Alginato 2%, 1mm, **B:** Alginato 2%-G. arábica 1%, 1mm y **C:** Alginato 2%-G. arábica 2%, 1mm

En este sentido, al aumentar la concentración de Goma arábica, el valor medio de las microcápsulas se incrementa hasta aproximadamente 2.64 mm, pero con la diferencia de que en este caso aumenta la variación entre las cápsulas.

En cuanto al uso del extrusor con diámetro de 1.75 mm, la mezcla de Alginato 2% - Goma arábica 1% permitió obtener extruidos con tamaños más homogéneos de aproximadamente 3.5 mm. Así mismo, se observó también que el tamaño de las

microcápsulas aumenta conforme se incrementa de la concentración de la goma arábica.

Al analizar el efecto de utilizar dos diámetros de extrusor, se pudo observar que para el caso del de 1 mm, no se obtuvieron diferencias mayores en cuanto a los tamaños de las microcápsulas, ya que las dispersiones de Alginato 2% y Alginato 2% - Goma arábica 1% mostraron homogeneidad en los tamaños comparados con los obtenidos con el diámetro de 1.75 mm ya que muestran mayor variación estadística (figura 36).

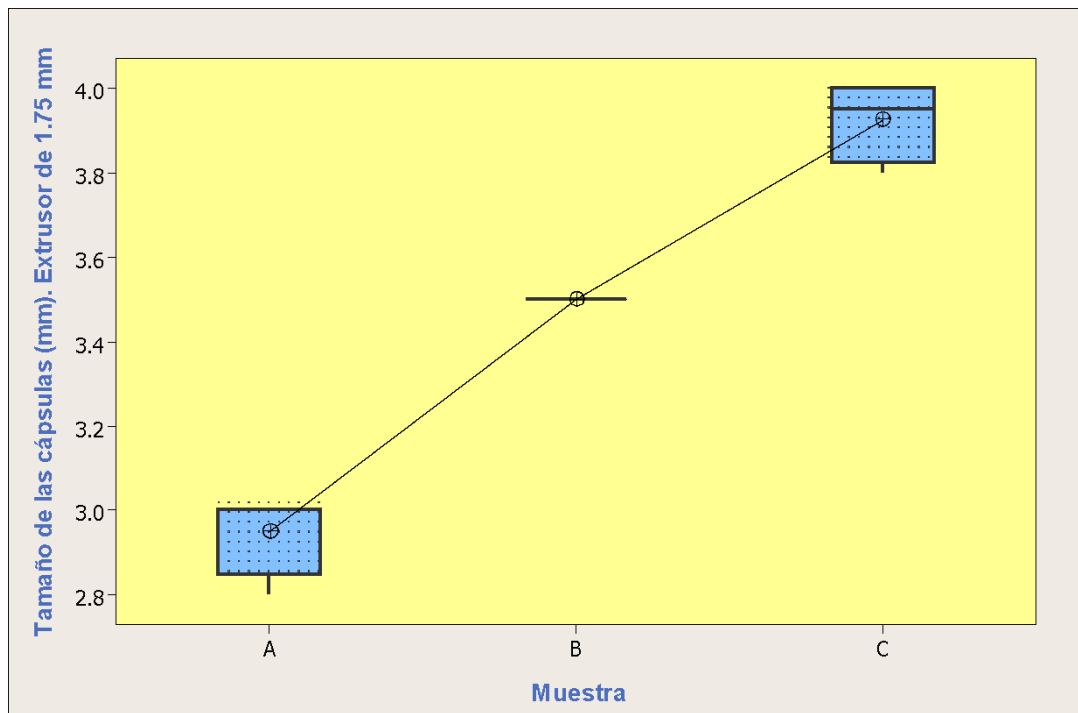


Figura 36. Tamaño de las cápsulas obtenidas mediante el extrusor de 1.75 mm

**A:** Alginato 2%, 1.75mm, **B:** Alginato 2%-G. arábica 1%, 1.75mm y **C:** Alginato 2%-G. arábica 2%, 1.75 mm

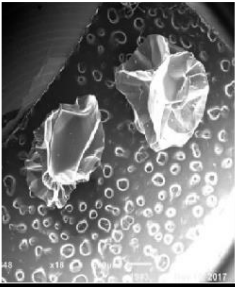

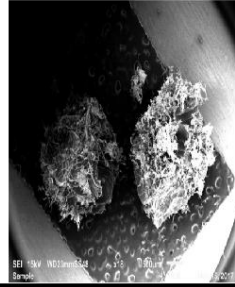
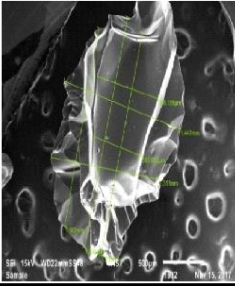
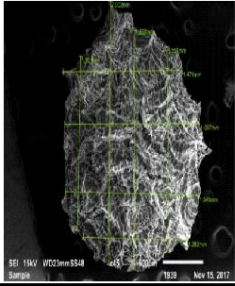
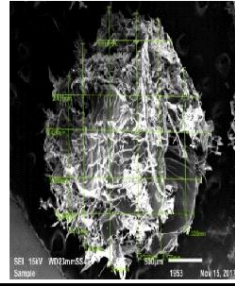
### 3.5 Microscopía electrónica de barrido

Al estudiar las microcápsulas por microscopía electrónica de barrido (MEB) se utilizaron aumentos de 18x y 45x, lo cual permitió analizar la forma, tamaño, distribución y la superficie tanto interna como externa de las microcápsulas

(Acevedo *et al.*, 2008). Por lo que, para el caso de las microcápsulas obtenidas mediante el extrusor con diámetro de 1 mm, las cápsulas de Alginato 2% mostraron formas elípticas e irregularidades en su superficie (cuadro 7).

En cuanto a las obtenidas de las mezclas con Goma arábica al 1% y 2%, mostraron ramificaciones atribuidas a la interacción sinérgica que existe entre la Goma arábica y la estructura del Alginato, propiciando una forma esférica más regular. En este sentido, las cápsulas que presentaron mayor uniformidad en su morfología fueron las elaboradas a partir de la mezcla de Alginato 2% - Goma arábica 2%, lo cual probablemente se debió a que, durante el proceso de gelificación, la interacción química que se estableció entre los polímeros y la solución de CaCl<sub>2</sub> fue de tipo electrostática entre los grupos carboxilos de los polímeros aniónicos y los cationes del calcio, lo cual concuerda con lo reportado por Nayak *et al.*, (2012).

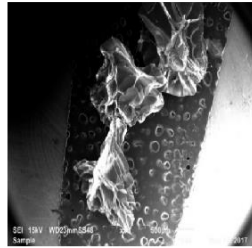

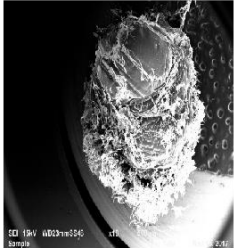
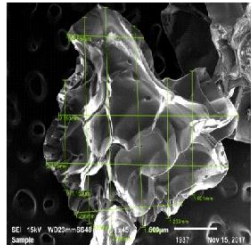
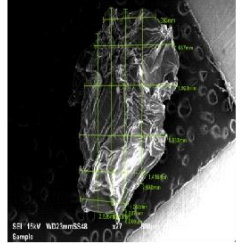
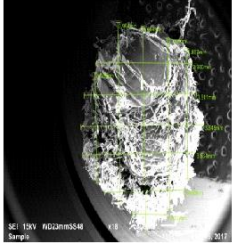
Cuadro 7. Resultados obtenidos mediante MEB, de las cápsulas obtenidas con el extrusor de 1 mm de diámetro

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO				
Cápsulas extruidas en diámetro de 1 mm				
		Alginato 2%	Alginato 2% - G. arábica 1%	Alginato 2% - G. arábica 2%
AUMENTO	18 x			
	45 x			

En cuanto a los resultados de la estructura de las microcápsulas obtenidas mediante el extrusor de 1.75 mm, el comportamiento de sus estructuras fue similar al obtenido con el extrusor de 1 mm, corroborando en que la dispersión que permitió obtener cápsulas con estructuras más estables, regulares y esféricas, fue la mezcla de alginato de sodio 2% - goma arábica 2% (cuadro 8).

De los resultados obtenidos, se corrobora lo reportado por (Chan *et al.* 2009), quien menciona que el diámetro del extrusor es una de las variables fundamentales que influyen en el tamaño y morfología de las microcápsulas; ya que se observó que, al incrementar el diámetro de la boquilla del extrusor, esta condición y la mezcla de alginato 2% y goma arábica 2%, permitieron obtener microcápsulas con menor irregularidad en su formas, estructuras y superficie, pero no en el tamaño.

Cuadro 8. Resultados obtenidos mediante MEB, de las cápsulas obtenidas con el extrusor de 1 mm de diámetro

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO				
Cápsulas extruidas en diámetro de 1.75 mm				
		Alginato 2%	Alginato 2% - G. arábica 1%	Alginato 2% - G. arábica 2%
AUMENTO	18 x			
	45 x			

## 4. CONCLUSIONES

- ✓ Las dispersiones de alginato de sodio y en mezcla con goma arábica, se comportaron como fluidos Hershel-Bulckley.
- ✓ La dispersión que se comportó con mayor viscosidad fue la de alginato de sodio al 2% y al añadir goma arábica a la mezcla, está generó un descenso del 39% +/-1 en el índice de consistencia de la dispersión inicial; sin embargo, lo anterior no tuvo impacto que modificara el comportamiento reológico de las dispersiones.
- ✓ Las condiciones de extrusión y la biocompatibilidad entre el alginato de sodio y la goma arábica fueron determinantes en la obtención, morfología y estructura de las cápsulas, ya que mediante el aumento del diámetro del extrusor a 1.75 mm y la mezcla de alginato de sodio 2% y goma arábica al 2%, se obtuvieron cápsulas con mayor estabilidad y homogeneidad en sus morfologías, estructuras y superficies, con formas menos elípticas, con menor presencia de irregularidades y oquedades en sus superficies, a pesar de que estadísticamente se demostró la existencia de diferencias significativas ( $P>0.05$ ) en sus tamaños, al utilizar el extrusor de 1.75 mm en comparación al uso de extrusor de 1.00 mm donde no se mostraron significancias ( $P<0.05$ ) en cuanto al tamaño de las capsulas obtenidas mediante las distintas dispersiones.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Araneda, C. y. (2009). Microencapsulación de extractantes: una metodología alternativa de extracción de metales. *Ciencia Ahora*, 22(11): 9-19.
- Badui. (2006). *Química de los alimentos*. México: Pearson Education.
- Bansode, S. B. (2010). Microencapsulation. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 1(2), 38-43.
- Barnes, H. H. (1989). *An introduction to rheology*. Ed. Elsevier .
- Bastos, D. A. (2009). Ascorbic acid retaining using a new calcium alginate-capsul based edible film. *Journal of Microencapsulation*, 26(2),97-103.
- Bouwmeester, H. S. (Bouwmeester, H., S. Dekkers, Noordam, M., Hagens, W., Bulder, A., Voorde, S., Wijnhoven, S. and Marvin, H.2009). Review of health safety aspects of nanotechnologies in food production. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 53(1): 52–62.
- Burgain, J. G. (2011). Encapsulación de células vivas probióticas: desde la escala de laboratorio hasta las aplicaciones industriales. *Journal Food Eng.*, 104, 467-483.
- Champagne, C. a. (2007). Microencapsulation for the improved delivery of bioactive compounds into foods. *Current Opinition in Biotechnology*, 18(2): 184-190.
- Chan, L. L. (2006). Mechanisms of external and internal gelation and their impact on the functions of alginate as a coat and delivery system. *Carbohydrate Polymer*, 63, 176-187.
- Cubero, N. M. (2002). *Aditivos Alimentarios*. Madrid: Mundi-Prensa.
- D., A. J. (1996). *Principios de ingeniería aplicados a alimentos*. España: ACRIBIA.
- Desai, K. y. (2005). Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Drying Technology*, 23, 1361-1394.
- Dohnal, J. a. (2010). Inkjet fabrication and characterization of calcium alginate microcapsules. *Powder Technology*, 200(3):254-259.
- Draget, K. L.-B. ((1997). Alginate based new materials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 21(1-2):47-55.
- Escalona-López, S. (2004). *Encapsulados de luteína-enocianina y su aplicación en alimentos*. Chile: Universidad de Chile.
- Favaro, C. S. (2010). The use of spray drying technology to reduce bitter taste of casein hydrolysate. *Food Hydrocolloids*, 24(4): 336-340.
- Fenemma. (2008). *Química de los alimentos*. Zaragoza España: Acribia.
- Ferreira, I. R. (2007). Encapsulation of antioxidants by spray-drying. *Chemical Engineering Transactions*, 11, 713-717.

- Fuchs, M. T. (2006). Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, 75(1): 27-35.
- Funami, T. F. (2009). Rheological Properties of sodium alginate in an aqueous system during gelation in relation to supermolecular structures and Ca<sup>2+</sup> binding. *Food Hydrocolloids*, 23(7);1746-1756. .
- Gómez-Díaz, D. &. (2002). Caracterización reológica de dispersiones agua-alginato sódico con aplicación en la industria alimentaria. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 3:5, 302-306.
- Gómez-Díaz, D. N. (2020). *Caracterización reológica de dispersiones agua-alginato sódico con aplicación en la industria alimentaria*. España: Universidad de Santiago.
- Gouin, S. (2004). Microencapsulation: industrial appraisal of existing technologies and trends. *Trends in Food Science & Technology.*, 15(7-8): 330-347.
- Helgerud, T. G. (2010). *Alginates In Food stabilizers, thickeners and gelling agents*. United Kingdom: WileyBlackwell. Homayouni.
- Hernández, E. M. (2005). Evaluación de derivados de carboximetilados del alginato de sodio como superabsorbente. *Revista Cubana de Química*, 1(3), 239-240.
- Imeson, A. (2010). Food Stabilisers, thickeners and gelling agents, Uk. *HMC Biopolymer*, 67-73.
- Juárez, R. (2013). Condiciones gastrointestinales modelo utilizadas para evaluar probióticos encapsulados. *Temas selectos de ingeniería en alimentos*, 7(2): 15-24.
- King, A. H. (1983). *Brown seaweed extracts (alginates)*. *Food Hydrocolloids*. Florida: CRC Press.
- Kwak, H. I. (2001). Microencapsulation of  $\beta$ -galactosidase with fatty acid esters. *Journal Dairy Science*, 84: 1576-1582.
- Laurienzo, P. F. (2015). The use of natural polysaccharides as biomaterials. *Bio.Med Res*, 1-2.
- Lupo, B. G. (2012). Revisión: Microencapsulación con alginatos en alimentos. Técnicas y Aplicaciones. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3 (1), 14-18.
- Macoscko, C. (1994). *Rheology Principles, measurements and applications*. Ed. Wiley VCH.
- Madene, A. S. (2006). Flavour encapsulation and controlled release. *International Journal of Food Science and Technology* , 4(1):1-21.
- Mark, H. F. (2009). *Mark, H. F., y Atlas, S., "Introduction to Polymer Science", in:* New York, USA: Wiley-Interscience Publication.
- McHugh, D. (1987). Production, properties, and uses of alginates. *Production and Utilization of Products from Commercial Seaweeds. FAO Fish. Tech.*, 58–115.
- Mofidi, N. A.-M. (2000). Mass preparation and characterization of alginate microspheres. *Process Biochemistry*, 35(9):885-888.
- Montenegro, M. B. (2012). Gum Arabic: More than edible emulsifier. Products and application of polymers. *Casparus Johannes Reinhard Verbee*, 23-27.



- Muthuselvi, L. a. (2006). Simple coacervates of zein to encapsulate gitoxin. *Colloids and Surfaces* , 51(1): 39-43.
- Nayak, A. D. (2012). Calcium alginate/gum arabic containing glibenclamide development and in vitro characterization. *Int Biol Macromol*, 5(51).
- Neira, L. (2010). *Principios básicos y química de los alimentos*. México: Userena.
- Pal, K. P. (2009). *Biopolymers in controlled release delivery systems. In Modern biopolymer science. Bridging the divide between fundamental treatise and industrial application.* . London-Burlington-San Diego: Academic Press.
- Palzer, S. (2009). Food structures for nutrition. Health and wellness. *Trends in Food Science and Technology* , 20(5): 194-200.
- Parra-Huertas, R. (2010). Revisión: Microencapsulación de alimentos. . *Revista Nacional de Agronomía-Medellín*, 63(2), 5669-5684.
- Pawar, S. N. (2012). Alginate derivation. *Biomaterials*, 33, 3279-3305.
- Phillips A, W. P. (2003). *Handbook of hydrocolloids*. U.S.A.: Cambridge.
- Prestidge, C. a. (2006). Nanoparticle encapsulation of emulsion droplets. *International Journal of Pharmaceutical* , 324(1):92-100.
- Quintáns, C. L. (2009). *Reología de productos alimentarios*. España: Universidad de de Santiago de Compostela .
- Rai, M. A. (2009). The encapsulation technology in fruit plants. *Biotechnology Advances* , 27(6): 671-679.
- Ramírez, N. J. (2006). *Introducción a la reología de los alimentos*. Colombia: Universidad Del Valle Cali.
- Reddy-K, R. y.-P. (2010). Effect of different copolymers on sodium alginate microcapsules containing isoniazid. *International Journal Of PharmTech Research*, (4):2198-2203.
- Reyes-Nava, L. (2010). *Optimización y caracterización de la microencapsulación de la protease hemisfericina refinada*. México: Instituto Politecnico Nacional.
- Rokka, S. R. (2010). Protecting probiotic bacteria by macroencapsulation. Changes for industrial applications. *Eur Food Res Technology*, 231, 1-12.
- Sandoval, M. (2016). *Efecto de la microencapsulación de Pediococcus Acidilactici Y Lactobacillus Plantarum en alginato-goma arábica para su uso como probióticos*. Edo. De Mexico: UNAM.
- Sozer, N. a. (2009). Nanotechnology and its applications in the food sector. *Trends in Biotechnology* , 27(2):82-89.
- Steffe, J. (1996). *Rheological methods in food process engineering*. Michigan: Freenam Press.

- Villena, M. M. ((2009)). Villena, M., Morales, H., Lara, G. y Martínez, R. (2009). Técnicas de microencapsulación: una propuesta para microencapsular probióticos. *Ars Pharmaceutica*, 50(1): 43-50.
- Voet, D. (2006). *Fundamentos de bioquímica*. Buenos Aires: Panamericana.
- Yabur., B. Y.-C. (2007). Alginate from the macroalgae *Sargassum Sinicola* as Novel Source for Microbial Immobilization Material in Wastewater Treatment and Plant Growth Promotion. *Journal of Applied Phycology*, Yabur., Bashan, Y. y Hernández-Carmona, G. (2007). Alginate from the macroalgae *Sargassum Sinicola* as Novel Source (5), 25-28.
- Yañez, J. S. (2002). Aplicaciones biotecnológicas de la microencapsulación. *Avance y Perspectiva*, (21): 313-319.
- Young, S. S. (1992). Microencapsulating properties of whey proteins with carbohydrates. *Journal Dairy Science*, 76(10): 2878-2885.
- Zuidam, N. J. (2010). Encapsulations Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing. *Overview of Microencapsulates for use Food Products or Process and Methods to make them*, 16-18.

## ANEXOS.

### ANEXO 1. Especificaciones técnicas del alginato de sodio

#### ALGINATO DE SODIO



#### TECHINCAL DATA SHEET

##### Descripción

Es un aditivo de alimentos usado como texturizante.

Es un agente adelgazante o gelatinizante, particularmente funcional para varias aplicaciones alimenticias.

##### Este producto consiste de:

Alginato de sodio

Sucrosa

##### Clasificación del producto

INS 404 (E401)

##### País de origen

Francia

##### Especificaciones físicas y químicas

PARÁMETRO		ESPECIFICACION
VISCOSIDAD*	1 % sol.	550 – 750 mPa*s
pH	1 % sol.	6 – 8,5
PÉRDIDA POR SECADO		Máx. 15 %
GRANULOMETRÍA	< 125 µm (US 120#)	Min. 90 %
GRANULOMETRÍA	< 500 µm (US 35#)	Min. 99 %

\* Viscosidad mediada a 20°C (68°) en un viscosímetro rotatorio Brookfield RV N° 2.20 ppm

## Especificaciones microbiológicas



### Declaración de GMO

PARÁMETRO		ESPECIFICACION
CUENTA TOTAL DE PLACA	/g	Máx. 5000
HONGOS Y LEVADURAS	/g	Máx. 500
E. COLI	/5g	Ausente
SALMONELLA	/10g	Ausente

### Información típica del producto

PARÁMETRO	ESPECIFICACION
APARIENCIA	Polvo blanco cremoso a café brillante
OLOR + SABOR	Neutral

Este producto no está sometido a ningún etiquetado en específico de acuerdo a las regulaciones (EC) N°1829/2003 y 1830/2003.

### Requerimientos legales

Los aditivos alimentarios que figuran en este producto cumplen con la definición y las especificaciones del JECFA (FAO / OMS), la FDA (21 CFR) y el Reglamento de la UE 231/2012 en su versión modificada.

Sin embargo, se recomienda que el usuario se asegure de que este producto cumple con la normativa local vigente, en particular en el país donde el producto se va a consumir.

### Empaque

Bolsas de PE de 25 kg.

Condiciones de almacenamiento recomendadas

Debido a la sensibilidad del producto, almacenar en un lugar fresco y seco.  
Almacene en su empaque original hasta su uso.

### **Vida de anaquel**

12 meses.

### **Aplicaciones**

El producto puede ser usado en medio acuoso, lácteo o en fruta.

La dosificación máxima es cerca del 0.5 al 2% de acuerdo a la viscosidad, al medio y a la textura

Calle 5 #24-C Fracc. Ind Volcán Vesubio No. 5387 Av. Carlos Salinas de Gortari No.  
1020 Alce Blanco, Naucalpan, Col. El Colli Urbano Bodega 1040 Col. Apodaca  
Centro.  
Edo. de México C.P.53370 Zapopan Jalisco 45070 Apodaca, NL, México C.P. 66600  
Tel. +52 (55) 2122 0400 Tel. +01 (33) 3125 5159 Tel. (0181) 8386 6575  
Fax: +52 (55) 5358 9420 Fax: +52 (33) 3620 4232 Fax: (0181) 8386 6577  
01800 0000 382 [www.dva.m](http://www.dva.m)

## ANEXO 2. Especificaciones técnicas de la goma arábica

### Especificaciones

# MAKYSPRAY A

(GOMA ARÁBIGA TIPO SENEGAL)



### Descripción del producto

Goma acacia, tipo Senegal, purificada y secada por aspersion SIN 414 / E 414

Soluble en agua

En forma de polvo blanco

Producto certificado Kosher y Halal.

### Especificaciones

#### Características fisicoquímicas

Material insoluble	< 0.1 %
Cenizas insolubles	< 0.5 %
Pérdida por secado	< 10 % (*) o 5h/105°C
Cenizas totales	< 4 % (*)
Viscosidad	> 60 cps o Sol. 25 %, Brookfield LVDVI+, huso 1, 30 rpm, 25°C
Rotación óptica (solución 10%)	-20° a - 35° (*)
pH	4 - 5 o 25 %
Almidón o dextrina	Ausente
Taninos	Ausente
Arsénico	< 3 mg/kg
Plomo	< 2 mg/kg
Mercurio	< 1 mg/kg

Cadmio < 1 mg/kg

□ **Características Microbiológicas:**

Cuenta total en placa (NF ISO 4833)	< 2000 UFC/g (*)
Hongos y Levaduras (NF ISO 7954)	< 100 UFC/g (*)
<i>E. coli</i> (V08-053)	Ausencia en 10 g
<i>Salmonella</i> (NF ISO 6579)	Ausencia en 25 g

(\*) Parámetros reportados en el Certificado de Análisis necesarios para la aceptación del producto.

### **Aplicaciones/Usos**

Agente emulsificante para emulsiones líquidas. También es usado en la industria farmacéutica.

### **Vida de anaquel**

36 meses si los sacos no están abiertos.



### **Almacenamiento**

Almacenar a temperatura ambiente y a una humedad relativa < 80%

### **Empaque**

25 kg en sacos de papel multi-capa con revestimiento interior de polietileno.

### **Alérgenos**

No contiene ninguna sustancia alergénica como se describe en el Apéndice II del Reglamento 1169/2011 UE, y sus enmiendas.

## Legislación

En cumplimiento con la regulación de aditivos alimentarios de la FAO/OMS y la Unión Europea (2012/231/CE). Sin embargo, depende del usuario que cumpla con las regulaciones de los países donde se usaría la preparación.

### Valores nutricionales para 100 g (Información nutricional para 100 g):

<b><u>PROPIEDAD DEL PRODUCTO (Análisis nutricional)</u></b>	<b><u>Valores</u></b>
Proteínas (g)	<b>2</b>
Carbohidratos (g) Azúcares (g)	<b>0</b> <b>0</b>
Fibra alimentaria (g)	85
Lípidos (g)	<b>0</b>
Ácidos grasos saturados (g)	<b>0</b>
Sodio (g)	0.05
Energía (kcal)	178
Energía (kJ)	744



