



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE GELIFICACIÓN DE  
ESFERAS DE YOGURT EN ALGINATO DE SODIO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTA:  
ALINE MOLINA MENESES

ASESORA: I.Q. GUADALUPE FRANCO RODRIGUEZ



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
 UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR  
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
 VOTOS APROBATORIOS  
 SUPERIORES CUAUTITLAN

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
 DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLAN  
 PRESENTE



ATN:L.A. ARACELI HERRERA-HERNANDEZ  
 Jefa del Departamento de Exámenes  
 Profesionales de la FES Cuautilán.

Con base en el Art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

- Estudio de la cinética de gelificación de esferas de yogurt en alginato  
 de sodio.

Que presenta la pasante Aline Molina Meneses  
 Con número de cuenta: 302184970 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 HABLARA EL ESPIRITU"  
 Cuautitlan Izcalli, Mex. a 24 de marzo de 2011

PRESIDENTE	<u>Dr. Juan Manuel Aceves Hernández</u>	
VOCAL	<u>IQ. Guadalupe Franco Rodríguez</u>	
SECRETARIO	<u>Dra. María Eugenia Ramírez Ortíz</u>	
1er SUPLENTE	<u>MC. Julieta González Sánchez</u>	
2º SUPLENTE	<u>Dra. María Guadalupe Sosa Herrera</u>	

## AGRADECIMIENTOS.

La presente tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo y acompañándome en todo momento.

A mi mamá, esto no hubiera sido posible sin su apoyo, guía y confianza. Soy afortunada de contar contigo. Toda mi gratitud para ti.

A mis hermanas Ivette e Isis, por los sueños que hemos compartido. Ustedes han enriquecido mi vida con su cariño y alegría. Las quiero muchoj.

A Lukas por ser una compañía incondicional.

A (sin estricto orden) Javier, Diego, Estrella, Ale, Alicia, Mariana, Sonia, Mariela, Mijail, Georgina, Edgar y Omar, por ser unos amigos increíbles y con quienes he compartido muchos momentos que siempre llevaré en mi corazón. Muchos de ustedes fueron de gran ayuda en los días en que fue redactada la tesis.

Mi reconocimiento a la I.Q. Guadalupe Franco Rodríguez, por haber confiado en mí, por la paciencia y la dirección de este trabajo. Gracias.

A la Universidad Iberoamericana, por el préstamo de sus laboratorios durante la experimentación de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme estudiar en sus aulas y acceder a una carrera universitaria.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b>	I
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO 1</b>	3
<b>1.1 Cocina molecular</b>	3
<b>1.2 Esferificación</b>	3
1.2.1 Productos que intervienen	4
1.2.2 Tipos de esferificación	4
1.2.3 Formas de esferificación	5
<b>1.3 Yogurt</b>	6
1.3.1 Generalidades	7
1.3.2 Propiedades	8
1.3.3 Bacterias Lácticas	10
1.3.4 Aroma y sabor del yogurt	10
1.3.5 Proceso de elaboración del yogurt	11
1.3.6 Composición del yogurt	12
<b>1.4 Hidrocoloides</b>	13
1.4.1 Estructura de los hidrocoloides	13
<b>1.5 Alginato</b>	16
1.5.1 Generalidades	17
1.5.2 Propiedades	21
1.5.3 Aplicaciones	22
<b>1.6 Determinación de pruebas texturales</b>	23
1.6.1 Métodos imitativos	24
1.6.2 Mecánica de fractura	27
<b>1.7 Esfericidad</b>	28
1.7.1 Programa ImageJ	31
<b>1.8 Fenómenos de adsorción</b>	32
1.8.1 Tipos de adsorción	33
1.8.2 Factores que influyen en la adsorción	35
<b>1.9 Cinética de gelificación</b>	38
1.9.1 Velocidad de reacción	38
1.9.2 Reacción de orden cero	39
1.9.3 Reacción de primer orden	39
1.9.4 Reacción de segundo orden	46
1.9.5 Cinética de difusividad	48
1.9.6 Cinética de adsorción	49
<b>1.10 Potencial zeta</b>	51
1.10.1 Doble capa difusa	52
1.10.2 Capa de Stern	53
1.10.3 Diferentes potenciales	53

<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>56</b>
<b>2.1 Problema</b>	<b>56</b>
<b>2.2 Objetivo</b>	<b>56</b>
<b>2.3 Hipótesis</b>	<b>56</b>
<b>2.4 Justificación</b>	<b>57</b>
<b>2.5 Cuadro metodológico</b>	<b>58</b>
<b>2.6 Materiales y métodos</b>	<b>59</b>
2.6.1 Materiales utilizados	59
2.6.2 Métodos aplicados a la esfera de yogurt	59
2.6.2.1 Determinación del pH	59
2.6.2.2 Método de esferificación inversa	60
2.6.2.3 Método potencial zeta	62
2.6.2.4 Método cinética de gelificación	65
2.6.2.5 Método de esfericidad	67
2.6.2.6 Método de análisis de perfil de textura	69
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>71</b>
<b>3.1 Valores de pH</b>	<b>71</b>
<b>3.2 Desarrollo del método de esferificación</b>	<b>71</b>
<b>3.3 Potencial zeta</b>	<b>74</b>
<b>3.4 Análisis de cinética de gelificación</b>	<b>78</b>
<b>3.5 Análisis de esfericidad</b>	<b>83</b>
<b>3.6 Análisis de perfil de textura</b>	<b>87</b>
<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO 1</b> Cinética de gelificación	97
<b>ANEXO 2</b> Esfericidad	105
<b>ANEXO 3</b> Perfil de textura	110
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>113</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
1.5.1 Estructura química del alginato de sodio	19
1.5.2 Segmentos de bloques M y G	20
1.5.3 Cambio de viscosidad a medida que se produce el intercambio iónico entre los iones monovalentes y divalentes	23
1.6.1 Perfil de textura típico para un gel	25
1.6.2 Variación de la energía superficial ( $U_s$ ) y la elástica ( $U_e$ ) en función de la longitud de la grieta	28
1.7.1 Esquema que muestra los ejes de la esfera	31
1.8.1 Proceso de sorción	33
1.9.1 Representación de la tendencia de una reacción de primer orden	46
1.9.2 Grafica de una reacción de segundo orden, donde se observa el inverso de la concentración	48
1.9.3 Etapas de adsorción	49
1.10.1 Ubicación del potencial zeta	55
2.6.1 Diagrama de proceso de las esferas de yogurt	61
2.6.2 Descripción del potencial zeta	62
2.6.3 (A) Equipo Zetasizer y (B) Celda DTS 1060	63
2.6.4 Grafica como se calcula el orden y la constante de la velocidad de reacción para la esfera de yogurt de alginato de sodio	66
2.6.5 Software ImageJ	67
2.6.6 Esquema en el cual se tomaron las fotografías de las esferas de yogurt	68
2.6.7 Equipo texturometro TA.XT plus	70

3.2.1 Formación de las esferas de yogurt con alginato de sodio	72
3.3.1 Curva de referencia que representa la concentración de cada muestra con respecto del potencial zeta	75
3.4.1 Constante de velocidad de gelificación del yogurt natural sin azúcar	79
3.4.2 Constante de velocidad de gelificación de las muestras: A) yogurt natural con azúcar, B) yogurt sabor a fresa, C) yogurt sabor zarzamora y D) yogurt sabor fresa-zarzamora	81
3.5.1 Gráfica que representa el tiempo de gelificación con respecto del volumen y la concentración de cada muestra, para el: A) yogurt natural sin azúcar, B) yogurt natural con azúcar, C) yogurt sabor fresa y D) yogurt sabor zarzamora	86
3.5.2 Gráfica que representa el tiempo de gelificación con respecto del volumen y la concentración de la muestra, para el yogurt sabor fresa-zarzamora	87
3.6.1 Gráficas de análisis de perfil de textura que representa la fuerza aplicada a la esfera con respecto del tiempo de gelificación, a las dos diferentes áreas, para las muestras: A) yogurt natural sin azúcar, B) yogurt sabor fresa y C) yogurt sabor zarzamora	91
3.6.2 Gráficas de análisis de perfil de textura que representa la fuerza aplicada a la esfera con respecto del tiempo de gelificación, a las dos diferentes áreas, para las muestras: A) yogurt natural con azúcar y B) yogurt sabor fresa-zarzamora	94



## ÍNDICE DE CUADROS

	<b>Página</b>
1.2.1 Tipos de esferificación dentro de la cocina molecular	6
1.3.1 Valor nutritivo del yogurt	12
1.5.1 Tipos de alginato	21
1.5.2 Propiedades físicas de los diferentes tipos de alginato	22
1.6.1 Definición de las características texturales	26
3.1.1 Valores de pH, de los diferentes sabores de yogurt	69
3.2.1 Desarrollo del método de esferificación inversa del yogurt	71
3.2.2 Esferas de yogurt de alginato de sodio	72
3.3.1 Valores de potencial zeta para las soluciones de alginato de sodio con respecto del área 1	76
3.3.2 Valores de potencial zeta para las soluciones de alginato de sodio con respecto del área 2	76
3.3.3 Concentración de alginato de sodio con respeto del área 1	77
3.3.4 Concentración del alginato de sodio con respecto del área 2	78
1.a Datos obtenidos para determinar la constante de velocidad de gelificación, para las diferentes áreas de esferas. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación	97
1.b Comparación de la constante de velocidad de gelificación, a los dos diferentes áreas de esferas y los parámetros: media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación	98
1.c Datos obtenidos para determinar la constante de velocidad de gelificación, para las dos áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación	99
1.d Comparación de la constante de velocidad de gelificación, a los dos diferentes áreas de esferas y los parámetros: media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación	100

1.e Datos obtenidos para determinar la constante de velocidad de gelificación, para las dos áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación	100
1.f Comparación de la constante de velocidad de gelificación, a los dos diferentes áreas de esferas y los parámetros: media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación	101
1.g Datos obtenidos para determinar la constante de velocidad de gelificación, para las dos áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación	102
1.h Comparación de la constante de velocidad de gelificación, a los dos diferentes áreas de esferas y los parámetros: media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación	103
1.i Datos obtenidos para determinar la constante de velocidad de gelificación, para las dos áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación	103
1.j Comparación de la constante de velocidad de gelificación, a los dos diferentes áreas de esferas y los parámetros: media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación	104
2.a Datos obtenidos en el programa ImageJ, para las dos diferentes áreas. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y coeficiente de variación	105
2.b Datos obtenidos en el programa ImageJ, para las dos diferentes áreas. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y coeficiente de variación	106
2.c Datos obtenidos en el programa ImageJ, para las dos diferentes áreas. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y coeficiente de variación	107
2.d Datos obtenidos en el programa ImageJ, para las dos diferentes áreas. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y coeficiente de variación	108
2.e Datos obtenidos en el programa ImageJ, para las dos diferentes áreas. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y coeficiente de variación	109

3.a Muestra la máxima fuerza ejercida en relación con el tiempo de inmersión, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación	110
3.b Muestra la máxima fuerza ejercida en relación con el tiempo de inmersión, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación	110
3.c Muestra la máxima fuerza ejercida en relación con el tiempo de inmersión, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación	111
3.d Muestra la máxima fuerza ejercida en relación con el tiempo de inmersión, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación	111
3.e Muestra la máxima fuerza ejercida en relación con el tiempo de inmersión, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación	112

## RESUMEN

Se utilizó el término cocina molecular como pretexto para conocer la técnica de gelificación inversa y poder desarrollar la esfera. La finalidad de este estudio es conocer los factores fisicoquímicos y texturales que intervienen en la cinética de gelificación de esferas de yogurt en alginato de sodio.

Como agente gelificante se empleó una concentración de 2.9% w de alginato de sodio, la cual se dejaron caer gotas de yogurt de diferente sabor (natural con y sin azúcar, fresa, zarzamora y fresa-zarzamora), teniendo un tiempo de inmersión de 8, 10 y 16 min y además se formaron dos distintas áreas de esfera. Se aplicaron pruebas fisicoquímicas, de potencial zeta, esfericidad y análisis de perfil de textura (TPA). Todo esto con el objetivo de ver como influyen estos parámetros sobre la constante de velocidad de gelificación.

Para el caso de la cinética de gelificación de las esferas de yogurt natural con azúcar, se caracterizó por tener una menor constante de velocidad de gelificación (con respecto a las demás muestras) esto se debe al contenido de azúcar, ya que el polímero compite con el agua, reduciendo su solubilidad y provocando una débil difusividad entre el gel y el yogurt. A pesar de ello aumento el volumen y la dureza de la muestra, teniendo una estructura prácticamente inalterable al ejercer una fuerza sobre ella. Presentó una reacción de primer orden.

## INTRODUCCIÓN.

La esferificación, es la gelificación controlada de un líquido con un polisacárido, dando como resultado formas esféricas de diferentes texturas y consistencias. Esta es una técnica de inmovilización que ha encontrado una amplia solicitud hoy en día (Blandino, y col., 1999). La materia prima que se utilizará para este proceso será yogurt de cinco diferentes sabores (natural con y sin azúcar, fresa, zarzamora y fresa-zarzamora), así como alginato de sodio como agente gelificante.

La elaboración de productos lácteos fermentados representa la segunda industria más importante de fermentación después de la producción de bebidas alcohólicas. El yogurt, es el producto obtenido por la coagulación de la leche y la acidificación biológica, mediante la acción de los fermentos lácticos específicos de las especies *Lactobacillus bulgarius* y *Streptococcus thermophilus*, a partir de la leche entera, cuyo resultado sea la reducción del pH, adicionado o no de aditivos alimenticios e ingredientes opcionales. Dentro de su composición química destacan dos proteínas principales la  $\beta$ -lactoglobulina (proteína de suero muy hidrofóbica) y la caseína (fosfoproteína presente en la leche). Entre sus propiedades nutrimentales destaca los beneficios sobre la flora intestinal, además que contiene una gran cantidad de vitamina de grupo B y calcio, lo que hace que sea un producto a fin al alginato de sodio (Walstra, 2001).

Los polisacáridos, generalmente conocidos como gomas, son hidrocoloides (polímeros de cadena larga y de alto peso molecular) que se utilizan en la industria alimentaria para modificar o desarrollar las propiedades funcionales de una gran variedad de productos, es decir, tiene propiedades intrínsecas debidas a su naturaleza química y su conformación molecular que determinan su comportamiento como emulsificante, estabilizante, encapsulante, entre otros (Rosas, 1994). Dentro de estos, el alginato que se encuentra formando parte de las paredes celulares de las algas pardas (*Phaeophyceae*), se da como una mezcla insoluble de sales de calcio, magnesio, sodio y potasio de ácido algínico, el cual es un polisacárido lineal de alto peso molecular constituido únicamente de unidades

de ácido D-manurónico y ácido L-glucorónico, fue descubierto por el químico inglés S. Standforf, alrededor de 1880 (Glicksman, 1969).

La capacidad de este polisacárido es la de formar geles en presencia de iones divalentes (calcio, magnesio, etc) sin necesidad de calentamiento y éstos, una vez formados son resistentes a la temperatura. A partir de 1934 el alginato y sus derivados han llegado a ser dos de los hidrocoloides más importantes usados en la industria alimentaria (Glicksman, 1969).

La cinética de gelificación, dice que tan rápido puede ocurrir algo, pero no nos dirá (por sí misma) si en realidad ocurrirá. Una comprensión adecuada de cualquier proceso requiere aportaciones tanto de la cinética como de la termodinámica (Laidler, 1997). De esta forma se podrá comprender el tipo de reacción y la velocidad en la que se genera la reacción de gelificación, para formar la esfera de yogurt.

La cinética se asemeja a la termodinámica clásica en el sentido de que, en gran parte, es de naturaleza fenomenológica; se basa en la observación. La cinética experimental requiere que una persona lleve a cabo mediciones de un proceso químico y luego intente explicarlo o generalizarlo (Castellan, 1998)

Es por ello que se decide estudiar la cinética de gelificación, debido al contenido de calcio y composición del yogurt, hacen que estos interactúen con el alginato de sodio, logrando la formación de la esfera. Por lo cual se lograra conocer la velocidad en la que se difunde el sistema yogurt-alginato de sodio, que se encuentra en relación con el volumen de la esfera y el análisis de perfil de textura.

## **CAPÍTULO 1**

### **1.1 COCINA MOLECULAR.**

El término cocina molecular se implementó en 1998, por parte del científico francés Hervé This y el físico húngaro Nicholas Kurti, quienes lo definen como *una disciplina que trata de explicar y perfeccionar los procedimientos de los alimentos* (Herdez food service, 2010).

Lo que muchos no logran comprender de la cocina molecular es que no significa solamente la utilización de elementos químicos para lograr reacciones en las materias primas a utilizar; de acuerdo a la página de internet *gastronlab* (2010) define a la cocina molecular, *como la relación entre las propiedades físico-químicas de los alimentos y los procesos tecnológicos a los que se someten, se trata de modificar texturas sin alterar el sabor original*. Además se combinan elementos químicos como el agar-agar, alginato de sodio, cloruro de calcio, lecitina de soya o nitrógeno líquido, entre otros. Cualquier producto puede someterse a un proceso molecular: frutas, verduras, pescado, lácteos, por mencionar algunos. Es fundamental conocer la composición química de la materia prima para seleccionar el proceso adecuado (Adràn, 2008).

### **1.2 ESFERIFICACIÓN.**

*La esferificación, es la gelificación controlada de un líquido con un polisacárido. Esta es una técnica de inmovilización que ha encontrado una amplia solicitud hoy en día* (Blandino, y col., 1999). Una de las técnicas comúnmente utilizadas en la cocina molecular es la esferificación con alginato de sodio. Los alginatos (producto natural que se extrae de las algas pardas) en presencia de una cantidad suficiente de iones calcio, forman agregaciones de alginato cálcico dando lugar a un gel insoluble y bastante resistente (Pinto, 2010)

Inmediatamente se forma la red de alginato y las gotas quedan con su forma esférica, de tal manera que en contacto entre el alginato y el calcio producen una gelificación inmediata, generando una película alrededor y manteniendo líquido el centro (Pinto, 2010).

### **1.2.1 PRODUCTOS QUE INTERVIENEN.**

Los productos que intervienen en las diferentes técnicas de esferificación son las siguientes:

- Alginato. Es un producto derivado de un extracto natural de algas. Tiene propiedades espesantes, pero al contacto con el cloruro cálcico, reacciona de forma distinta, pasando a ser un gelificante.
- Cloruro de calcio. Es una sal, como todas ellas, hidrosoluble, que se presenta de forma natural en el organismo y en algunos derivados lácteos.
- Citrato de sodio. Es una sal; por lo tanto hidrosoluble. Sirve para regular la acidez de los productos que intervienen en la mezcla con el alginato, con el fin de que puedan reaccionar en el momento del contacto con la disolución de agua y calcio. Regula por lo tanto el pH de los ingredientes, reduciéndolo hasta ser estable y minimizar el poder de los ácidos que desnaturaliza las sales (Adràn, 2008).

### **1.2.2 TIPOS DE ESFERIFICACIÓN.**

1.2.2.1 Esferificación directa. Se añade alginato de sodio al producto que se desea gelificar, produciendo un líquido viscoso y denso, dejando gotear sobre una solución de cloruro de calcio, produciendo gotas similares a las del caviar que se hunden, teniendo una textura semi-sólida en la superficie y líquida en el centro. Si



se deja por mucho tiempo la esfera dentro de la solución de cloruro de calcio este se llega a gelificar en su totalidad.

Dependiendo de su grado de acidez del producto se añade citrato de calcio con el fin de equilibrar el pH del alimentos (gourmetologia, 2010).

1.2.2.2 Esferificación inversa. El producto que se esferifica es el que debe contener cloruro de calcio y se debe sumergir en una solución de alginato de sodio. Si el producto contiene calcio en su composición original (leche, yogurt, entre otros) ya que no se agrega ninguna sal para lograr que gelifique la esfera. Por lo tanto el gel de alginato crece alrededor de la esfereea, pero por dentro permanece líquida (nunca se gelifica en su totalidad). Puede crecer tanto que se llegue a pegar a otra esfera. El tamaño de la esfera es más grande, se conoce como raviolis (gourmetologia, 2010).

Estas técnicas permiten obtener esferas de diferentes tamaños y formas, caviar, raviolis, entre otros. En ambos casos las muestras se pueden manipular, ya que son ligeramente flexibles. También se pueden introducir elementos sólidos dentro de la muestra gelificada, que quedan en suspensión en el líquido, con lo que se consiguen dos o más sabores durante su elaboración (Adràn, 2008).

### **1.2.3 FORMAS DE ESFERIFICACIÓN.**

El cuadro 1.2.1 presenta las diferentes formas de obtener una esfera, por medio de la técnica de esferificación.

Cuadro 1.2.1. Tipos de esferificación dentro de la cocina molecular.

Raviolis	Se sumerge una cantidad determinada del producto mezclado con sus pertinentes productos esferificantes, el tamaño es parecido a una cereza.
Raviolis rellenos	Se sumerge una cantidad determinada del producto mezclado con sus pertinentes productos esferificantes, pero a media formación de la esfera se añade en su interior un líquido, que se cubre al añadir más producto gelificante.
Caviar	Se dejan caer pequeñas gotas (por medio de una jeringa) en una solución y se retira al momento.
Spaguettis líquidos	Con un biberón o una jeringa, se realizan círculos en forma de espiral sin detener en ningún momento el líquido del producto. Dichos espirales no se llegan a pegar entre si, debido a que gelifican al instante y sedimentan en el agua.

Fuente: (gastronlab, 2010)

### 1.3 YOGURT.

El origen de este producto surge de tiempos inmemorables, probablemente de la época en la que el hombre comenzó a domesticar a las especies lecheras y a utilizar sus leches. Esta contaminación accidental no permitía obtener productos con sabores definidos y estables, aunque tenían innegablemente la ventaja (por acidez producida) de prevenir el desarrollo de la flora patógena (Luguet, 1993).

Las leches fermentadas resultan del desarrollo de determinados gérmenes que modifican los componentes normales de la leche. La lactosa se transforma parcialmente en ácido láctico o, en ciertas leches, en alcohol etílico. Los prótidos sufren un comienzo de peptonización que mejora su digestibilidad. En ocasiones se carga de CO<sub>2</sub> y se vuelve espumosa (Veisseyre, 1971).

### 1.3.1 GENERALIDADES.

De acuerdo a la NOM - 181 – SCFI - 2010, se define al yogurt como el producto obtenido de la fermentación de leche, estandarizada o no, por medio de la acción de microorganismos *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii* subespecie *bulgaricus*, y teniendo como resultado la reducción del pH.

Según la F.A.O/O.M.S (1997) el yogurt es una leche coagulada obtenida por fermentación láctica ácida, producida por *Lactobacillus bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*, de la leche pasteurizada o concentrada con o sin adiciones (de leche en polvo, etc). Los microorganismos del producto final deben ser viables y abundantes (Luguet, 1993).

Este producto, también conocido como leche cuaja búlgara, puede ser preparada con leche de cabra, de oveja y de burra, pero por lo regular es utilizada la leche de vaca más comúnmente (Veisseyre, 1971).

#### 1.3.1.1 Clasificación.

- Los yogures tradicionales o fermentados en su propio recipiente, cuya fermentación ha tenido en vasos, y que son naturales o aromatizados.
- Los yogures fermentados en cubas, más líquidos, cuya fermentación ha tenido lugar en una cuba antes de envasado. Generalmente son yogures naturales untuosos, con pulpa de frutas o con trozos de frutas (Luguet, 1993).
- Yogurt perfumado con esencia de diversas frutas; albaricoque, fresas, entre otras (Veisseyre, 1971).
- Yogurt de frutas, constituido por yogurt coagulado en cuba y batido en frío, al que se añade pulpa de fresa, de frambuesa, etcétera (Veisseyre, 1971).

Se pueden utilizar leche entera, semidescremada o desnatada, y el contenido de materia grasa será respectivamente de 3.5, 1 y 0% (Luguet, 1993).

Las esencias naturales de las frutas son destiladas y carecen por tanto de color. Se añaden a la leche en el momento de la siembra. Es frecuente que se añada un colorante natural que recuerda el color de las frutas cuya esencia se ha añadido (Veisseyre, 1971).

La adición de frutas o de pulpas de frutas y azúcar de productos especiales, lo cual se atribuye al notable aumento del consumo del yogurt (Belitz, 1997).

### **1.3.2 PROPIEDADES.**

#### *1.3.2.1 Propiedades físicas.*

La estructura física del yogurt es una red de partículas de caseína agregadas, sobre las cuales se ha depositado parte de la proteína del suero que ha sido desnaturizado por el calor. La red engloba los glóbulos grasos y el suero. Los poros más grandes de la red tienen un tamaño de unas 10 micras. La existencia de una red continua significa que el yogurt es un gel, un material viscoelástico que se caracteriza por un esfuerzo de fluencia bastante pequeño. Cuando el gel se rompe, como ocurre en la elaboración del yogurt batido, se obtiene un líquido no-Newtoniano bastante viscoso; experimenta una fuerte fluidificación por cizalla y, por lo tanto, tiene una viscosidad aparente. Los valores de pH oscilan entre 4.1 y 4.6 (Walstra, 2001).

### 1.3.2.2 Propiedades químicas.

El yogurt contiene dos proteínas principales  $\beta$ -lactoglobulina y caseína.

La caseína (del latín *caseus*, "queso") es una fosfoproteína (un tipo de heteroproteína) presente en la leche y en algunos de sus derivados (productos fermentados como el yogur o el queso). Es un conjunto heterogéneo de proteínas por lo que es difícil fijar una definición. Sin embargo, todas las proteínas englobadas en lo que se denomina *caseína* tienen una característica común: precipitan cuando se acidifica la leche a pH 4.6. Por ello, a la caseína también se le suele denominar *proteína insoluble* de la leche.

A un pH de 4.6 las caseínas son eléctricamente neutras y completamente insolubles. Éste nivel de pH se conoce como punto isoeléctrico de la caseína. Su efecto en el yogurt es que una vez ocurrida le confiere su consistencia semisólida característica (Walstra, 2001).

Ahora bien la  $\beta$ -lactoglobulina es una proteína de suero, es muy hidrofóbica (hidrofobicidad media de 5.1) igual que la caseína pero no tiene ésteres fosfatos y solo una pequeña cantidad de prolina. Contiene solo dos puentes  $-S-S$  y un grupo sulfhidrilo libre y es muy reactivo.

Su solubilidad es muy dependiente del pH y de la fuerza iónica, pero no precipita por acidificación de la leche. No es soluble en agua (Veisseyre, 19711).

En la leche se encuentra en dímero, ambas moléculas están fuertemente unidas entre sí mediante interacciones hidrofóbicas. El dímero se disocia a altas temperaturas. En condiciones de pH más bajas, la  $\beta$ -lactoglobulina se asocia en forma de octámero (Walstra, 2001).

### **1.3.3 BACTERIAS LÁCTICAS.**

El *Lactobacillus bulgaricus* es una bacteria láctica homofermentativa que se desarrolla bien entre 45 y 50 °C, acidificando fuerte en el medio. Puede formar hasta un 2.7% de ácido láctico en la leche.

El *Streptococcus thermophilus* se multiplica bien en temperaturas entre 37 y 40 °C, pero logra también desarrollarse a 50 °C. Es una especie homofermentativa termorresistente que sobrevive aun calentamiento a 65 °C durante 30 min. Puede ser destruida por un fago termorresistente (Veisseyre, 1971).

Ambos gérmenes son microaerófilos y soportan muy bien los medios ácidos (pH de 4 a 4.5). Se dice que dentro del yogurt viven en estrecha simbiosis.

Al inicio de la fabricación, el pH de la leche es favorable a los Streptococos y éstos predominan y ponen en marcha la fermentación láctica. La acción caseolítica de los lactobacilos estimula el desarrollo de los Streptococos. Al progresar la acidificación el pH de la leche se vuelve poco favorable para ellos, por lo que progresivamente son remplazados por los Lactobacilos. La leche cuaja cuando su acidez alcanza los 70 u 80 °C (Luguet, 1993).

### **1.3.4 AROMA Y SABOR DEL YOGURT.**

Una parte importante del aroma específico del yogurt, es debido a compuestos carbonílicos, en los que predomina el acetaldehído.

La fermentación láctica por parte de las bacterias del yogurt origina principalmente ácido láctico y pequeñas cantidades de productos secundarios, esencialmente compuestos carbonílicos, ácido grasos volátiles y alcoholes. El ácido láctico contribuye al sabor fresco del yogurt, en tanto los productos secundarios constituyen el sabor y aroma característico del producto. Acetaldehido, diacetil, acetona, etanol y butona, están todos presentes en el yogurt, pero el acetaldehído

es el producto metabólico de ambos microorganismos, es reconocido como el principal componente de sabor. Un sabor adecuado es obtenido con valores de acetaldehído entre 23 y 24 ppm y la velocidad de producción dependerá del incremento de la acidez y un decrecimiento del pH. El diacetil y la acetona son producidos en bajas concentraciones, raramente exceden 0.5 ppm. Acetona y butanona son considerados por tener una importancia pequeña usualmente originada en la misma. Ácidos grasos volátiles como acético, fórmico, caproico, caprílico, butírico, propiónico aumentan en el yogurt durante la fermentación. El etanol contribuye de modo considerable al aroma del yogurt. Las concentraciones de 13-16 µg/Kg son características del yogurt (Belitz, 1997).

### **1.3.5 PROCESO DE ELABORACIÓN DEL YOGURT.**

La leche usada para yogurt se debe estandarizar a un nivel menor de grasa y mayores contenidos de lactosa, proteínas, minerales y vitaminas; para eso se pueden añadir sólidos lácteos no grasos (leche deshidratada descremada, suero de leche, etcétera). También se añaden gomas, estabilizantes, saborizantes y edulcorantes. La pasteurización destruye la mayoría de la microflora innata de la leche, lo que permite un campo libre para los cultivos lácteos que se añaden posteriormente; la interacción de la caseína *K* y la  $\beta$ -lactoglobulina provocada por el tratamiento térmico controlado (85 °C / 25 min) y favorecida por el pH y la presencia del calcio, crea una nueva estructura que tiene una mejor capacidad de absorción de agua que dará como resultado un gel más firme, de mayor viscosidad que no presenta sinéresis.

La homogeneización, después de la pasteurización, estabiliza la grasa en pequeñas partículas que previenen el cremado durante la fermentación, y mejora la textura por la interacción entre las caseínas y los glóbulos de grasa (Baduí, 2006).

### 1.3.6 COMPOSICIÓN DEL YOGURT.

En el siguiente cuadro 1.3.1 se muestra una tabla de composición del yogurt entero natural azúcarado, en una porción de 125 g, con un contenido energético de 108 Kcal (Mataix, 2003).

Cuadro 1.3.1. Valor nutritivo del yogurt.

NUTRIENTES	(g)
Agua	100.6
Proteína bruta	4.5
Lípidos	2.5
Glúcidos totales	17.1
Azúcares	17.1

MINERALES	(mg)
<b>Calcio</b>	148
Sodio	114
Potacio	236
Fósforo	115
Zinc	0.4

VITAMINAS	(mg)
Vitamina D	0.44
Timina	0.05
Rivoflavina	0.19
Vitamina B12 (ug)	10.4

Fuente: (Mataix, 2003)



## **1.4 HIDROCOLOIDES.**

El término hidrocoloide se usa comúnmente para describir un grupo de polímeros naturales solubles en agua que se encuentran en abundancia en la naturaleza (McKenan, 2003).

Los agentes espesantes, estabilizantes y gelificantes son los principales ingredientes alimentarios que controlan significativamente las propiedades texturales y organolépticas de los alimentos. Los polisacáridos y las proteínas, los dos biopolímeros más importantes que se utilizan para crear y modificar la textura de muchos productos alimentarios procesados o formulados, se incorporan frecuentemente de una forma u otra por sus propiedades gelificantes. Cada hidrocoloide gelificante produce un gel con atributos de textura únicos, aunque la forma en que imparte su papel texturizante específico a cualquier producto alimenticio particular puede variar de acuerdo con el ingrediente en cuestión y dependerá, del tipo, fuente y concentración así como de las propiedades físicas del sistema en particular (Glicksman, 1969).

Las principales propiedades de los hidrocoloides son su capacidad para producir soluciones acuosas procesando altas viscosidades a bajas concentraciones de gel para suministrar la consistencia necesaria y producir geles de fuerzas diferentes y estabilidad (Rosenathal, 2001).

### **1.4.1 ESTRUCTURA DE LOS HIDROCOLOIDES.**

Un gel, es aquel que se compone de moléculas de polímeros reticulados, que se enlazan para formar dentro del medio líquido una red interconectada. La gelificación a nivel molecular es la formación continua de las moléculas del polímero, las propiedades de carácter sólido son impartidas por un marco de cadenas poliméricas que se extienden a lo largo del gel. La mayoría de los geles poliméricos para alimentos, tienen estructura e interacciones débiles como son: puentes de hidrógeno, electrostática, o son hidrofóbicos, y son a menudo

termorreversibles, y a veces se producen en presencia de exceso de agua o electrólitos acuosos (McKenan, 2003).

Se pueden distinguir varios tipos básicos de geles alimentarios. Existen tipos extremos de geles de macromoléculas flexibles entrecruzadas (como son geles de gelatina) y geles de partículas duras. En medio, existe, geles hechos de macromoléculas relativamente rígidos entrecruzados (la mayoría polisacáridos) y geles de partículas deformables, por ejemplo geles de leches.

La gelificación de biopolímeros se puede dividir en “frío” o “caliente”, sobre los principales mecanismos de gelificación: (1) forma de gelificación inducida por enfriamiento, incluye geles que se producen en la naturaleza y proporcionan estructura en los sistemas biológicos; (2) gelificación por calentamiento, incluye proteínas globulares que en el proceso son desdobladas (McKenan, 2003).

Cada hidrocoloide tiene propiedades especiales que son el resultado de su estructura molecular individual única. Una característica estructural común entre los hidrocoloides alimentarios es que todos son compuestos poliméricos de alta masa molecular, y son las asociaciones y enmarañamientos de estas moléculas de polímeros que dan un aumento de las propiedades espesantes y gelificantes deseadas.

Estructuralmente, los geles están formados por una red (tridimensional) coloidal continua, que mantiene el producto junto, con un medio más o menos viscoso embebido en él. La interacción entre esta red coloidal (surgiendo del entrecruzamiento de las moléculas adyacentes) y el medio viscoso determina el comportamiento mecánico y la estabilidad del sistema y por consiguiente da un ascenso de sus propiedades características (Rosenthal, 2001).

Los tipos de clasificación de la estructura coloidal, se puede hacer una distinción útil entre los procesos de agregación reversibles e irreversibles. Los primeros se determinan sobre todo mediante consideraciones termodinámicas y los últimos por

consideraciones cinéticas. Ambos están influenciados por la naturaleza de las interacciones interpartículas. Las interacciones repulsivas netas implican la estabilidad coloidal y de este modo la inhibición de la agregación (Rosenthal, 2001).

Son capaces de formar geles por asociación física debido a sus cadenas poliméricas, por ejemplo, enlaces de hidrógeno, asociación hidrofóbica y por catiónes de forma cruzada. Difieren los polímeros sintéticos, que normalmente consisten en cadenas poliméricas reticuladas covalentes. Ciertos hidrocoloides forman hélices, por ejemplo, los geles de agarosa, carragenina, gomas, entre otros; forman geles en frío. Estos hidrocoloides adoptan una conformación desordenada a altas temperaturas, pero a bajas temperaturas se someten a un cambio conformacional y las hélices se ordenan. Las hélices se asocian para formar un gel, por lo cual el proceso es térmicamente reversible y por lo tanto los geles que necesitan altas temperaturas, las hélices se forman después de la agregación (McKenan, 2003).

#### 1.4.1.1 Dinámica y mecánica de la formación y ruptura estructural.

Cuando chocan segmentos de moléculas lineales en solución, forman una asociación de varias unidades de cadenas. La estabilidad de estos agregados helicoidales está directamente relacionada con la fuerza de ruptura del gel macroscópico y depende principalmente de la longitud; es decir, del número de enlaces intermoleculares que desarrollan antes que el número de zonas de enlaces. También, las conexiones interenlace ejercen una influencia sobre la resistencia del gel.

Cuando dos polímeros forman una zona de enlace a lo largo de sus longitudes de cadena, otras, quizás los límites distantes de cada eslabón, pueden colisionar y formar una zona de enlace con otras moléculas, y los segmentos del polímero de las diferentes cadenas ordenadas se vuelven empaquetadas en una disposición ordenada de segmentos de conexiones unidos de forma covalente.

La naturaleza de las zonas de enlace ordenas varía entre los diferentes sistemas de gelación, pero usualmente están compuestas de segmentos de cadena con estructuras conformacionalmente ordenadas, que son las mismas que las que se encuentran en el estado sólido de hidrocoloide.

El gel poseerá una resistencia dependiendo de la fuerza de las unidades intermoleculares en las zonas de enlace. Ahora bien si la unión es débil, se puede romper y la estructura total del gel se desorganiza mediante la agitación suave. En este caso, el gel débil se dice que es tixotrópico. Las fuerzas de agitación suministran suficiente energía para romper muchas, o incluso la mayoría, de las zonas de enlace, y la viscosidad de la dispersión disminuye.

Cuando los enlaces son de fuerza más grande, se forma un gel más reconocible que no se puede romper fácilmente con agitación y puede ser lo suficientemente fuerte para que, bajo fuerza, el gel se divida, como sucede en geles de gelatina.

La relación entre la microestructura y la textura, por consiguiente se puede utilizar en la optimización de los procesos de producción de alimentos, así como el desarrollo de nuevos productos como las propiedades sensoriales deseadas (Rosenthal, 2001).

### **1.5 ALGINATO.**

El alginato es un polisacárido, por lo tanto un hidrocoloide (polímero de cadena larga y de alto peso molecular) que se utiliza en la industria alimentaria para modificar o desarrollar las propiedades funcionales de una gran variedad de productos, al disolverse o dispersarse en un medio acuoso para dar soluciones mucilaginosas o dispersiones viscosas (Rosas, 1994).

Se le llama polisacárido a las macromoléculas formadas por la polimerización de glúcidos simples o monosacáridos (azúcares cuya molécula posee una función

aldehídica o cétonica), o sus derivados: ácidos urónicos, aminoazúcares, entre otras (Tecnología Alimentaria, 2008).

Existen propiedades funcionales secundarias, es decir, tienen propiedades intrínsecas debidas a su naturaleza química y conformación molecular que determinan su comportamiento como emulsificante, encapsulante, etc (Rosas, 1994).

Durante la formulación de un producto alimenticio, es posible seleccionar un hidrocoloide a través del proceso completo de manufactura para todas las posibilidades. Un problema es la variedad de propiedades funcionales que involucra una manufactura y las cuales son capaces de proporcionarle características al alimento (Química Cooperation, 2008).

### **1.5.1 GENERALIDADES.**

El alginato es una molécula que se encuentra formando parte de las paredes celulares de las algas pardas (*Phaeophyceae*). Pertenecen al grupo de sustancias denominadas biopolímeros marinos y están llamando la atención debido a la diversidad de sus aplicaciones (Tecnología Alimentaria, 2008).

Fue descubierta por el químico inglés E.C.C. Stanford, alrededor de 1880. La utilización comercial del algín en la industria alimentaria no ocurrió sino hasta 1934; desde este tiempo sus usos se han incrementado rápidamente, y con el desarrollo del alginato de propilenglicol en 1944, el algín y sus derivados han llegado a ser dos de los hidrocoloides más importantes usados en la industria alimentaria (Glicksman, 1964).

La particularidad que define al alginato es su capacidad de formar geles en presencia de iones divalentes (calcio, magnesio, etc.) sin necesidad de calentamiento y éstos, una vez formados, son resistentes a la temperatura. Es decir que no se funden con el calor (Tecnología Alimentaria, 2008).

Desde entonces, este y sus derivados se han utilizado, en forma de hidrocoloide, para diversas aplicaciones como la fabricación de aditivos alimentarios, productos farmacéuticos, cosméticos y textiles (Química Cooperation, 2008).

El alginato sódico es una de las formas más solubles y, por tanto, de uso más frecuente en la industria alimentaria (Glicksman, 1964).

#### 1.5.1.1 Obtención.

Dentro del grupo de las algas pardas se puede extraer alginato de diferentes especies: *Macrocystis*, *Laminaria*, *Ascophyllum*, *Saegassum*, entre otras.

Los métodos de obtención consisten en conseguir precipitar la molécula en forma de ácido algínico o alginato de calcio que son las formas insolubles, para poder separarlas del resto de los componentes. Una vez extraídos se procede a obtener la molécula en forma de sus sales más solubles y el alginato de propilenglicol (Tecnología Alimentaria, 2008).

Las propiedades de solubilidad de los alginatos según su estado iónico y su poder de formar complejos con el calcio. Un tratamiento preliminar de las algas con un ácido permite eliminar los iones calcio unidos al alginato. La solubilización de las macromoléculas se obtiene a continuación al neutralizar con una base (generalmente NaOH) formando una sal alcalina; el alginato se precipita por la reacidificación bajo la forma de ácido algínico o por la adición de cloruro de calcio, bajo la forma de alginato cálcico. En algunos casos el calcio se elimina por un nuevo tratamiento ácido (Rosas, 1994).

### 1.5.1.2 Estructura.

Se encontró que el ácido alginico, es un polisacárido que está compuesto de dos especies de ácidos urónicos: la unidad de ácido manurónico (M) y la unidad de ácido glucorónico (G), los cuales forman tres tipos de segmentos de bloque de homopolisacáridos, como se puede observar en la Figura 1.5.1 (Química Coorporation, 2008).

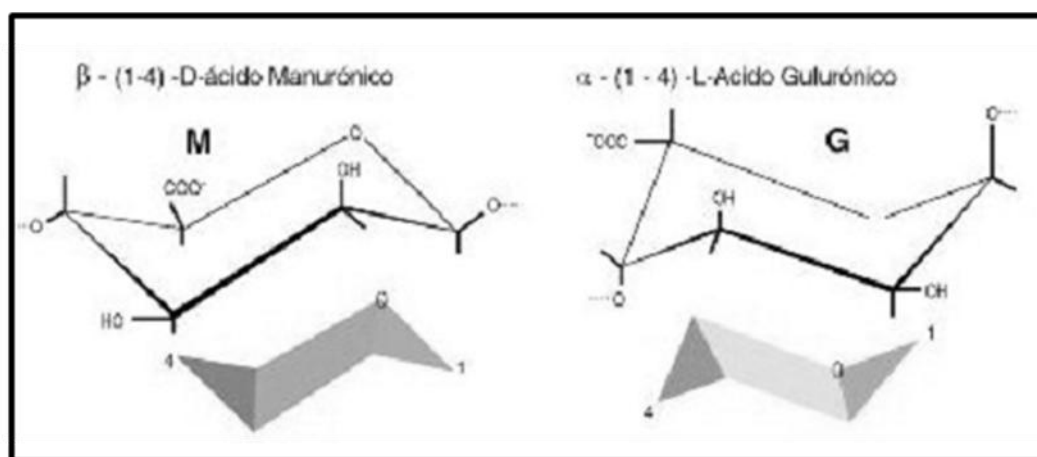


Figura 1.5.1. Estructura química del alginato (Fuente: Química Coorporation, 2008).

En la Figura 1.5. 2, se muestran las diferencias de la relación M/G y la configuración de bloque explica las diferencias de las propiedades y funcionalidad del alginato, en especial, la capacidad gelificante y la fuerza de gel. La relación M/G depende de factores tales como la especie de la alga marina, la parte del alga marina utilizada, la ubicación de la costera la estación de cosecha.

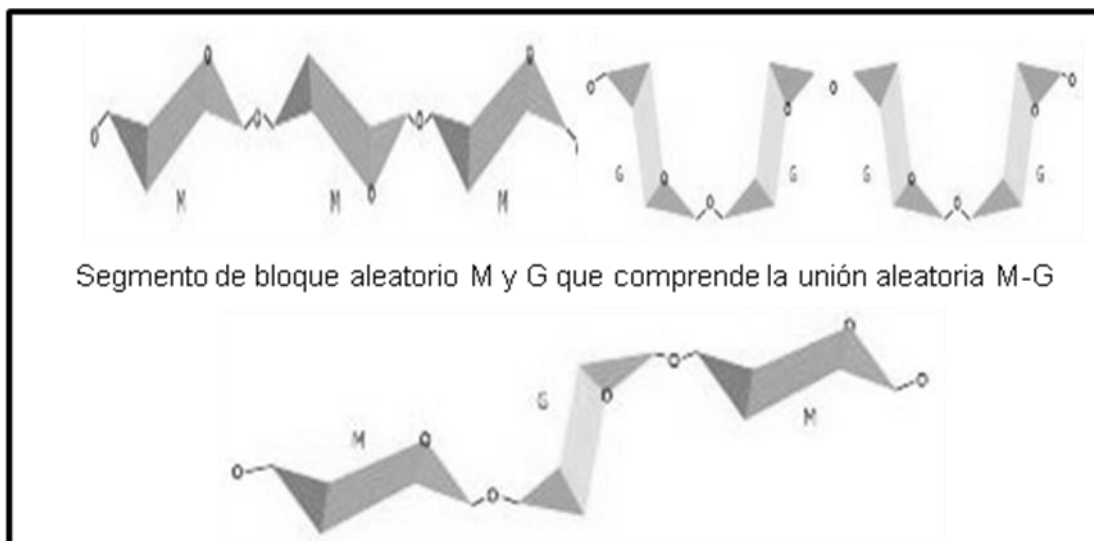


Figura 1.5.2. Segmento de bloques M y G (Fuente: Química Cooperation, 2008).

El grupo carboxilo, dentro de las unidades M y G, intercambia iones con facilidad y puede reaccionar con varios tipos de cationes. Esto se traduce en cambios de las propiedades y la funcionalidad del alginato. La particularidad que tiene es su capacidad de formar geles en presencia de iones divalentes (calcio, magnesio, etc) sin necesidad de calentamiento y éstos, una vez formados, son resistentes a la temperatura (Química Cooperation, 2008).

Al utilizar estas reacciones químicas y los cambios de funcionalidad asociados, los alginatos tienen numerosas aplicaciones comerciales en diversas categorías, tales como agente espesante, gelificante, estabilizante de dispersión, coagente de textura o formador de filamentos o películas (Glicksman, 1964).

### 1.5.1.3. Clasificación.

En el Cuadro 1.5.1, se muestra la lista de aditivos encontrados en la siguiente clasificación de moléculas y compuestos derivados del ácido alguínico:



Cuadro 1.5.1. Tipos de alginato.

TIPO DE ALGINATO	FORMULA CONDENSADA	CARACTERISTICAS
E-400 Ácido algínico	$(C_6H_8O_6)_n$	Insoluble en agua
E-401 Alginato sódico	$(C_6H_7NaO_6)_n$	
E-402 Alginato potásico	$(C_6H_8KO_6)_n$	
E-403 Alginato amónico	$(C_6H_{11}NO_6)_n$	
E-404 Alginato cálcico	$(C_{12}H_{14}CaO_{12})_n$	Insoluble en agua
E-405 Alginato propilenglicol (PGA)	$(C_9H_{14}O_7)_n$	Esterificado

Fuente: (Tecnología Alimentaria, 2008).

Atendiendo a las características que presentan los tipos de alginato, es importante tener en cuenta que las formas más solubles son el ácido algínico y su sal de calcio. En cambio, el alginato sódico es una de las formas más solubles y, por tanto, de uso más frecuente en la industria alimentaria (Tecnología Alimentaria, 2008).

### 1.5.2 PROPIEDADES.

El alginato, como un polisacárido hidrofílico, absorbe humedad de la atmósfera; por lo tanto, el contenido de humedad de equilibrio está relacionado con la humedad relativa del medio ambiente y su higroscopicidad.

Tienen una excelente estabilidad de almacenamiento a temperaturas moderadas (24 °C o menos), pero a 32 °C la estabilidad decrece para las sales y el propilenglicol tiende a ser insoluble (Rosas, 1994).

Las propiedades físicas típicas de un alginato de sodio refinado grado alimenticio se muestran en el Cuadro 1.5.2.

Cuadro 1.5.2. Propiedades físicas de los diferentes tipos de alginato.

PROPIEDAD	ÁCIDO ALGÍNICO	ALGINATO DE SODIO	ALGINATO DE PROPILENGLICOL
Humedad	7%	13%	13% max
Cenizas	2%	23%	10% max
Color	Blanco	Marfil	Crema
Gravedad específica	---	1.59	1.46
Densidad (lb/ft <sup>3</sup> )	---	54.62	33.71
Temperaturas (°C)	---	---	---
de oscurecimiento	160	150	155
de carbonización	250	340-460	220
de calcinación	450	480	400
Calor de combustión (cal/g)	2.8	2.5	4.44

Fuente: (Glücksman ,1969)

### 1.5.3 APLICACIONES.

Al trabajar con alginato se puede conseguir una gelificación o un aumento de la viscosidad.

Por sí solo el alginato aporta viscosidad que puede verse aumentada con la presencia de una pequeña proporción de iones calcio en el medio. También se puede conseguir una gelificación, dando estructura a un alimento, y que esta no se pierda en las diferentes etapas de calentamiento a las que pueda verse sometido. Es decir, se forma una estructura termorreversible.

La formación del gel ocurre al entrar en contacto con los iones calcio a otros iones di o polivalentes presentes en el medio. La reacción es casi inmediata, por eso es importante que el calcio se vaya liberando poco a poco para que pueda ir reaccionando de manera lenta y ordenada para obtener unas buenas características de gel. Los fosfatos, los que tiene función de secuestrante, son los encargados de regular la velocidad de reacción entre el calcio y el alginato (Tecnología Alimentaria, 2008).

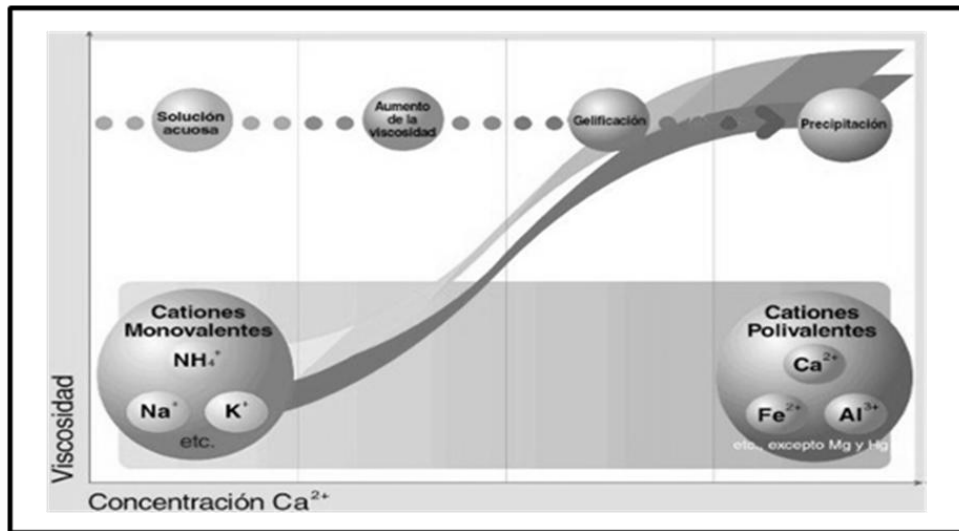


Figura 1.5.3. Cambio de viscosidad a medida que se produce el intercambio iónico entre iones monovalentes por divalentes (Fuente: Tecnología Alimentaria, 2008).

Se puede observar en la Figura 1.5.3, que los alginatos, como la mayoría de los hidrocoloides, llegan a un área máxima de viscosidad durante la hidratación y después permanece constante. Durante la hidratación cada molécula es envuelta completamente por moléculas de agua; antes de alcanzar este estado, algunas de las moléculas siguen conservando puntos de enlace con otras moléculas, las cuales producen una gran fricción interna (viscosidad), hasta llegar al estado de hidratación compleja (Fuente: Tecnología Alimentaria, 2008).

## 1.6 DETERMINACIÓN DE PRUEBAS TEXTURALES.

En las últimas décadas, muchos investigadores han contribuido en el conocimiento básico de descripción de las propiedades fundamentales de geles de polímeros. Durante el proceso de elaboración y consumo de los alimentos, estos sistemas están sujetos a las deformaciones. Las deformaciones grandes pueden provocar que el alimento se quiebre o fracture (McKenan, 2003).

Para experimentos de deformación grande, se utilizan dispositivos tales como los instrumentos de ensayo de compresión y tensión, como son los analizadores de textura (McKenan, 2003). Éstos a menudo miden los esfuerzos, la deformación y las propiedades de quiebra de los sistemas completamente gelificados que tienen relevancia en las propiedades finales del material. Se pueden agrupar los métodos en tres tipos: fundamentales, imitativos y empíricos (Rosenthal, 2001).

### **1.6.1 MÉTODOS IMITATIVOS.**

Las medidas de un punto único tales como la resistencia del gel se han utilizado por los suministradores y usuarios para caracterizar los sistemas gelificados. La textura de un gel se obtiene mediante el análisis de la curva fuerza/deformación generada por la compresión de una muestra de gel utilizando un analizador de textura, conocida como Análisis de Perfiles de Textura (TPA-Texture Profile Analysis) fue desarrollada originalmente por General Foods en 1960.

El TPA se ha aplicado como un método útil para una amplia variedad de alimentos pero es particularmente útil para el análisis de sistemas gelificados. El procedimiento conlleva la compresión de una muestra de gel dos veces sucesivas utilizando un analizador textural (Rosenthal, 2001).

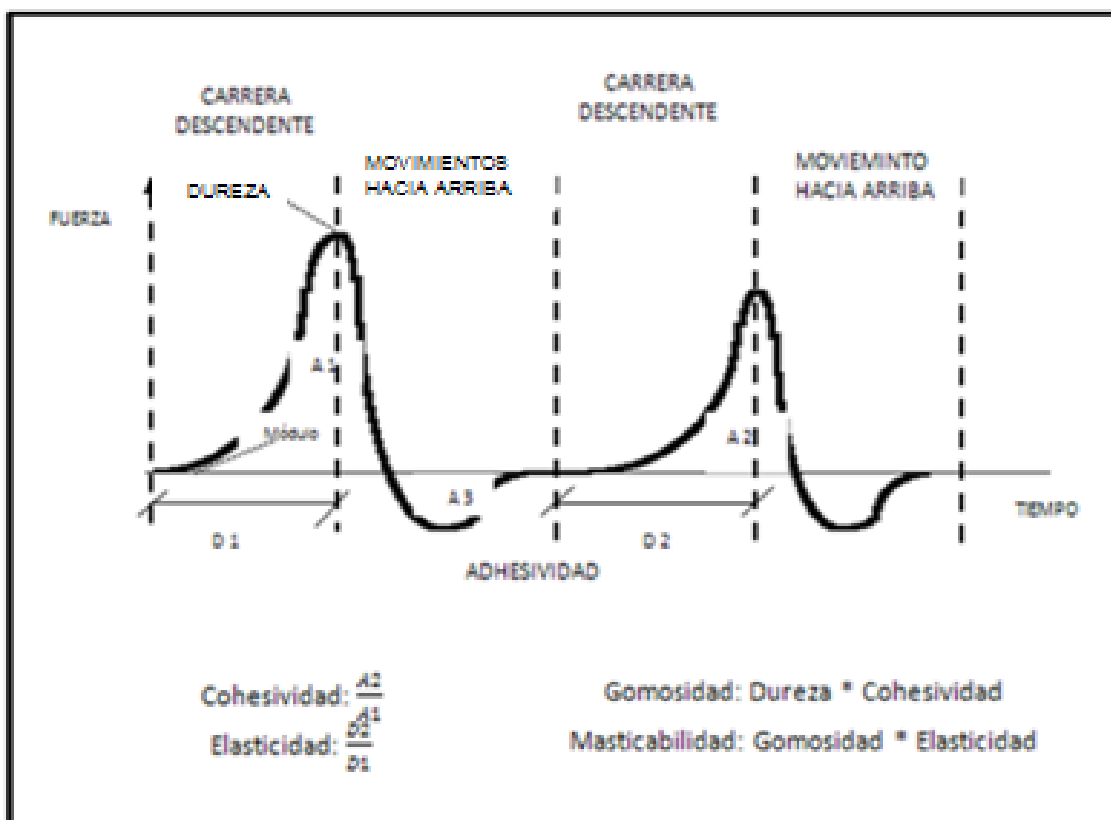


Figura 1.6.1. Perfil de textura típico para un gel (Fuente: Rosenthal, 2001).

De acuerdo a la Figura 1.6.1, el módulo es la pendiente inicial de la curva fuerza/deformación, es una medida de cómo se comporta la muestra cuando se comprime una cantidad pequeña. Se correlaciona con la percepción sensorial de la firmeza de la muestra. Este módulo no es un parámetro del trabajo original del TPA (Rosenthal, 2001)

En el Cuadro 1.6.1 se muestra la definición de las características texturales, las cuales se pueden dividir en tres clases principales: (1) características mecánicas, (2) características geométricas y (3) otros, esencialmente el contenido de humedad y grasa del alimento (Deman, 1973).

Cuadro 1.6.1. Definición de las características texturales.

PROPIEDADES	CARACTERISTICAS
Primarios	
Dureza	Es el máximo de fuerza que tiene lugar en cualquier tiempo durante el primer ciclo de compresión, esta correlacionada con la fuerza de ruptura del material.
Cohesividad	Mide la fuerza de los enlaces internos del producto, se obtiene como el cociente entre el área del segundo pico y el área del primer pico.
Viscosidad	Tasa de flujo por unidad de fuerza.
Elasticidad	Tasa a la cual un material deformado vuelve a su estado de reposo, después de aplicarle una fuerza.
Adhesividad	Trabajo necesario para superar la fuerza de atracción entre la superficie del alimento y la superficie de los materiales con los que el alimento entra en contacto
Secundarios	
Fracturabilidad	Se define como la primer caída significativa de la curva fuerza/deformación durante el primer ciclo de compresión. Es el punto de la primera fractura o grieta de la muestra.
Masticabilidad	Energía requerida para masticar un alimento a otro listo para tragar, un productos dureza, cohesividad o elasticidad.
Gumosidad	Energía necesaria para desintegrar un alimento listo para tragar, un producto de menor grado de dureza y alto grado de cohesividad.

Fuente: (Deman, 1973; Rosenthal, 2001; Roudot, 2004).

Las características mecánicas, se manifiestan por la reacción del alimento antes una fuerza, incluye principales parámetros básicos y tres parámetros secundarios que se componen de dos o más parámetros primarios. Las características geométricas se debe al tipo de componentes que presenta el alimento y se divide en dos tipos: (1) los relacionados con el tamaño y forma de la partícula y (2) los

relacionados con la forma y orientación de la partícula. Las otras características se refieren a la importancia del contenido de humedad de la muestra, así como el tipo de grasa que contenga (Deman, 1973).

### **1.6.2 MECÁNICA DE FRACTURA.**

Fue desarrollada originalmente por A. A. Griffith en 1921, fue uno de los primeros en reconocer que las grietas actúan como concentradores de esfuerzo y como puntos para la iniciación de la fractura en sólidos quebradizos; también postuló que todos los materiales contienen minúsculas fallas o grietas y que algunos materiales son más sensibles a la presencia de estas grietas que otros.

La fractura tiene lugar cuando la velocidad a la que la energía de deformación es liberada por unidad de área de la grieta supera la velocidad a la que la energía superficial es absorbida en la creación de nuevas superficies de fractura.

De acuerdo a la Figura 1.6.2, se muestra la variación de la energía de deformación en función de la longitud de la grieta. A medida que la grieta crece, la energía superficial ( $U_s$ ) aumenta literalmente con la longitud de la grieta (siendo el área superficial una función del área), y la energía de deformación ( $U_e$ ) disminuye con el cuadrado de longitud de la grieta (siendo la energía de deformación dependiente del volumen del material que está siendo deformado) (Rosenthal, 2001).

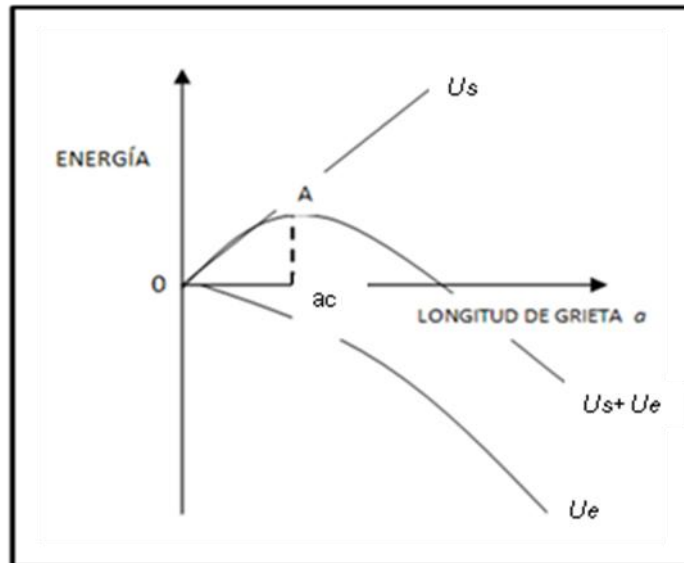


Figura 1.6.2. Variación de la energía de deformación superficial ( $U_s$ ) y la elástica ( $U_e$ ) en función de la longitud de la grieta (Fuente: Rosenthal, 2001).

### 1.6.2.1 Fractura y transición quebradizo-dúctil.

Conforme los materiales alimentarios operan mayormente en la región dúctil o gomosa, también denominada transición vítrea o movimiento adentro y afuera de la región quebradiza-dúctil dependiendo de las condiciones circulantes.

Como ya se mencionó anteriormente, los alimentos se encuentran en la región dúctil o plástica, la gran amplitud de mecanismos de disipación de energía plástica tienen importantes implicaciones en términos de velocidad o tiempo en los que tiene lugar la deformación. La fractura de muchos alimentos depende de la velocidad de deformación, puesto que el flujo plástico y viscoso es altamente dependiente de la velocidad (Rosenthal, 2001).

Ahora bien la fractura quebradiza es altamente dependiente de la geometría de la muestra mientras que la parte dúctil es más o menos independiente de la forma pero altamente dependiente de la velocidad y temperatura. Los materiales se vuelven menos rígidos a medida que la temperatura se eleva, y en cierto punto



pasará a través de la denominada transición vítrea, donde pasa del estado vítreo elástico quebradizo a la región de flujo dúctil (Rosenthal, 2001).

El tamaño tiene un importante, efecto sobre la fractura. Es mucho más fácil romper objetos grandes que pequeños, no solamente debido a que existe una mayor probabilidad de encontrar una grieta grande en un objeto grande sino también debido a que existirá más volumen relativo de área de grieta en el que almacenar el exceso de energía de deformación. Si el objeto es grande, es más probable que las dimensiones de la muestra serán grandes en comparación a cualquier zona plástica. Ahora en un objeto pequeño, el tamaño de la zona plástica se acercará a las de las dimensiones de la muestra, haciendo más probable la deformación plástica e inhibiendo la fractura quebradiza (Rosenthal, 2001).

## **1.7 ESFERICIDAD.**

De acuerdo a la geometría, una esfera es un cuerpo sólido limitado por una superficie curva cuyos puntos equidistan de otro interior llamado centro de la esfera (Kindle, 1995).

Lehmann (1992), define a una superficie esférica, como el lugar geométrico de los puntos de espacio que equidistan de un punto fijo. La distancia constante se llama radio y el punto fijo centro.

Para calcular el área y el volumen de una esfera, se siguen las siguientes ecuaciones:

- El volumen de una esfera es dos tercios del volumen de un cilindro circunscrito a la esfera cuya base es igual al círculo del diámetro de la circunferencia del cilindro, por lo tanto

$$V = \frac{2}{3} * \pi r^2 * 2r \quad (1)$$

es decir,  $\frac{2}{3}$  del área de la base del cilindro por su altura más cuatro veces su tamaño inicial respecto al de una esfera la mitad de su tamaño posterior

$$V = \frac{2}{3} * 2\pi r^3 \quad (2)$$

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} \quad (3)$$

De acuerdo a la ecuación 3 se puede decir, que es con la cual se calcula el volumen de la esfera (Lehmann, 1992).

- El área, como lo menciona Arquímedes, es la superficie de la esfera era de dos tercios respecto al cilindro, entonces

$$A = \frac{2}{3}(2r * 2\pi r + 2\pi r^2) \quad (4)$$

$2r * 2\pi r$  es el lado del cilindro, es un rectángulo con base  $2\pi r$  y altura de  $2r$ .  $2\pi r^2$  es el área de las dos bases circulares. Al sumar todas las áreas da el total de la esfera (Lehmann, 1992)

$$A = \frac{2}{3}(4\pi r^2 + 2\pi r^2) \quad (5)$$

$$A = \frac{2}{3}(6\pi r^2) \quad (6)$$

$$A = 4\pi r^2 \quad (7)$$

De acuerdo a la geometría analítica, se dice que la forma general de la ecuación de la esfera, contiene cuatro constantes arbitrarias independientes, una superficie esférica queda perfectamente determinada por cuatro condiciones independientes (Lehmann, 1992).

Se considerara un sistema de coordenadas en el espacio que está estrechamente asociado con la superficie esférica (Kindle, 1995).

Sea  $P(x, y, z)$  un punto cualquiera de una superficie esférica de centro el origen y radio  $r$ . La ecuación de la superficie es

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \quad (8)$$

Ahora por el punto  $P$  y el eje  $Z$  pasa un plano que corta al plano  $XY$  en la recta  $l$ . El ángulo  $\theta$  formado por  $l$  y la parte positiva del eje  $X$ , y por  $\varphi$  el formado por el radio  $OP$  y la parte positiva  $Z$  (Lehmann, 1992).

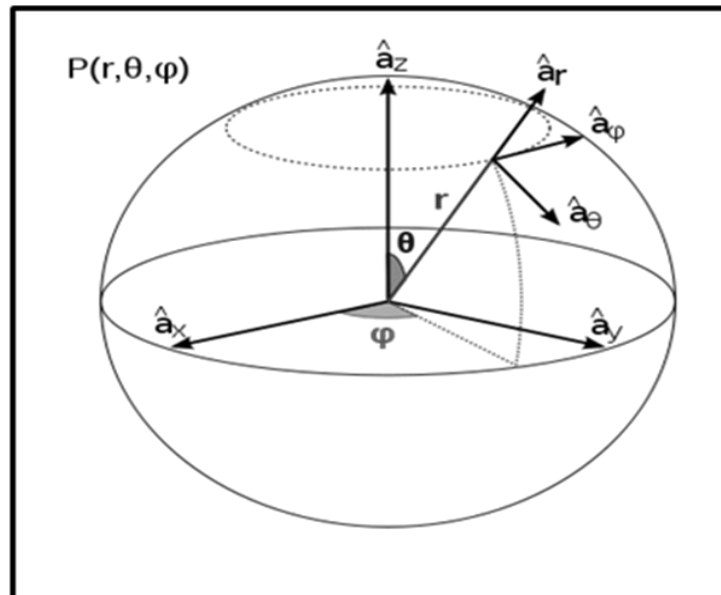


Figura 1.7.1. Esquema que muestra los ejes de la esfera a medir (Fuente: Kindle, 1995).

### 1.7.1 PROGRAMA *Image J*.

Esta herramienta de análisis y procesamiento de imágenes se debe a su rapidez y arquitectura basada en plug-ins, lo que amplía sus posibilidades hasta límites desconocidos. Inspirado en el popular NIH Image, ofrece un panel de funciones muy sofisticado que va desde la colorimetría, análisis de contornos, filtros de imágenes, cálculos de áreas, ángulos y distancias entre píxeles, histogramas de

densidad, y mucho más ya que también soporta operaciones estándares de procesamiento de imágenes como por ejemplo la manipulación del contraste, la detección de contornos, el filtrado de medianas, el aumento de nitidez o efecto de suavizado, entre otros.

ImageJ es multiplataforma ya que está escrito en Java, pero propone dos modalidades de acceso, sea como applet empujada en un navegador web sea como aplicación de escritorio mediante la máquina virtual Java. Aquí lo que importa es el análisis y el procesamiento de la imagen. Además es multitarea, por lo que actúa con suma rapidez.

Calcula con gran facilidad valores de los píxeles así como áreas específicas, previa detección de contornos. Puede medir distancias y ángulos, pero también ejecutar transformaciones geométricas (rotar, escalar, etc.) y zoom. ImageJ puede trabajar con un número ilimitado de imágenes simultáneamente (Equipo Softonic, 2010).

## **1.8 FENÓMENOS DE ADSORCIÓN.**

La adsorción es un proceso de equilibrio que consiste en observar la capacidad de algunos sólidos para hacer que ciertas sustancias específicas de una solución se concentren en la superficie de estos sólidos. De esta manera se pueden separar diferentes componentes de soluciones gaseosas o líquidas.

Se deben distinguir dos conceptos claves: el adsorbente que es la fase sólida que adsorbe y el adsorbato que es cualquier sustancia que se adsorba (Seira, 2008).

La adsorción no se debe confundir con la absorción; la diferencia está en que esta última implica la acumulación de la sustancia absorbida en todo el volumen del adsorbente, no solamente en su superficie. En la Figura 1.8.1 se muestra el proceso de sorción.

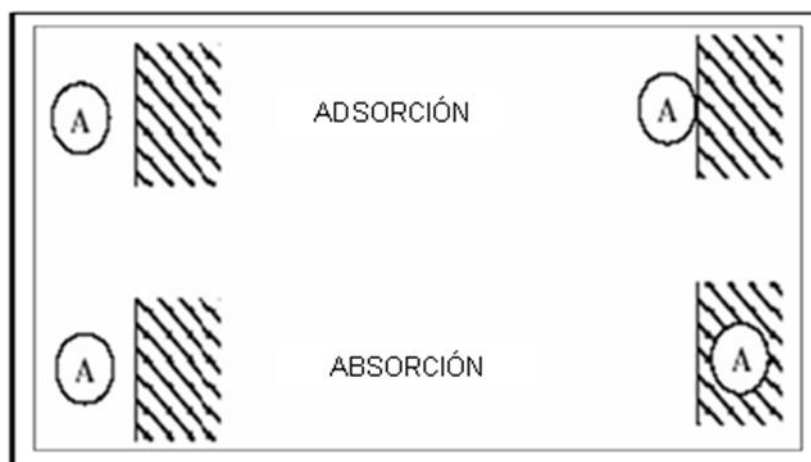


Figura 1.8.1. Proceso de sorción. (Fuente: Seira, 2008)

### 1.8.1 TIPOS DE ADSORCIÓN.

La adsorción puede ser consecuencia del carácter liofóbico del soluto respecto al disolvente o de una elevada afinidad del soluto por el sólido.

El grado de solubilidad de una sustancia disuelta es uno de los factores que determina la intensidad de la primera fuerza impulsora. La relación observada entre la solubilidad y la adsorción puede explicarse si se tiene en cuenta la interacción soluto-disolvente. Cuanto mayor es la solubilidad, más fuerte es el enlace soluto-disolvente e inferior es el grado de adsorción.

La segunda fuerza impulsora para la adsorción proviene de la afinidad específica del soluto por un sólido. Para este caso se diferencian tres tipos de adsorción (Seira, 2008).

- Química.

Tiene lugar cuando el adsorbente y el adsorbato se unen mediante enlaces químicos. La formación de enlaces de tipo covalente durante la adsorción química hace que el proceso sea más selectivo y que dependa en una gran medida de la naturaleza de las sustancias involucradas. La interacción química entre ambas especies hace que el proceso sea en la mayoría de los casos un proceso irreversible.

La transformación química de la especie adsorbida requiere una cierta energía que no es necesaria en la adsorción física. A esta energía se le llama energía de activación puesto que es la energía necesaria para que se inicie el cambio químico. Por este motivo la adsorción química suele ocurrir a temperaturas más elevadas que la adsorción física (Seira, 2008).

- Física.

La adsorción física es un fenómeno fácilmente reversible, es el resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción entre las moléculas del sólido y la sustancia adsorbida. Estas fuerzas son las llamadas fuerzas de Van der Waals. Las moléculas están libres para trasladarse dentro de la interfase. Este tipo de adsorción es la más frecuente y suele predominar a temperaturas bajas.

La unión de partículas de adsorbato puede realizarse en varias capas, adsorción multicapas, o en una sola capa, adsorción monocapa. El hecho de que la unión entre adsorbato y adsorbente tenga lugar mediante fuerzas de Van der Waals posibilita la adsorción multicapa, ya que éstas se pueden extender desde la capa más interna hasta otras capas más externas (Seira, 2008).

- Intercambio iónico.

Este fenómeno se produce como resultado de la atracción electrostática de los iones de una sustancia que se concentra en la superficie del sólido. La carga del ión es el factor que determina la adsorción por intercambio iónico. Para iones de

igual carga, el tamaño molecular es el factor que determina el intercambio (Seira, 2008).

### **1.8.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ADSORCIÓN.**

Se puede hablar de cuatro factores que influyen en el proceso de adsorción:

- Área superficial.

La adsorción es un fenómeno superficial, como tal, el grado de adsorción es proporcional al área superficial específica. El área superficial puede definirse como la porción de área total que está disponible para la adsorción.

Como el grado de una reacción superficial varía con el área superficial disponible, la velocidad de adsorción tendría que evidenciar un aumento gradual en función de la inversa del diámetro de las partículas adsorbentes.

La velocidad y grado de adsorción para partículas de un determinado tamaño tendrían que variar de forma aproximadamente lineal con la dosificación de adsorbente sobre un rango de dosificación que no da lugar a grandes diferencias en la concentración de soluto que permite, en la masa principal de la disolución (Seira, 2008).

- Naturaleza del adsorbente

Cuando se considera la adsorción de una solución, se tiene que tener en cuenta el hecho de que la solubilidad del soluto influye, en gran parte, con el control del equilibrio de adsorción (Seira, 2008).

Para que la adsorción tenga lugar, es preciso romper una especie de posible enlace entre el soluto y el disolvente. Cuando más grande es la solubilidad, más fuerte es el enlace soluto-disolvente y menor es el grado de adsorción.

En general, la solubilidad de cualquier compuesto orgánico en el agua disminuye cuando aumenta la longitud de la cadena, esto se debe a que el compuesto es más parecido a un hidrocarburo. Esto constituye la segunda regla principal en relación entre adsorción y naturaleza del soluto.

El tamaño molecular también tiene importancia, ya que está relacionado con la adsorción de los solutos orgánicos. Esta dependencia de la velocidad con el tamaño sólo se puede esperar en reactores discontinuos de elevado grado de agitación. Cuanto mayor sea el peso molecular del adsorbato, mayor será también la adsorción.

Las observaciones principales relativas a los efectos de la ionización sobre la adsorción llegan a la conclusión que, mientras los compuestos tengan una estructura simple, la adsorción es mínima para las especies neutras. A medida que los compuestos son más complejos, el efecto de la ionización tiene menos importancia.

Para los compuestos anfóteros, es decir, que tienen la capacidad de actuar tanto de ácido como de base, los estudios realizados indican una adsorción máxima en su punto isoeléctrico, o sea, cuando el pH en el cual los extremos ácidos o bases de los compuestos están ionizados, y el compuesto tiene una carga neta igual a cero.

Existe una regla general que dice que un soluto polar será fuertemente adsorbido por un disolvente no polar para un adsorbente polar, pero preferirá mucho más un disolvente polar que no un adsorbente no polar. La polaridad de los compuestos orgánicos es una función de la separación de carga dentro de la molécula (Seira, 2008).



Cualquier compuesto asimétrico será más o menos polar, pero existen diversos grupos funcionales que tienden a producir polaridades bastante elevadas en los compuestos, unos ejemplos serían los grupos hidroxílicos, carboxílicos, nitro, nitrilo, carbonil, sulfónico y amino. La adsorción disminuye a medida que la polaridad aumenta (Seira, 2008).

- pH

El pH de la disolución en que tiene lugar la adsorción influye en el grado de adsorción por varias razones. Debido que los grupos hidroxílicos adsorben de forma bastante fuerte, la adsorción de otros iones viene influenciada por el pH de la solución. Además, el pH interviene en la adsorción ya que también contribuye en el grado de ionización de los compuestos ácidos o básicos, el cual es un factor determinante de la adsorción (Seira, 2008).

- Temperatura.

Las reacciones de adsorción son normalmente exotérmicas; por tanto el grado de adsorción acostumbra a aumentar cuando disminuye la temperatura. Hay que tener en cuenta que pequeñas variaciones de temperatura no alteran mucho el proceso de adsorción.

La variación del contenido calorífico del sistema en que sucede la adsorción, es decir, la cantidad de calor desarrollada en la adsorción de una cantidad definida de soluto sobre un adsorbente se llama calor de adsorción.

La dependencia de la velocidad de adsorción está expresada en función de la energía de activación. La velocidad de adsorción está relacionada con la energía de activación por medio de la ecuación de Arrhenius (Seira, 2008).

## **1.9 CINÉTICA DE GELIFICACIÓN.**

La cinética se refiere a la velocidad en la cual ocurre una reacción química, pero no nos dirá (por sí misma) si en realidad ocurrirá. Una comprensión adecuada de cualquier proceso requiere aportaciones tanto de la cinética como de la termodinámica (Laidler, 1997).

La cinética se asemeja a la termodinámica clásica en el sentido de que, en gran parte, es de naturaleza fenomenológica; se basa en la observación. La cinética experimental requiere que una persona lleve a cabo mediciones de un proceso químico y luego intente explicarlo o generalizarlo (Ball, 2004).

En el curso de una reacción química, las concentraciones de todas las especies varían en tiempo, cambiando las propiedades del sistema. La velocidad de la reacción se calcula mediante el valor de cualquier propiedad adecuada que pueda relacionarse con la composición del sistema como una reacción del tiempo. La propiedad escogida debe ser de fácil medición; debe variar la superficie en curso de la reacción como para hacer una distinción precisa entre las diversas composiciones del sistema a medida que transcurre el tiempo. Además la propiedad elegida depende de cada reacción.

En uno de los primeros estudios cuantitativos sobre las velocidades de reacción, se calculó la velocidad de inversión de la sacarosa midiendo el cambio con el tiempo del ángulo de rotación de un rayo de luz polarizada en el plano que pase a través de la solución de azúcar (Castellan, 1998).

### **1.9.1 VELOCIDAD DE REACCIÓN.**

Las reacciones se clasifican cinéticamente como homogéneas y heterogéneas. Una reacción homogénea tiene lugar en una sola fase; una reacción heterogénea se produce, al menos en parte, en más de una fase. Un tipo común de reacción heterogénea tiene una velocidad que depende del área de una superficie que está

expuesta a la mezcla de reacción. Esta mezcla puede encontrarse en la pared interior del recipiente de reacción o puede ser la superficie de un catalizador sólido (Castellan, 1998).

Una de las descripciones fundamentales de una reacción química es la rapidez o velocidad con la que se lleva a cabo. La velocidad implica que el tiempo – en unidades de segundos, minutos, horas, días, etc. - también representa dentro de una reacción una indicación de la cantidad de moles de reactivo o producto que reaccionan o se producen en cierto periodo.

La velocidad de la mayoría de las reacciones varían con respecto del tiempo, se define como la rapidez de la reacción con los valores que tendrán al principio de un proceso químico, en que solo se encuentran presentes los reactivos, no los productos (Ball, 2004).

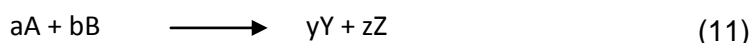
La velocidad de reacción se define como la derivada con respecto del tiempo del grado de reacción y dividida entre el volumen (Laidler, 1997).

$$v = \frac{1}{v} \frac{ds}{dt} = \frac{1}{Vv_i} \frac{dni}{dt} \quad (9)$$

Si el volumen es constante,  $\frac{dni}{V}$  puede remplazarse por el cambio de concentración  $dci$ , y entonces

$$v = \frac{1}{v_i} \frac{dci}{dt} \quad (10)$$

Esta cantidad es independiente de la especie de reactivo o producto que se elija. Para una reacción (Laidler, 1997)



que ocurre a volumen constante, la velocidad de reacción es (Laidler, 1997):

$$v = -\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{d[B]}{dt} = \frac{1}{y} \frac{d[Y]}{dt} = \frac{1}{z} \frac{d[Z]}{dt} \quad (12)$$

Las derivadas de las concentraciones con respecto del tiempo (con signo negativo para los reactivos) son las velocidades de consumo y de formación y por lo tanto (Laidler, 1997):

$$v = \frac{v_A}{a} = \frac{v_B}{b} = \frac{v_Y}{y} = \frac{v_Z}{z} \quad (13)$$

Es necesario diferenciar entre  $v$  sin letra como subíndice, que significa velocidad de reacción, y  $v$  con letra como subíndice, que significa velocidad de consumo o de formación. Como los coeficientes estequiométricos y en consecuencia los grados de reacción dependen de la manera en que se escribe la reacción, siempre que se mencionan las velocidades de reacción es necesario dar la ecuación estequiométrica (Laidler, 1997).

En algunas reacciones la velocidad de consumo o de formación se puede expresar empíricamente mediante una ecuación de la forma (Laidler, 1997)

$$v_A = k_A [A]^\alpha [B]^\beta \quad (14)$$

donde  $k_A$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son independientes de la concentración y del tiempo. De manera semejante, para un producto Z, donde  $k_Z$  no es necesariamente igual a  $k_A$  (Laidler, 1997),

$$v_Z = k_Z [A]^\alpha [B]^\beta \quad (15)$$

La ecuación 14, recibe el nombre de *ley de la rapidez de una reacción*, la cual se debe determinar de forma experimental, formando una reacción química bajo diferentes condiciones iniciales, midiendo la rapidez inicial por medio de algún método experimental y deduciendo algebraicamente los órdenes para cada reacción y el valor numérico de la constante de rapidez de la reacción  $k$  (Ball, 2004).

El orden de reacción gobierna la forma matemática de la ley de la velocidad y, por tanto, la variación de la concentración de todas las especies como el tiempo. El orden de las reacciones respecto a las varias especies debe obtenerse por experimentación (Castellan, 1998).

### 1.9.2 REACCIÓN DE ORDEN CERO.

El análisis se restringirá en algunas propiedades de dichas leyes de la velocidad. Una reacción que se rige por una cinética de orden cero tiene una ley de velocidad de (Ball, 2004).

$$\frac{d[A]}{dt} = k * [A]^0 = k \quad (16)$$

Es decir, la velocidad de desaparición de A es una constante de velocidad de orden cero, este tipo de reacción tienden a ser raras. Se puede considerar que la ecuación 15 de diferentes formas. Debido a que la velocidad de desaparición del reactivo A es constante, una gráfica de  $[A]_t$  en función del tiempo es una recta, integrando la ecuación anterior se puede obtener *la ley de la velocidad de orden cero integrada* (Ball, 2004):

$$[A]_0 - [A]_t = k * t \quad (17)$$

donde  $t$  representa el tiempo transcurrido.

### 1.9.3 REACCIONES DE PRIMER ORDEN.

Considérese una reacción de descomposición de tipo simple



Como la sustancia A es el único reactivo, debido a equilibrar la reacción con el coeficiente de A igual a la unidad (Castellan, 1998). Supóngase que la reacción es de primer orden respecto a A y que la velocidad no depende de la concentración de ningún producto; entonces la ley de la velocidad es del tipo (Ball, 2004)

$$velocidad = k * [A]^n \quad (19)$$

la constante de proporcionalidad  $k$  es la constante de velocidad de reacción y normalmente es independiente de las concentraciones exactas de A (o de cualquier otra especie cuya concentración aparezca en la expresión algebraica), el exponente  $n$  recibe el nombre de orden con respecto de A (Ball, 2004).

Normalmente los órdenes son números enteros pequeños y positivos pero pueden ser números enteros negativos, cero o incluso fracciones. La suma de todos los órdenes de la expresión algebraica es el *orden total de la reacción* (Ball, 2004).

Ahora bien al utilizar la ecuación 17, se reescribe la cantidad de velocidad en términos de un cambio en la cantidad sobre un periodo. Si se enfoca a una especie de reactivo A, la velocidad es (Ball, 2004)

$$velocidad = \frac{d[A]}{dt} \quad (20)$$

donde el término  $[A]$  puede ser una cantidad en moles o en unidades de concentración. La ecuación general es la siguiente (Ball, 2004)

$$\frac{d[A]}{dt} = k * [A]^n \quad (21)$$

Una *reacción de primer orden* es aquella cuya cinética se rige por una ley de velocidad de una reacción en la que el orden es 1; es decir (Ball, 2004);

$$-\frac{d[A]}{dt} = k * [A]^1 \quad (22)$$

Reordenando todos los términos en la especie A en un miembro y todas las demás variables y todas las variables en el otro miembro:

$$\frac{dc}{[A]} = -k * dt \quad (23)$$

En esta ecuación, se deja fuera el exponente 1. Si se supone que, en determinado tiempo inicial  $t_i$ , la cantidad de A se representa mediante  $[A]_i$ , y en determinado tiempo final  $t_f$ , la cantidad se representa mediante  $[A]_f$ , integrando ambos miembros de la ecuación entre los límites de la variable respectiva (Ball, 2004)

$$\int_{[A]_f}^{[A]_i} \frac{d[A]}{[A]} = \int_{t_f}^{t_i} -k * dt \quad (24)$$

La integral es el miembro izquierdo es el logaritmo natural de A, evaluada entre los dos límites. La integral entre el miembro derecho es sencillamente la variable  $t$  (tiempo) evaluada entre sus dos límites. Después de llevar a cabo las evaluaciones de cualquier miembro, se obtiene (Ball, 2004)

$$\ln \frac{[A]_f}{[A]_i} = -k(t_f - t_i) \quad (25)$$

El signo negativo al principio del miembro derecho normalmente se elimina cambiando el numerador y el denominador en el término del logaritmo, esto se trata de una propiedad matemática de los logaritmos (Ball, 2004)

$$\ln \frac{[A]_i}{[A]_f} = -k(t_f - t_i) \quad (26)$$

El signo menos se cancela y el resultado es

$$\ln \frac{[A]_i}{[A]_f} = k(t_f - t_i) \quad (27)$$

Normalmente, cuando se mide un proceso, el tiempo inicial se iguala a cero y el tiempo final es sencillamente el transcurrido. Se utiliza el símbolo  $[A]_0$  para indicar la cantidad inicial de  $A$  en el tiempo cero y el símbolo  $[A]_t$  para representar la cantidad de  $A$  en cierto tiempo  $t$ . Si se aplica lo descrito anteriormente, la ecuación 25 queda de la siguiente manera:

$$\ln \frac{[A]_0}{[A]_t} = k * t \quad (28)$$

La ecuación 26 relaciona la forma en que varía la concentración de  $A$  con el tiempo en el caso de una reacción de primer orden. Recibe el nombre de *forma integrada de una ley de la velocidad de una reacción de primer orden* o, sencillamente, *ley de la velocidad integrada* (Ball, 2004).

Existen otras dos formas de expresar matemáticamente la ecuación 26. Una consiste en calcular el logaritmo inverso en ambos miembros y reordenar luego las variables, de tal forma que se obtenga una expresión para  $[A]_t$  conforme varía el tiempo. De esta manera (Ball, 2004)

$$[A]_t = [A]_0 * e^{-kt} \quad (29)$$

que muestra que la cantidad en cualquier tiempo  $t$  se rige por una función exponencial negativa de tiempo. Las funciones exponenciales negativas poseen la característica de contar con un valor máximo en la variable  $t = 0$ , y de decrecer monótona y asintóticamente hacia cero. La gráfica muestra la tendencia general de  $[A]_t$  se aproxima a cero se rige por la constante de velocidad  $k$  (Ball, 2004)

Otra forma de expresar la ecuación 26 consiste en separar los logaritmos del numerador y del denominador en el término fraccionario. Se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\ln[A]_t = \ln[A]_0 - kt \quad (30)$$



En esta ecuación tiene la forma de una recta  $y = mx + b$ , donde  $y$  es el  $\ln[A]_0$  la pendiente  $m$  es  $-k$ ,  $x$  es  $t$  (el tiempo transcurrido) y la intersección con el eje  $y$ ,  $b = \ln[A]_0$ . Por consiguiente, una gráfica  $\ln[A]_t$  - el logaritmo natural de la cantidad de  $A$  en diversos tiempos- en función del tiempo será una recta, esta tendrá una pendiente de  $-k$ , la constante negativa de la velocidad, y  $\ln[A]_0$ , el logaritmo de la cantidad original, como la intersección con el eje  $y$ . Se generará la gráfica de una recta de  $\ln[A]_t$  en función de  $t$  sólo si la reacción es, de hecho, de primer orden con respecto de  $A$  (Ball, 2004).

En la Figura 1.9.1 que a continuación se refleja que, (A) en el caso de una reacción de primer orden, la reacción en cualquier momento, representada mediante  $[A]_0$  disminuye en forma exponencial característica. La velocidad a la que ésta se aproxima a una concentración de cero depende del valor de la constante de la velocidad. Matemáticamente, la gráfica de  $[A]_t$  no llega a cero hasta que  $t = \infty$ . (B) En una reacción de primer orden, una gráfica del logaritmo natural, en función del tiempo da como resultado una recta cuya pendiente es  $-k$  y tiene una intersección con el eje  $y$  en  $\ln[A]_0$ . Una característica natural de una reacción de primer orden; ninguna otra reacción da como resultado una recta cuando se traza  $\ln[A]_t$ , en función del tiempo (Ball, 2004).

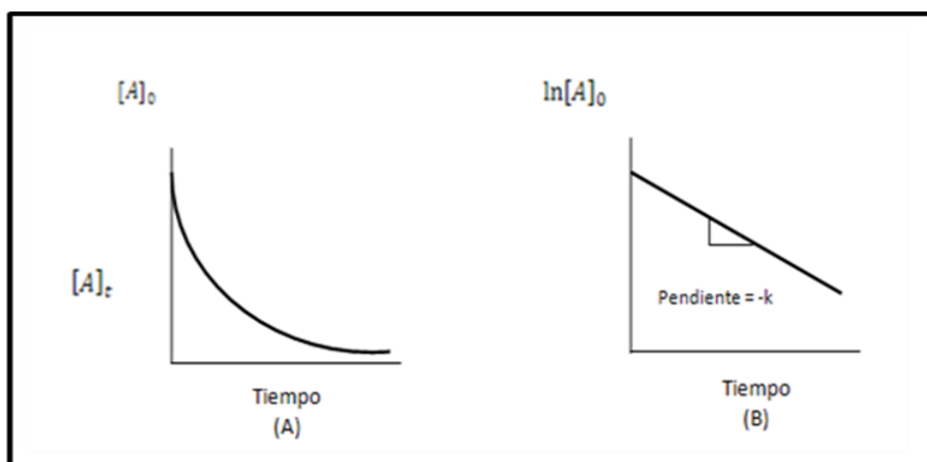


Figura 1.9.1. Representación de la tendencia de una reacción de primer orden.  
(Fuente: Castellan, 2004)

#### 1.9.4 REACCIÓN DE SEGUNDO ORDEN.

Una reacción de segundo orden se define mediante la ley de la velocidad (Laidler, 1997)

$$\frac{d[A]}{dt} = k * [A]^2 \quad (31)$$

La ecuación 29 se puede tratar como si fuera una reacción de primer orden; agrupando las variables en A en un miembro y las variables de tiempo en otro miembro (Laidler, 1997):

$$-\frac{d[A]}{[A]^2} = k * dt \quad (32)$$

De nuevo, al integrar ambos miembro de la ecuación entre los límites final e inicial y suponiendo que se comienza en cierto tiempo inicial  $t_i = 0$ , de tal manera que  $t$  representa el tiempo transcurrido, obteniendo la *ley de la velocidad de una reacción de segundo orden integrada* (Laidler, 1997).

$$\frac{1}{[A]_t} - \frac{1}{[A]_0} = k * t \quad (33)$$

Conforme la concentración de la especie reactiva  $A$  varía con respecto del tiempo, la concentración de esta se ajusta a la ecuación anterior (siempre y cuando la reacción se rija por la cinética de segundo orden con respecto de la especie  $A$ ). Logrando reformular la ecuación 32 para obtener la ecuación de una recta (Laidler, 1997)

$$\frac{1}{[A]_t} = k * t + \frac{1}{[A]_0} \quad (34)$$

donde ahora  $y$  es  $1/[A]_t$ ,  $x$  corresponde, de nuevo, al tiempo;  $m$  es la constante de la velocidad  $k$ , y la intersección con el eje  $y$ ,  $b$ , corresponde  $1/[A]_0$ , el inverso de la cantidad inicial de la especie  $A$  (Laidler, 1997).

La siguiente Figura 1.9.2, describe lo siguiente, muestra la forma en que varía una gráfica de una reacción de segundo orden si  $1/[A]_t$  se graficara en el eje  $y$  y el tiempo en el eje  $x$ . De nuevo, la forma recta de una gráfica de  $1/[A]_t$  en función de  $t$  es característica de una reacción de segundo orden. La gráfica de estas variables darán como resultado una recta si y sólo si la reacción es de segundo orden con respecto de la especie  $A$  (Laidler, 1997).

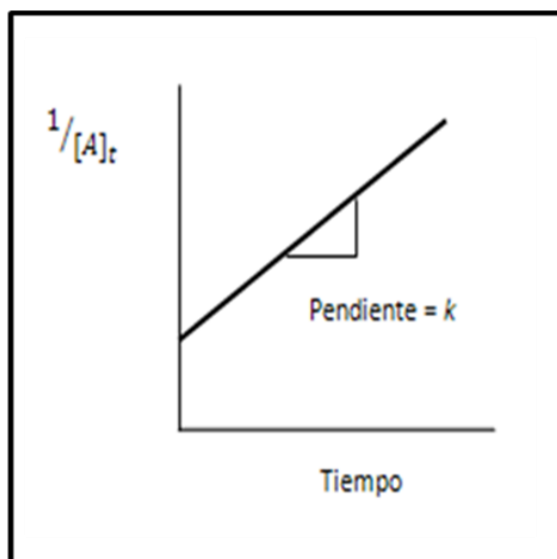


Figura 1.9.2. Gráfica de una reacción de segundo orden, donde se observa el inverso de la concentración  $1/[A]_t$ . (Fuente: Castellan, 1998).

#### 1.9.4 CINÉTICA DE DIFUSIVIDAD.

Si existen diferencias de concentración dentro de un sistema, estas diferencias tienden a desaparecer con el tiempo, y este es proceso de manejo de entropía. Este proceso se conoce comúnmente como la difusión causada por el movimiento aleatorio de translación y rotación de las moléculas y partículas. En relación a la calidad de los alimentos, la migración de agua, se debe a la difusión, la cual es particularmente importante. La rapidez de estos dos cambios producen dos teorías, la de Fick (que es la más conocida) y la de Maxwell-Stefan, que últimamente se ha vuelto muy popular. (Van Boekel, 2009).

El comportamiento de difusión de las macromoléculas en solución depende de sus tamaños y formas. Además, las interacciones de las moléculas grandes con las pequeñas moléculas del disolvente y/o de otros solutos, puedan afectar tanto su difusión como la de las moléculas de soluto pequeñas (Geankoplis, 1992).

Los geles pueden considerarse como materiales semisólidos “porosos”. Están constituidos por macromoléculas en solución acuosa diluida y el gel solo constituye un porcentaje en peso muy bajo de la solución. Los espacios abiertos de la estructura del gel están llenos de agua. Las velocidades de difusión de solutos pequeños en los geles son algo inferiores a las soluciones acuosas (Geankoplis, 1992).

### **1.9.5 CINÉTICA DE ADSORCIÓN.**

La velocidad de adsorción con que las sustancias orgánicas son eliminadas de las soluciones acuosas por los adsorbentes sólidos es un factor muy importante, como por ejemplo en la aplicación de un proceso en el control de la calidad del agua.

En la Figura 1.9.2 se muestra el mecanismo global de adsorción que consta de las siguientes fases:

- 1) Transporte de material externo: transporte del soluto desde la disolución hasta la capa límite, la superficie externa del adsorbente.
- 2) Difusión externa: transporte a través de la capa límite hasta la superficie del sólido.
- 3) Difusión interna: transporte desde la superficie hasta los centros activos en el interior de la partícula.
- 4) Adsorción o intercambio iónico: fijación del soluto sobre estos centros activos (Seira, 2008).

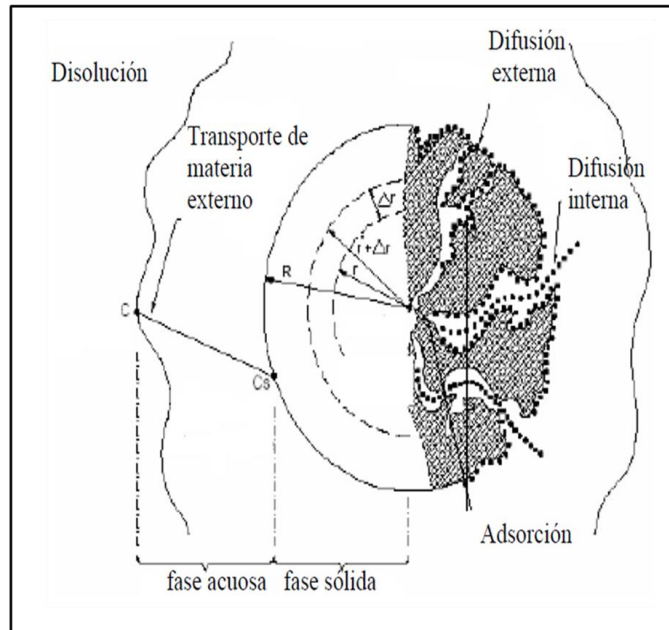


Figura 1.9.3. Etapas de adsorción (Fuente: Seira, 2008)

Si se considera que las tensiones interfaciales disminuyen por los compuestos químicos representativos de los materiales se puede observar que el proceso de adsorción no es probablemente el que controla la velocidad, y tiene que existir un proceso mucho más lento que controle la velocidad global de adsorción.

En ciertas condiciones de trabajo, el transporte del adsorbato controla el proceso. Por tanto, uno de los parámetros más importantes que se tiene que considerar es la naturaleza de la etapa que controla la velocidad de la reacción global.

Algunas propiedades del adsorbato son útiles para determinar la naturaleza de la etapa que controla la velocidad.

Esta etapa puede caracterizarse en cierto modo por la energía de activación del proceso (Seira, 2008).

Un estudio del efecto de temperatura sobre la velocidad permite evaluar la energía de activación por lo que constituye un nuevo método para determinar la naturaleza de las reacciones que controlan la velocidad.

Para un proceso en el cual la velocidad global viene controlada por una reacción estrictamente de adsorción o por difusión la variación de la velocidad debería de ser directamente proporcional a la concentración del soluto. Pero en el caso de que la velocidad sea controlada por el transporte entre partículas la relación entre concentración y velocidad de reacción no será directamente proporcional. Por lo tanto, el efecto de la concentración del soluto sobre la velocidad en que tiene lugar la adsorción es también un factor importante.

La variación de la velocidad con el tamaño de partícula constituye un método útil para caracterizar el mecanismo que controla la velocidad para un determinado sistema. La consideración del tamaño de la partícula también es importante para obtener la utilización óptima de un adsorbente en las operaciones de tratamiento y condicionará el tipo de sistema utilizado para realizar una determinada aplicación (Seira, 2008).

#### **1.10 POTENCIAL ZETA.**

La diferencia de los potenciales interfaciales se debe a la distribución desigual de los diversos aniones y cationes a través de la intercara, lo que conduce a que las fases de uno y otro lado de la intercara adquieran carga eléctrica (Adamson, 1990).

Se define un potencial,  $\Phi$ , como la caída de potencial total a través de la intercara. En equilibrio viene dado por la relación  $\Phi = \psi + V$ , en donde  $\psi$  es el potencial de distribución de Beutner y  $V$  es el potencial de Baur. El potencial  $\Phi$ , es el potencial interno o galvánico (Somorjai, 1994).

Se dice que si uno o más tipos de iones pueden disolverse en ambas fases, no puede establecerse un potencial interfacial estable debido a la absorción. Esto se basa en el hecho de que, en el equilibrio, los iones difusibles tienen que distribuirse siempre entre las fases separadas por la intercara, de tal manera que sus potenciales electroquímicos, vuelvan a tomar los valores iniciales en cada fase (Adamson, 1990).

Toral (1973) menciona que el origen de los diversos potenciales, se da en la elección de los sistemas; con diferentes fases *no acuosas* se pueden medir cambios de potencial que se atribuyen por completo a una intercara aceite-agua o a cambios en una intercara aire-agua. Los cambios pueden darse por adición de sales orgánicas a una u otra de las fases, mientras los potenciales de absorción se miden entre agua y aire o entre agua y aceite no polar, cuando se ha extendido y adsorbido en la intercara una sustancia con actividad de superficie. Ahora los *potenciales interfaciales o potenciales de superficie*, según que la fase no acuosa sea aire o un aceite parafínico, y se llaman a los cambios en el potencial de distribución interfacial, *potenciales de distribución*.

### **1.10.1 LA DOBLE CAPA DIFUSA.**

Una solución de un electrólito con sus iones uniformemente distribuidos. El efecto de una superficie cargada, el espacio que esta ocupando las paredes contienen una carga, con lo cual aparece en la solución un número equivalente de iones de signo opuesto (contraiones) a fin de mantener la electroneutralidad. Una nueva distribución de los iones en la solución, pues los contraiones serán atraídos por la pared y los similiones (iones de carga de igual signo que la de la pared) serán repelidos por la pared, a la par que la agitación térmica a distribuir unos y otros uniformemente por la solución.

La pared afecta a contraiones y similiones, de modo que la doble capa se forma por aumento en la concentración de contraiones y disminución en la de similiones cerca de la pared. El comportamiento de contraiones y similiones está en la



concentración de los primeros puede aumentar bastante, por lo que el efecto de su alejamiento de la pared es muy pequeño comparado con el de los contraiones (Toral, 1973).

### **1.10.2 LA CAPA DE STERN.**

Stern introdujo una corrección que tiene en cuenta el tamaño finito de los iones de la primera capa iónica adyacente a la superficie cargada. En la teoría de doble capa difusa, se atribuye a la difusividad de la doble capa al hecho de que la agitación térmica contrarrestar, en parte, las atracciones electrostáticas entre la superficie y los contraiones. En la teoría de Stern las fuerzas electrostáticas son tan fuertes, por adsorción y además se encuentran tan reforzadas por las fuerzas de van der Waals, que la agitación térmica no puede contrarrestarlas.

La capa compacta de Stern está en equilibrio dinámico con la capa difusa de Gouy y está formada por contraiones. Los iones de la capa de Stern están unidos a la superficie. En este sentido la capa de Stern es parte integrante de la superficie cargada.

La doble capa total se considera que ésta dividida en dos partes, una capa compacta (de Stern), en la cual el potencial cambia y una capa difusa (en la cual el potencial cae a cero) las dos capas están en equilibrio (Somorjain, 1994).

### **1.10.3 DIFERENTES POTENCIALES.**

Un potencial electrostático en un punto se mide por el trabajo necesario para atraer a este punto una carga unidad desde el infinito (Adamson, 1990).

Los potenciales definidos de esta manera, son los que más interesan, pero solamente mientras la carga transportada, el ion correspondiente, siga en solución sin cambio en su naturaleza. A medida que este ion cruza varias capas de la

solución, el trabajo correspondiente a cada una define el potencial en cada una de las capas (Toral, 1973).

Toral (1973) menciona que los potenciales de tres capas, son lo más importantes, los cuales son:

1. Es el correspondiente a la propia superficie cargada y es una medida del potencial total de la doble capa. Es el llamado *potencial de Gouy* y se designa por  $\psi_n$ .
2. Un segundo potencial es el correspondiente al límite de la parte compacta (de Stern) y la parte difusa (de Gouy) de la doble capa y se llama *potencial de Stern*, designado por  $\psi_s$ .
3. No es estrictamente un límite de la fase potencial, ya que se desarrolla íntegramente dentro de la región del fluido. Puede considerarse como la diferencia potencial en un medio de otro modo prácticamente uniforme entre un punto a cierta distancia de la superficie y un punto en el plano de corte (Adamson, 1990) que separa la parte fija de la parte móvil de la doble capa. El potencial en este plano se llama el **potencial zeta**, designado por  $\zeta$ . No corresponde a la capa de Stern sino a la parte de la capa de Gouy que no está dentro de una capa de solución firmemente unida a la pared (Toral, 1973).

Cuando se intenta cortar la parte móvil (de la doble capa eléctrica), de la superficie cargada con los contriones adheridos a ella formando la parte fija de la doble capa, se producen los llamados *fenómenos electrocinéticos*. Como estos fenómenos tienen particular importancia en el estudio de sistemas dispersos de partículas de tamaño coloidal (Toral, 1973).

Los iones cerca de la superficie de la partícula, se unen fuertemente, mientras que los iones más lejanos tienen uniones débiles, por lo que se llama capa difusa. Dentro de la capa difusa existe un límite teórico y los iones que estén incluidos en este límite se moverán con la partícula, cuando se mueve dentro de un líquido

ninguno de los iones se quedarán inmóviles, este límite se conoce como plano de deslizamiento (Manual: ZetaSizer Nano Series, 2010).

Un potencial que existe entre la superficie de la partícula y el líquido de dispersión que varía en función de la distancia de la superficie de la partícula, este potencial dentro del plano de deslizamiento, se conoce como potencial zeta.

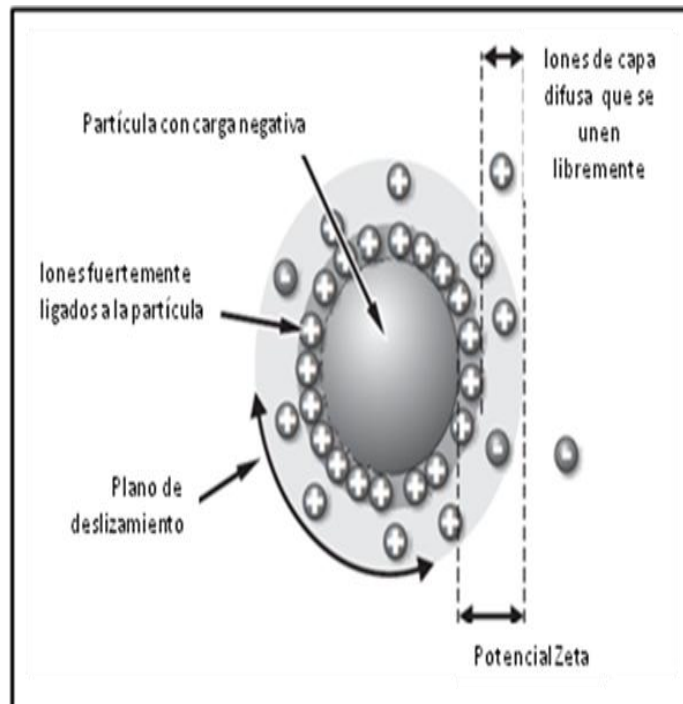


Figura 1.10.1. Ubicación del potencial zeta (Fuente: Manual ZetaSizer Nano Series, 2010)

El potencial zeta se mide utilizando una combinación de técnicas: electroforesis y velocimetría láser Doppler, a veces llamado láser Doppler de la electroforesis. Este método mide la velocidad con la que se mueve una partícula dentro de un líquido, cuando un campo eléctrico se aplica.

El potencial zeta de la muestra se determinará si las partículas dentro del líquido flocculan o no. Este método se utiliza en emulsiones, para estudiar la química involucrada en la determinación de la estabilidad de la emulsión, en donde se utiliza (Manual: ZetaSizer Nano Series, 2010).

## **CAPÍTULO 2.**

### **2.1 PROBLEMA**

Determinar la cinética de gelificación de esferas de yogurt en alginato de sodio.

### **2.2 OBEJTIVOS**

#### 2.2.1 General.

Determinar si el tiempo de inmersión, el volumen y la composición del yogurt de las esferas de yogurt en alginato de sodio intervienen en la cinética de gelificación.

#### 2.2.2 Particular I.

Determinar la cinética de gelificación a dos diferentes tamaños de área de las esferas de yogurt.

#### 2.2.3 Particular II.

Determinar la cinética de gelificación de las esferas de yogurt natural sin azúcar.

#### 2.2.4 Particular III.

Determinar la cinética de gelificación de las esferas de yogurt con azúcar y diferentes sabores.

### **2.3 HIPÓTESIS**

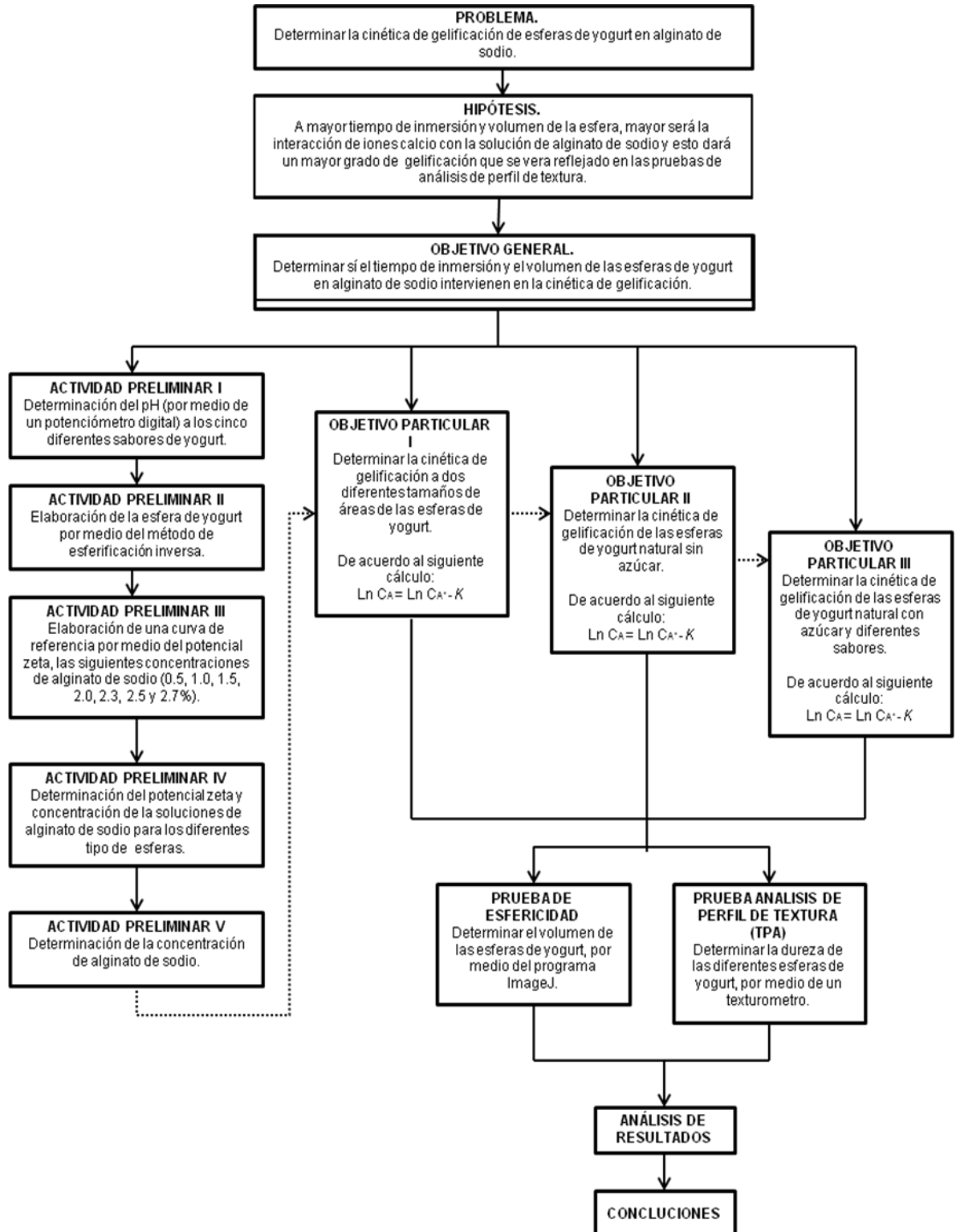
Dependiendo de la composición del sistema, mayor tiempo de inmersión y volumen, mayor será la interacción del yogurt con la solución de alginato de sodio y esto dará un mayor grado de gelificación que se verá reflejado en las pruebas de análisis de perfil de textura.

## 2.4 JUSTIFICACIÓN

La cocina molecular, es la aplicación de la ciencia a la industria de los alimentos, estudia la transformación físico-químicas que ocurren durante la evolución del alimento. A pesar que se modifican las características del producto (textura, forma, entre otros) el objetivo es preservar la pureza del mismo. Dentro de la formación de esferas se encuentra en método de esferificación inversa, es la gelificación controlada de un líquido, sumergido en un baño (Ferrán, 2008). La final de este trabajo es aplicar esta técnica en un sistema yogurt-alginato de sodio y así poder conocer el grado y la cinética de gelificación con respecto del volumen y el tiempo en el cual gelifica la esfera ya sea en su totalidad o parcialmente.

Hoy en día la innovación de nuevos productos avanza a gran velocidad, debido a la obligación por satisfacer las necesidades del consumidor, de ahí surgió el proceso de esferificación, ya que esta técnica aporta una nueva forma de ver los alimentos y solo es usada en la cocina molecular. Con lo cual se pretende que por medio de un Ingeniero en Alimentos pueda determinar la cinética de gelificación y así dar una respuesta a las características de la esfera que se utiliza en el área de la cocina comercial. Ofreciendo ventajas a la industria alimentaria como son: bajo costo y compatibilidad entre los ingredientes.

## 2.5 CUADRO METODOLÓGICO.



## 2.6 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.6.1 MATERIALES UTILIZADOS.

MATERIAL	MARCA	CARACTERISTICAS
Alginato de sodio	DANISCO	Grado alimenticio
Yogurt	ALPURA	Presentación de 150 ml Sabores: Natural con y sin azúcar, fresa, zarzamora y fresa-zarzamora El tipo de yogurt es perfumado.

### 2.6.2 MÉTODOS APLICADOS A LA ESFERA DE YOGURT.

#### 2.6.2.1 ACTIVIDAD PRELIMINAR II. DETERMINACIÓN DE pH.

Se determinó el pH de los cinco diferentes sabores de yogurt, por medio de un potenciómetro digital portátil, marca CONDUCTRONIC, modelo E1064.

#### *Procedimiento:*

- Se calibró el potenciómetro con agua destilada.
- Se tomó una porción de muestra de yogurt, se mezcló bien por medio de un agitador y se ajustó la temperatura a  $20 \pm 0.5$  °C.
- El electrodo se sumergió en la muestra de manera que cubra perfectamente. Se realizó la medición de pH. Por último se retiró el electrodo y se lavó con agua destilada.
- El valor de pH de la muestra se lee directamente en la escala del potenciómetro.

### **2.6.2.2 ACTIVIDAD PRELIMINAR III. MÉTODO DE ESFERIFICACIÓN INVERSA.**

El producto a gelificar es el que debe contener calcio y se deja sumergir en una solución de alginato de sodio a un tiempo determinado, después se realiza una inmersión de agua destilada, para eliminar el exceso de gel en la esfera y por último se deja en un rejilla con el fin de quitar el agua que se queda en ella (Foundueanu, y col., 1998).

#### *Procedimiento:*

- Se mezcló en una batidora de inmersión agua destilada y una concentración de 2.9%w de alginato de sodio, se disperso a una velocidad máxima de durante un tiempo. Se dejó en reposo la solución con el fin de eliminar las burbujas de aire.
- Después se controló el tamaño de la esfera, por medio de una jeringa se extrajo 1 ml de yogurt (área 1) y después se extrajo 1.5 ml yogurt (área 2), para cada de uno de los sabores.
- Se dejaron caer gotas de yogurt en la solución de alginato de sodio y con esto se estableció el primer tiempo de gelificación (8 min), a partir de este se determinaron los otros dos tiempos (10 y 16 min).
- Se retiró la esfera de yogurt de la solución de alginato de sodio y está se colocó en un rejilla, se lavó con agua destilada, por último se guardó en un envase hermético y se almaceno en refrigeración.
- Todo el procedimiento se realizó a temperatura ambiente (25°C).



La Figura 2.6.1, muestra el diagrama de proceso de gelificación de esferas de yogurt en alginato de sodio.

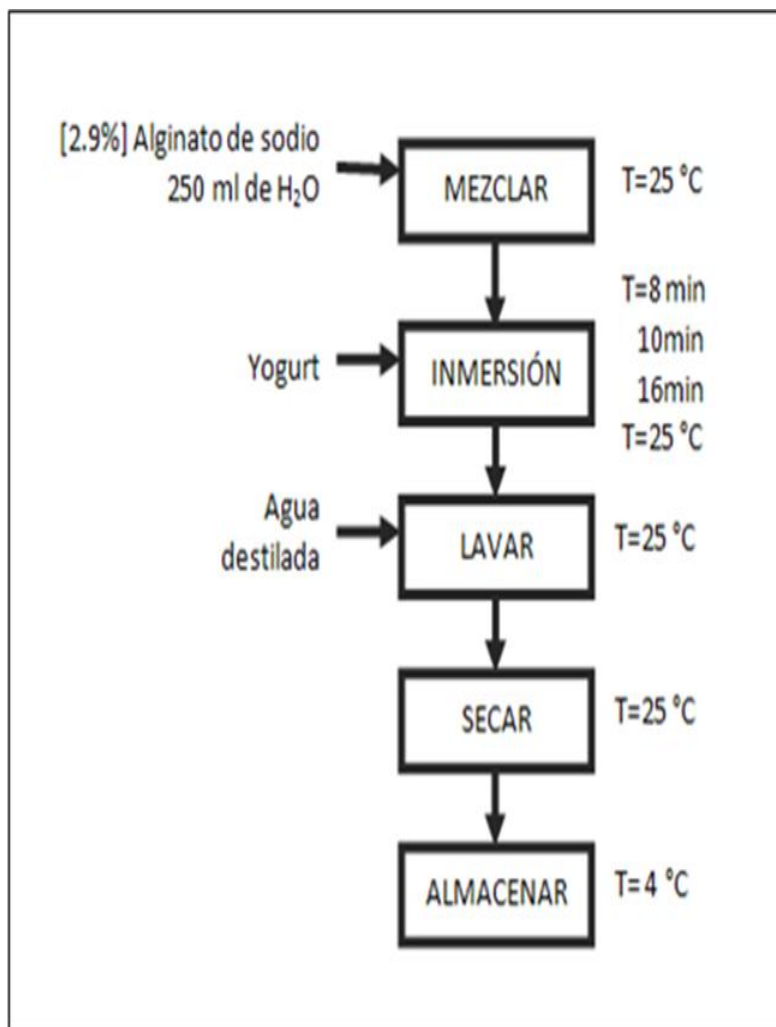


Figura 2.6.1. Diagrama de proceso de las esferas de yogurt.

### 2.6.2.3 MÉTODO POTENCIAL ZETA.

El potencial donde se une la capa difusa y la de Stern, se le conoce como potencial zeta (Figura 2.6.2), es una manera efectiva de controlar el comportamiento del coloide puesto que indica los cambios en el potencial de la superficie y en las fuerzas de repulsión entre los coloides.

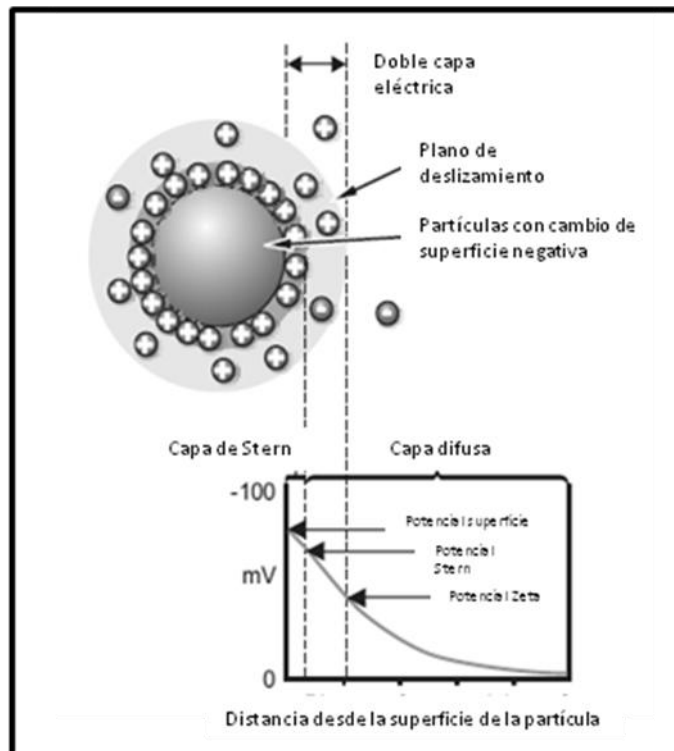


Figura 2.6.2. Descripción del potencial zeta (Fuente: Manual, Zetasizer Nano Series, 2010).

La magnitud del potencial zeta da una indicación de la estabilidad del potencial en el sistema coloidal. Un sistema coloidal es cuando se encuentran uno de los tres estados de la materia: gas, líquido y sólido, se dispersan uno con otros. Para este tipo de técnica se está interesado en dos estados de la materia: de un líquido disperso en un sólido y un líquido disperso en un líquido, es decir, una emulsión (Manual: Zetasizer Nano Series, 2010).

En la Figura 2.6.3 se muestra el equipo que se utilizó, el cual fue el ZetaSizer Nano Series, versión 6.02, con ello se determinaron las siguientes pruebas:

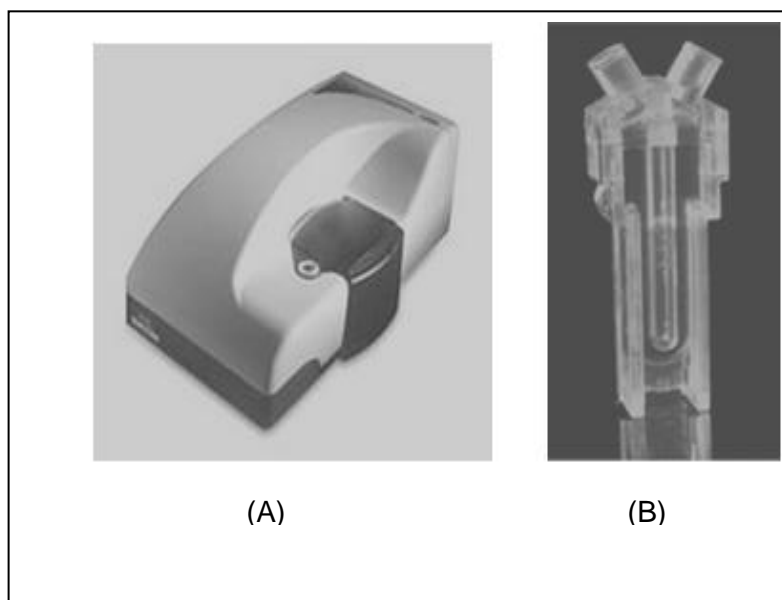


Figura 2.6.3. (A) Equipo ZetaSizer y (B) celda DTS 1060

*Procedimiento:*

a) ACTIVIDAD PRELIMINAR III. Curva Patrón.

- Se determinó el tipo de potencial zeta a siete concentraciones diferentes de alginato de sodio (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.3, 2.5 y 2.7%w).
- Por medio de una jeringa se colocó en la celda (DTS 1060 GREEN), 1 ml de alginato de sodio, de cada una de las diferentes concentraciones. Se realizaron tres repeticiones cada una con intervalos de cinco segundos y se obtuvo el promedio de los tres datos, con el cual se estableció el potencial zeta de la muestra.

- Los datos de potencial zeta fueron registrados en la computadora y graficados. Se efectuó sólo una réplica.
- b) ACTIVIDAD PRELIMINAR IV. Determinación del potencial zeta de las disoluciones de alginato de sodio
- En una disolución de alginato de sodio a una concentración de 2.9%, se sumergió la esfera de yogurt de diferentes sabores (natural con y sin azúcar, fresa, zarzamora y fresa-zarzamora), áreas y tiempos, a la solución restante es a la cual se le determino el potencial zeta.
- c) ACTIVIDAD PRELIMINAR V. Determinación de la concentración de alginato de sodio.
- Con el potencial zeta de las soluciones de alginato de sodio y la curva de referencias se determinarán las concentraciones de alginato. Y con esto se conoció la concentración de alginato que quedo de alginato de sodio (Harnsilawat, y col, 2006).

Los datos de las dos últimas actividades preliminares se registraron en la computadora y se tabularon. Se realizo solo una repetición por cada muestra. De cada parámetro se obtiene la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Todos los procedimientos se realizaron a temperatura ambiente (25 °C).

#### 2.6.2.4 MÉTODO CINÉTICA DE GELIFICACIÓN.

Con los datos de concentración de alginato de sodio, obtenidos por la curva de referencia del potencial zeta, se determino la cinética de gelificación de las esferas de yogurt, además se logró calcular el orden de reacción y la constante de velocidad de gelificación. Con esto se determino si afectan los parámetros de tiempo de gelificación y volumen de la esfera (Euston, y col., 2000). De acuerdo a la ecuación 28 antes descrita y se tiene lo siguiente:

$$\ln[A]_t = \ln[A]_0 - kt \quad (28)$$

$$\ln C_A - \ln C_{A^0} = -kt \quad (29)$$

$$\ln C_A = \ln C_{A^0} - kt \quad (30)$$

$$Y = b + mx$$

donde  $C_A$  es la concentración final de alginato de sodio,  $C_{A^0}$  es la es la concentración inicial de alginato de sodio,  $k$  es la constante de velocidad de reacción y  $t$  es el tiempo de gelificación. Por lo tanto se grafican los datos  $\ln C_A$  con respecto del tiempo y se observara si es una línea recta con pendiente negativa.

De acuerdo a los autores Euston, y col (2000), donde se menciona que la gelificación de alginato de sodio para esferas, es de primer orden, por lo cual se obtiene una grafica como se muestra en la Figura 2.6.5.

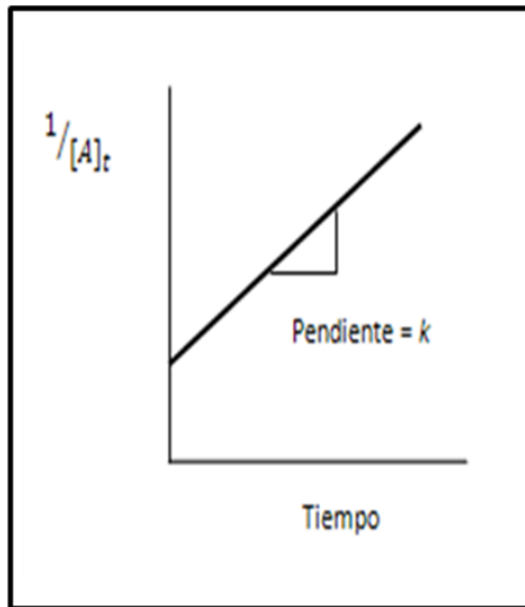


Figura 2.6.4. Grafica como se calcula el orden y la constante de velocidad de reacción para la esfera de alginato de sodio

En el caso de las graficas se determinarán otros dos tiempos de gelificación (12 y 14 min) con la finalidad de tener más puntos de relación con la recta y seá más exacta la determinación del orden de reacción y la constante de velocidad de gelificación

Los datos de tiempo de gelificación y logaritmo natural de concentración son registrados en la computadora y graficados. Se efectuo solo una repetición. De cada parámetro se obtine la media aritmética, la desviación estandar y el coeficiente de variación.

#### 2.6.2.4 MÉTODO ESFERICIDAD.

Es un método en el cual se tomaron varias fotografías de las diferentes esferas de yogurt (dependiendo del tiempo y área), después se importaron al programa *ImageJ*, donde se proyectan las tres áreas de ésta, calculando así su volumen y área real de la muestra (Nussinovitch y Gershon., 1996).

*Procedimiento:*

En la Figura 2.6.6, se muestra el programa Imagen J que se utilizó para el método de esfericidad.

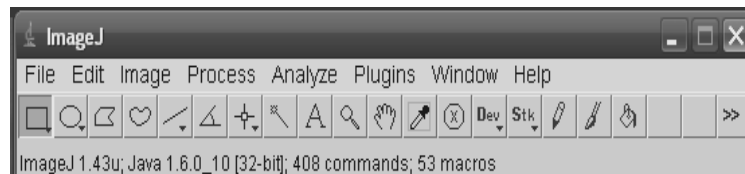


Figura 2.6.5. Software Imagen J.

- Se elaboró un tripié, con una altura de 15 cm, en la parte de arriba se colocó una base cuadra de 4.0 por 4.0 cm, en la cual se situó la esfera.
- Durante la experimentación se utilizó una cámara digital PANASONIC, de 8 MP, modelo DMC-LS80PL-P. la cual se colocó en un tripié a la misma altura que el utilizado para la esfera.
- La distancia entre el tripié de la esfera y el de la cámara fue de 10 cm, de acuerdo a lo planteado en el manual Image J
- El lugar donde se tomaron las fotografías tenía solo luz natural y no se utilizó el flash de la cámara.

- El programa Imagen J se programo de acuerdo a la escala siguiente escala, unidad de longitud en centímetros y una distancia en pixeles de 173.67; las fotografías de la esfera se exportaron al programa y se realizo la medición.
- En la figura 2.6.7 se muestra un esquema de cómo se tomaron las fotografías de la esfera de yogurt de alginato de sodio.

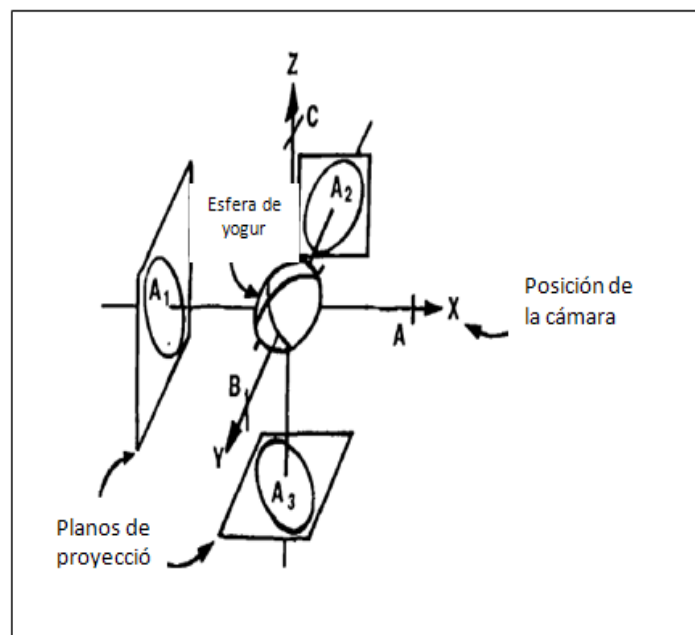


Figura 2.6.6. Esquema en el cual se tomarón las fotografías de las esferas de yogurt (Fuente: Nossinovich y Gershon, 1996).

- Del programa Image J se obtuvieron los siguientes datos:

Área: Es calibrada en unidades, como milímetros cuadrados, la escala se utiliza para calibrar espacial de la imagen.

Perímetro: La longitud de la frontera fuera de la selección.



Circ. (Circularidad): El área de  $4\pi$  / perímetro  $^2$ . Un valor de 1,0 indica un círculo perfecto. Como el valor de los enfoques 0,0, que indica una forma cada vez más alargada. Los valores no pueden ser validados para las partículas muy pequeñas.

El volumen de la esfera, se mide de acuerdo a la siguiente ecuación:  $\frac{4}{3}\pi r^3$

Los datos de tiempo de gelificación y volumen de la esfera son registrados en la computadora y graficados. Se efectuó solo una repetición. De cada parámetro se obtiene la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Durante todo el procedimiento se realizó a temperatura ambiente.

#### **2.6.2.5 MÉTODO ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA (TPA).**

Se realizaron pruebas texturales a las esferas de yogurt de diferente tamaño y tiempo, por medio del equipo *Texture Exploret 32*, en el cual se utilizó un sensor de disco. A las muestras se les evaluó el parámetro de dureza, que es la fuerza máxima obtenida después de la primera compresión (Rosenthal, 2001; Roudot, 2004).

*Procedimiento:*

- La prueba de dureza fue efectuada por medio de compresión. Se utilizó un texturometro modelo TA.XT. plus, con un sensor de carga de SMS P/6. En los experimentos se impusieron niveles de fuerza de 500 g, con una velocidad de prueba de 10 s. Para esta prueba se utilizó una placa de acero inoxidable de 7.4 cm de diámetro y una fuerza de 5.0 g para que el dispositivo determinara el contacto con la muestra. Se realizaron dos ciclos de compresión. Durante la prueba, se tuvo una temperatura de 25 °C.

Los datos de fuerza, dureza y tiempo son registrados en la computadora y graficados. Se efectuó una réplica. De cada parámetro se obtiene la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

- En la Figura 2.7.1 muestra el equipo que se utilizó: Texture Exploret 32, modelo TA.XT.plus.



Figura 2.6.7: Equipo texturometro TA.XT.plus.

## CAPÍTULO 3

### 3.1 ACTIVIDAD PRELIMINAR I: VALORES DE pH

En el Cuadro 3.1.1 se muestran los diferentes valores de pH para las muestras de yogurt (natural sin y con azúcar, fresa, zarzamora y fresa-zarzamora), la finalidad de determinar este parámetro es de aplicar correctamente el método de esferificación inversa, por lo tanto al comparar los datos teóricos con los experimentales se tiene que no existe cambios significativos entre ellos, por lo cual se logro utilizar la técnica antes descrita.

Cuadro 3.1.1. Valores de pH, de los diferentes sabores de yogurt.

<b>Yogurt</b>	<b>pH Teórico</b> (Wastra, 2001)	<b>pH</b> <b>Experimental</b>
Natural sin azúcar	4	4.5
Natural con azúcar	4	4.5
Fresa	5.5	4.4
Zarzamora	3.4	3
Fresa Zarzamora	S/R	4

### 3.2 ACTIVIDAD PRELIMINAR II: DESARROLLO DEL MÉTODO DE ESFERIFICACIÓN INVERSA.

Antes de explicar como interactúan el yogurt y el alginato de sodio se ha de estudiar la estructura en que se encuentra el alginato puesto que se trabaja en forma de esferas.

Como se ha explicado en el apartado del alginato y se observa en la Figura 3.2.1, sólo los bloques G son los que reaccionan con el calcio para formar la estructura dimérica en forma de bucle:

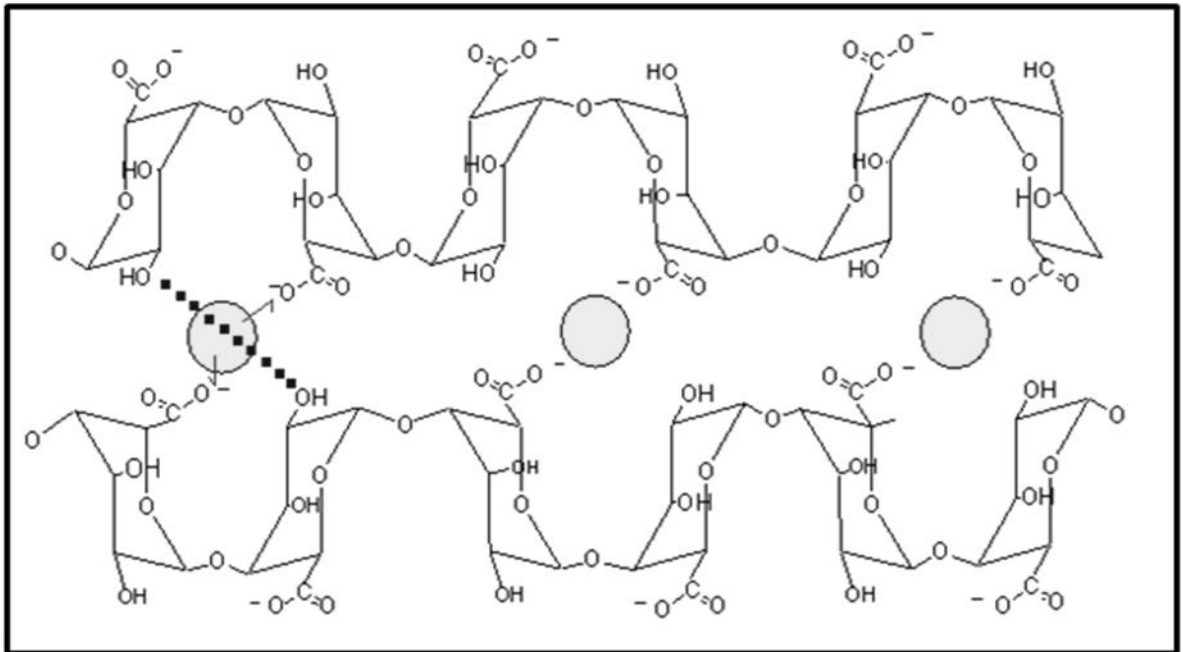





Figura 3.2.1. Formación de las esferas yogurt con alginato de sodio (Fuente: Seira, 2008)

Esta estructura se produce por reacción del  $\text{Ca}^{+2}$  con los grupos carboxilos del alginato, al ser el calcio un ión divalente necesita dos cargas negativas, por lo que el calcio se une a los grupos carboxílicos mediante enlace iónico y es por eso que se unen las dos cadenas poliméricas. Por otro lado existen otras fuerzas electrostáticas que surgen entre los grupos hidroxilos de la misma molécula de alginato que ayudan a conseguir una buena estabilidad en la estructura (Seira, 2008).

A este proceso en que el calcio se une al polímero se le conoce como encapsulamiento y con él se forman las esferas de alginato.

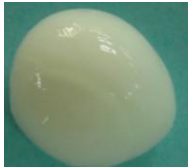
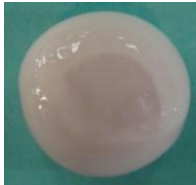
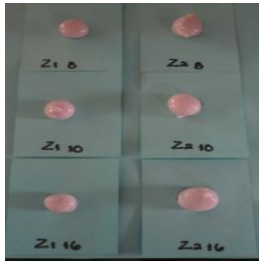
En el Cuadro 3.2.1 se muestra el desarrollo del método de esferificación inversa, durante la elaboración de las esferas de yogurt de alginato de sodio, se utilizaron diferentes concentraciones, hasta obtener la concentración en la cual la esfera se encuentra estable en un tiempo de inmersión establecido.

Cuadro 3.2.1 Desarrollo del método de esferificación inversa de yogurt.

	<p>Primer esfera de yogurt natural sin azúcar elaborada a una concentración de 0.5% w de alginato de sodio y con un tiempo de inmersión de 4 min.</p>
	<p>Esfera de yogurt natural con azúcar, elaborada a una concentración de 2.0% w de alginato de sodio y un tiempo de inmersión de 6 min.</p>
	<p>Esfera de yogurt natural sin azúcar, rellena de rompopé a una concentración de 2.0% w de alginato de sodio y un tiempo de inmersión de 6 min. Esta esfera no se llevo a cabo debido a que el sabor no es agradable.</p>

En el Cuadro 3.1.2 se muestran las esferas de yogurt de alginato de sodio, con la concentración establecida y el tiempo de gelificación, así como el tamaño que se determino.

Cuadro 3.1.2. Esferas de yogurt de alginato de sodio.

	<p>Esfera de yogurt natural sin azúcar a una concentración de 2.9% w, con un tiempo de inmersión de 8min y con un tamaño de 1, el cual fue controlado con una jeringa (1.0 ml).</p>
	<p>Esfera de yogurt sabor fresa, con concentración de 2.9% w, con un tiempo de inmersión de 10min y con un tamaño de 2, el cual fue controlado con una jeringa (1.5 ml).</p>
	<p>Imagen comparativa de los dos diferentes tamaños de esferas sabor zarzamora (1 y 2) a los 3 diferentes tiempos de gelificación (8, 10 y 16 min).</p>

### 3.3 POTENCIAL ZETA.

a) Actividad Preliminar III: Curva de referencia.

En la Figura 3.3.1 se muestra la curva de referencia obtenida por medio del estudio de potencial zeta a las diferentes concentraciones.

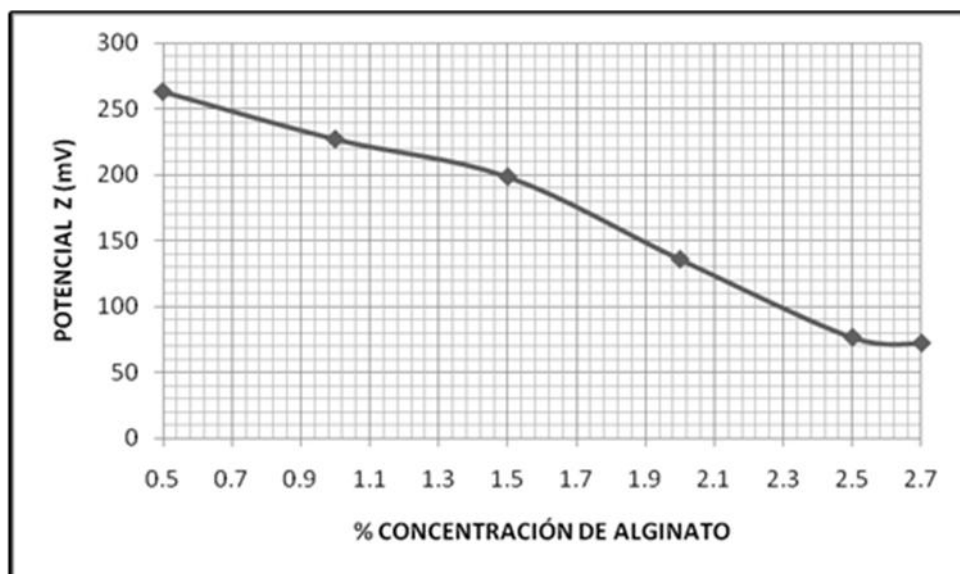


Figura 3.3.1. Curva de referencia que representa la concentración de cada muestra con respecto al potencial zeta.

b) Actividad Preliminar IV: Determinación del potencial Z de las soluciones de alginato de sodio.

En los Cuadros 3.3.1 y 3.3.2, se muestra el potencial zeta absoluto de las diferentes disoluciones de alginato de sodio, a los diferentes tiempos de gelificación (8, 10, 12, 14 y 16 min) y dos áreas (1 y 2), por lo que presentan valores mayores a +30 mV, por lo tanto los valores que se presentan se consideran soluciones estables.

De acuerdo al Manual: ZetaSizer Nano Series (2010), menciona que las partículas en suspensión tienen un gran potencial zeta negativo o positivo, por lo que se llega a repeler entre ellas, por lo que no llegan a flocular. Sin embargo, cuando las partículas tienen bajos valores de potencial zeta, entonces no existe fuerza para que las partículas se unan y floculen. La línea divisoria general entre suspensiones estables e inestables se da en el intervalo de +30 mV a -30 mV, con un potencial

zeta más positivo (mayor a más 30 mV) o más negativo (menores a – 30 mV) se consideran estables.

Cuadro 3.3.1. Valores absolutos de potencial zeta para las soluciones de alginato de sodio, con respecto al área 1.

Tiempo de gelificación (min)	Yogurt natural sin azúcar (mV) D1	Yogurt natural con azúcar (mV) B1	Yogurt sabor fresa (mV) F1	Yogurt sabor zarzamora (mV) Z1	Yogurt sabor fresa-zarzamora (mV) FZ1
8	70	72	160	82	125
10	82	74	172	185	150
12	110	75	187	215	174
14	130	80	201	240	188
16	160	82	205	253	206

Cuadro 3.3.2. Valores absolutos de potencial zeta para las soluciones de alginato de sodio, con respecto al área 2.

Tiempo de gelificación (min)	Yogurt natural sin azúcar (mV) D2	Yogurt natural con azúcar (mV) B2	Yogurt sabor fresa (mV) F2	Yogurt sabor zarzamora (mV) Z2	Yogurt sabor fresa-zarzamora (mV) FZ2
8	110	150	156	110	126
10	145	155	201	169	151
12	183	157	215	209	161
14	210	158	232	222	172
16	220	160	250	260	198



c) ACTIVIDAD PREIMINAR V. Concentración de alginato de sodio

En los Cuadros 3.3.3 y 3.3.4, se muestran las concentraciones de alginato de sodio con respecto a las dos diferentes áreas (1 y 2), a los diferentes tiempos de gelificación. En el cual se observa que entre mayor es el tiempo de inmersión de la esfera, menor es la concentración de alginato de sodio. De acuerdo a lo que menciona el autor Seira (2008), cuando la velocidad es controlada por el transporte entre partículas la relación entre concentración y velocidad de reacción no será directamente proporcional. Por lo tanto, el efecto de la concentración del soluto sobre la velocidad en que tiene lugar la adsorción es también un factor importante ya que este se vera reflejado en la cinética degelificación.

Cuadro 3.3.3. Concentración de alginato de sodio con respecto al área 1.

Tiempo de gelificación (min)	Yogurt natural sin azúcar D1	Yogurt natural con azúcar B1	Yogurt sabor fresa F1	Yogurt sabor zarzamora Z1	Yogurt sabor fresa-zarzamora FZ1
8	2.6	2.62	1.8	2.4	2.1
10	2.4	2.57	1.7	1.64	1.9
12	2.2	2.53	1.6	1.2	1.73
14	2.05	2.47	1.5	0.8	1.61
16	1.8	2.42	1.45	0.6	1.47

Cuadro 3.3.4. Concentración de alginato de sodio con respecto al área 2.

Tiempo de gelificación (min)	Yogurt natural sin azúcar D1	Yogurt natural con azúcar B1	Yogurt sabor fresa F1	Yogurt sabor zarzamora Z1	Yogurt sabor fresa-zarzamora FZ1
8	2.2	1.9	1.9	2.2	2.12
10	1.9	1.87	1.5	1.76	1.92
12	1.6	1.85	1.2	1.34	1.82
14	1.4	1.83	0.9	1.03	1.7
16	1.1	1.8	0.65	0.8	1.55

### 3.4 ANÁLISIS DE CINÉTICA DE GELIFICACIÓN.

El alginato de sodio es un polielectrolito que consiste en enlaces  $\beta$  (1, 4) unido a interacciones de ácido D-manurónico y algunos de ácido glucorónico (Khairou, y col. 2002).

Con los datos que se muestran en el ANEXO 1 se construyó la gráfica,  $\ln C$  en función del tiempo, ésta debe ser una línea recta si la reacción es de primer orden en la concentración final de alginato de sodio  $[A]$ . Ahora si los puntos experimentales yacen sobre una línea recta, entonces se puede decir que se trata de una reacción de primer orden. La pendiente de esta recta es igual a  $-K$  (Castellan, 1998).

De acuerdo a lo mencionado por Blandino y col (1999), dice que la resistencia a la difusión de los iones calcio interactúa durante la formación del gel, por lo que se tiene una reacción de primer orden.

Por lo que se tiene una cinética de reacción de primer orden en el sistema yogurt-alginato de sodio. Además por tratarse de una reacción heterogénea, ésta velocidad también dependerá del área de la superficie que esta expuesta en la mezcla de reacción (Castellan, 1998).

### 3.4.1 YOGURT NATURAL SIN AZÚCAR.

La adsorción es un fenómeno superficial, por lo que, el grado de adsorción es proporcional al área superficial. El área superficial se define como la proporción de área total que está disponible en la adsorción (Seira, 2008).

En la Figura 3.4.1 se muestra el valor de la constante de velocidad de gelificación del yogurt natural sin azúcar, donde se presenta el factor de área superficial, por lo que se exhibe un comportamiento directamente proporcional. La muestra presenta una media aritmética con respecto a las dos diferentes áreas y tiempo de inmersión, fue de 0.06465. Lo que quiere decir que a mayor área de la esfera habrá mayor velocidad de adsorción y difusión entre el sistema yogurt-alginato de sodio.

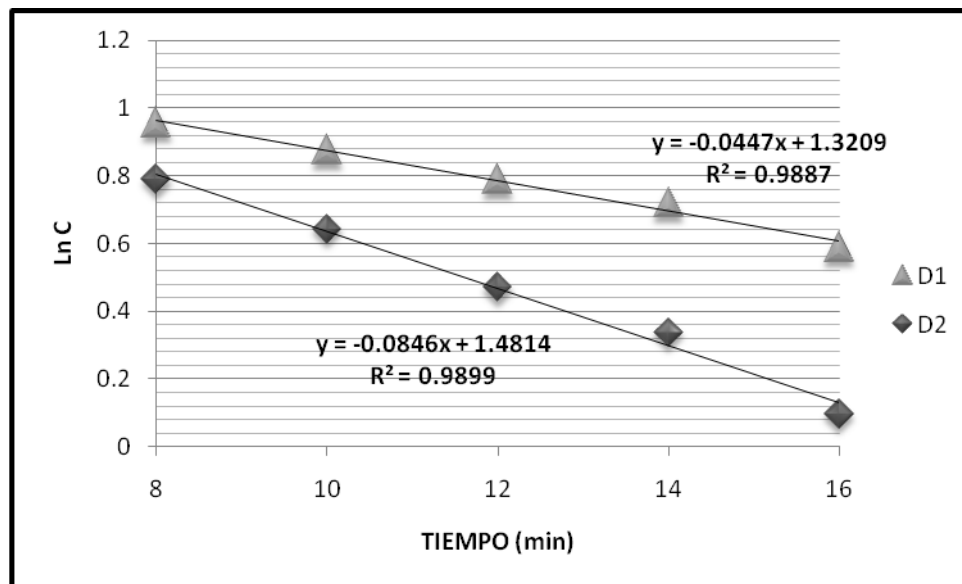


Figura 3.4.1. Constante de velocidad de gelificación del yogurt natural sin azúcar.

### **3.4.2 YOGURTA NATURAL CON AZÚCAR Y YOGURT CON SABOR A FRESA, ZARZAMORA Y FRESA-ZARZAMORA.**

El grado de una reacción superficial varía con el área superficial disponible, la velocidad de adsorción tendría que evidenciar un aumento gradual en función de la inversa del diámetro de las partículas adsorbentes. Para que la adsorción tenga lugar, es preciso romper una especie de posible enlace entre el soluto y el disolvente. Cuanto más grande es la solubilidad más fuerte es el enlace soluto-disolvente y menor es el grado de adsorción (Seira, 2008).

Los alimentos suelen contener grandes cantidades de azúcar, que, además de aportar sabor, tienen importantes repercusiones en el producto. El azúcar tiene dos efectos: 1) actúa como plastificante para permitir una mayor separación de las cadenas poliméricas y 2) que compite el polímero con el agua, lo que reduce la solubilidad de éste (Glicksman, 1969).

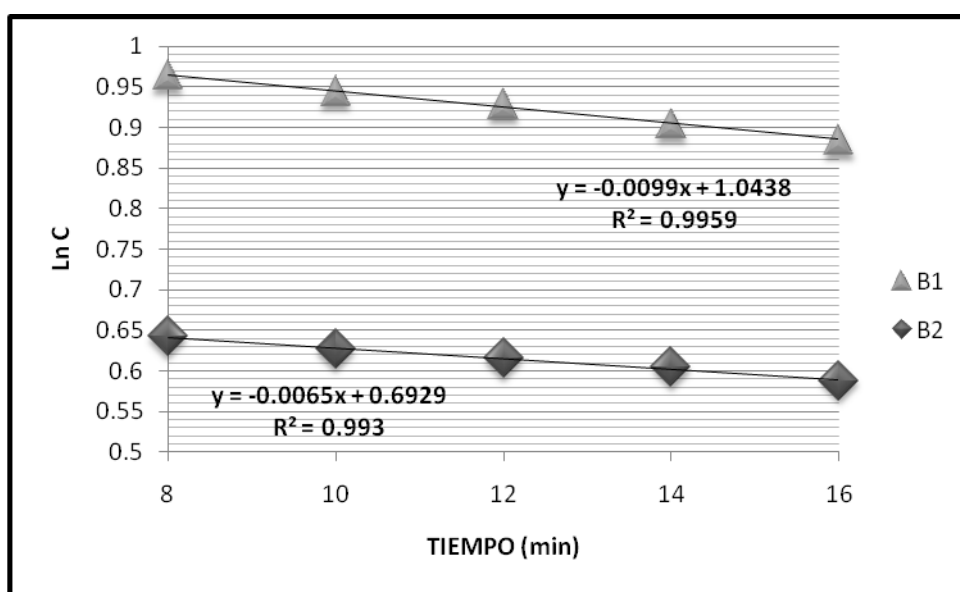
La Figura 3.4.2 (A-D) muestra el comportamiento de la constante de velocidad de gelificación para el yogurt natural con azúcar y el yogurt con sabor a: fresa, zarzamora y fresa-zarzamora.

- En la muestra de yogurt sabor a fresa son tres los factores que intervienen en ésta reacción: área superficial, contenido de azúcar y contenido de fruta; por lo que presenta un comportamiento directamente proporcional, esto quiere decir que a mayor área y tiempo de inmersión existe mayor adsorción entre el yogurt y el agente gelificante. La media aritmética de la cinética de gelificación es de 0.08035, la cual presenta una mayor difusión interna que va de la superficie hasta el centro activo.

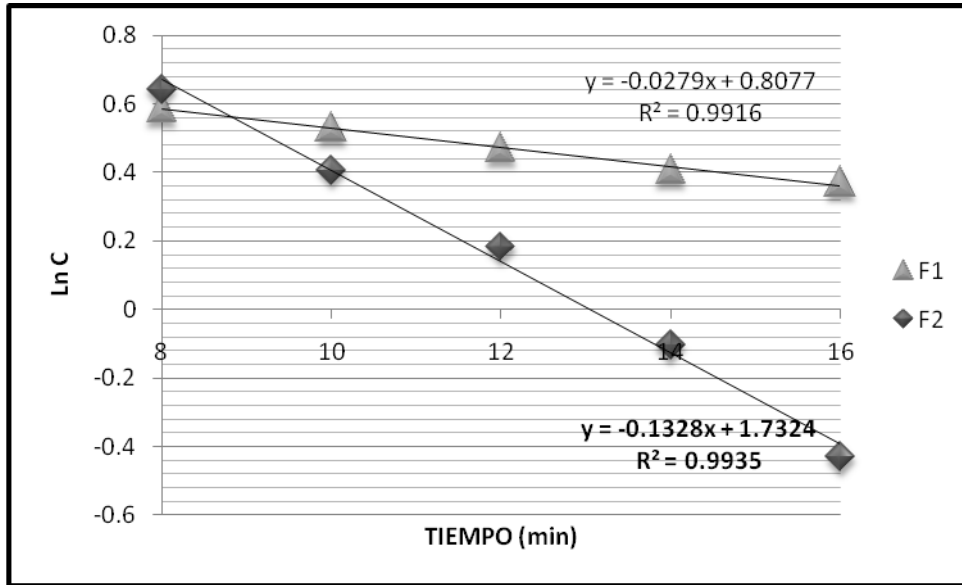
- Para las muestras de yogurt natural con azúcar, zarzamora y fresa-zarzamora, las cuales presentan un factor de adsorción que depende de la naturaleza del producto, debido al contenido de azúcar y fruta de éste. Esto quiere decir que tiene una conducta inversamente proporcional, por lo que a mayor área de la esfera, menor es el grado de adsorción entre el sistema yogurt-alginato de sodio.

Con respecto a las dos diferentes áreas, se obtuvo la media aritmética de cada una de las constantes de velocidad de gelificación y se tiene lo siguiente:

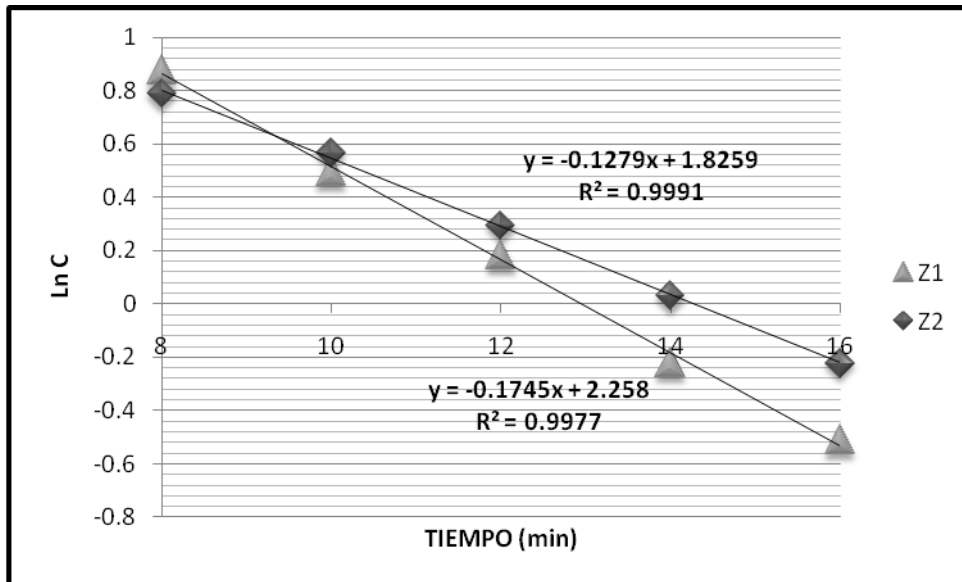
El yogurt natural con azúcar presentó una constante de 0.0082, esto se debe a que el contenido de azúcar influye en el área y la velocidad de formación de la esfera, teniendo un menor grado de adsorción. Para el yogurt con sabor a zarzamora se presenta un valor de 0.1512, por lo que la velocidad de reacción y la difusividad externa es más rápida durante la interacción del sistema yogurt-alginato de sodio. Por último el yogurt con sabor a fresa-zarzamora se tiene una constante de gelificación de 0.04065, esto quiere decir que se llega de difundir las moléculas del soluto dentro del sistema dispersante.



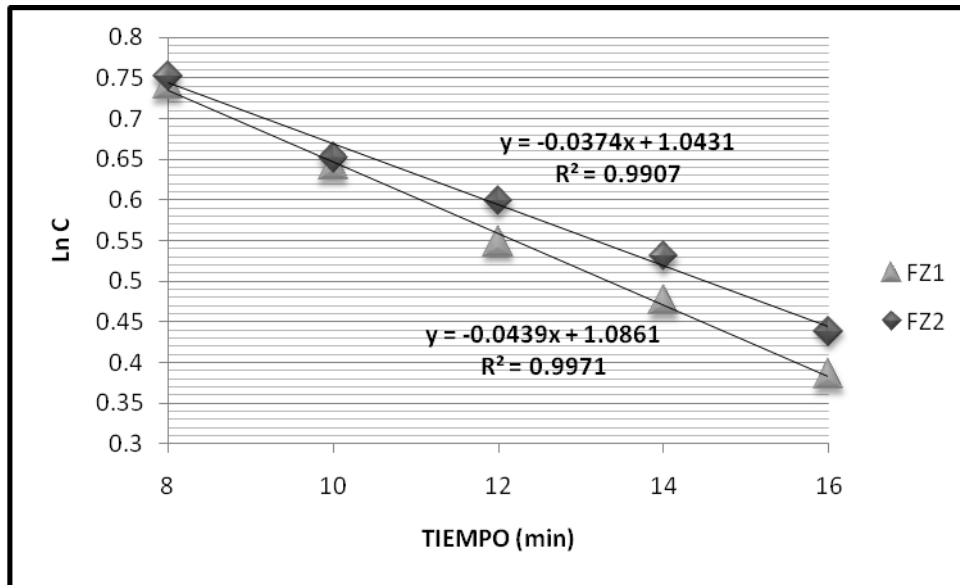
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 3.4.2. Constante de velocidad de gelificación de las muestras: A) yogurt natural con azúcar, B) yogurt sabor a fresa, C) yogurt con sabor a zarzamora y D) yogurt sabor a fresa-zarzamora.

### 3.5 ANÁLISIS DE ESFERICIDAD.

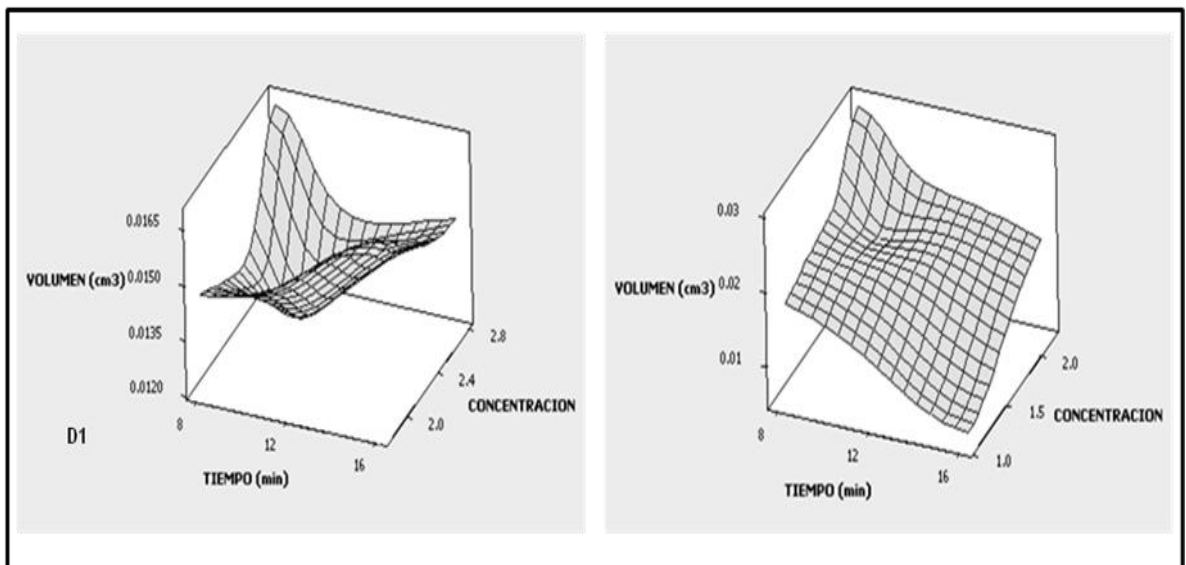
Al incrementar la concentración de alginato de sodio el volumen de la membrana aumenta en un cierto tiempo de gelificación. Este efecto se debe al elevado número de moléculas del polímero por unidad de volumen y al incremento de enlaces de iones calcio. Esto da como resultado un mayor volumen en la esfera (Blandino, y col., 1999).

Se llama esfera al diámetro o diámetro medio de antelación. El método común de esferificación incluye la gelificación controlada de macromoléculas con cationes divalentes y polivalentes (Nossinovich y Gershon, 1996).

Este análisis tiene como objetivo determinar la circunferencia y el volumen con respecto del tiempo de gelificación de las esferas de yogurt de alginato de sodio, utilizando el software ImageJ.

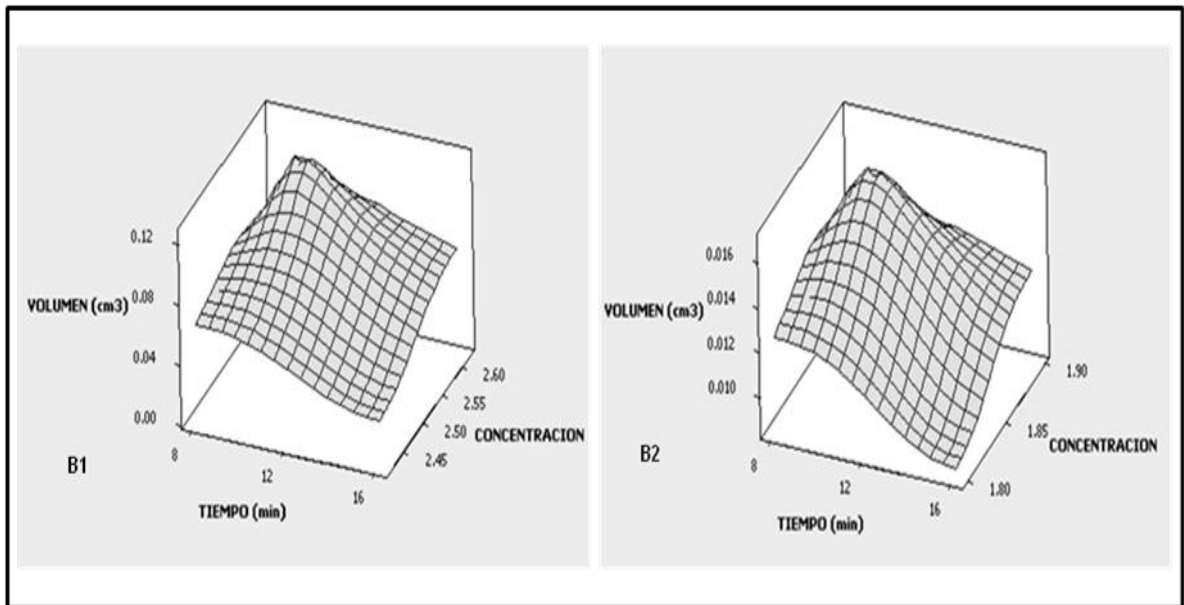
### 3.5.1 YOGURT NATURAL CON Y SIN AZÚCAR Y YOGURT CON SABOR: FRESA Y ZARZAMORA.

La figura 3.5.1 (A-D) se observa que conforme aumente el tiempo de gelificación, aumenta el volumen de la esfera por lo que se tiene un comportamiento directamente proporcional. En el caso de la circunferencia se tiene que para el yogurt sin y con azúcar, y sabores: fresa y zarzamora; es de 0.9, con la excepción del yogurt sabor fresa con un área 2, tiene un valor de 1.0 esto quiere decir que cumple con los parámetros de una esfera.

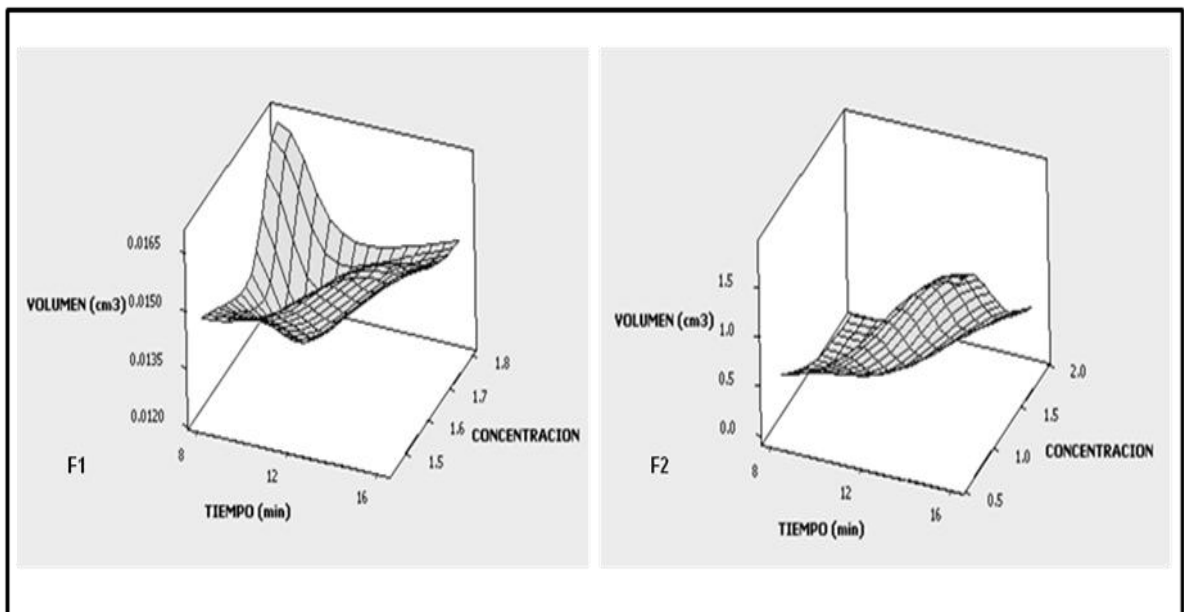


(A)

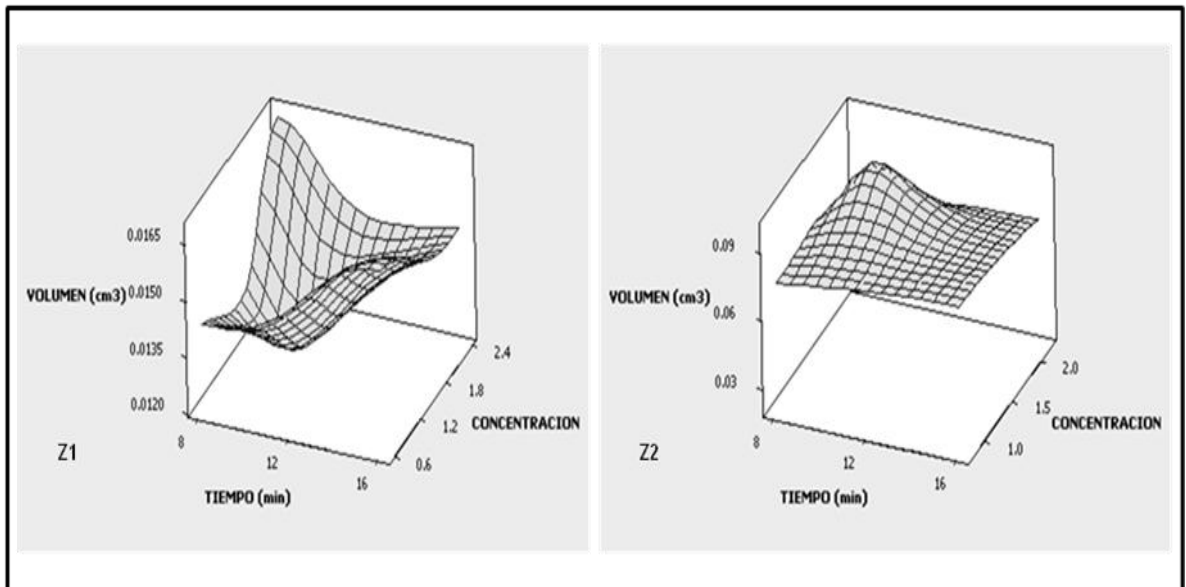




(B)



(C)



(D)

Figura 3.5.1. Gráfica que representa el tiempo de gelificación con respecto del volumen y concentración de cada muestra, para el: A) yogurt natural sin azúcar, B) yogurt natural con azúcar, C) yogurt sabor fresa y D) yogurt sabor zarzamora.

### 3.5.2 YOGURT SABOR FRESA-ZARZAMORA.

En la Figura 3.5.2 se muestra el volumen de la esfera de yogurt fresa-zarzamora, la cual presenta un comportamiento inversamente proporcional, lo que quiere decir que a mayor tiempo de gelificación menor volumen de la esfera. Esto se debe al contenido de yogurt, ya que las moléculas impiden la formación de la esfera con la disolución de alginato de sodio. La circularidad de estas muestras fue de 0.9.

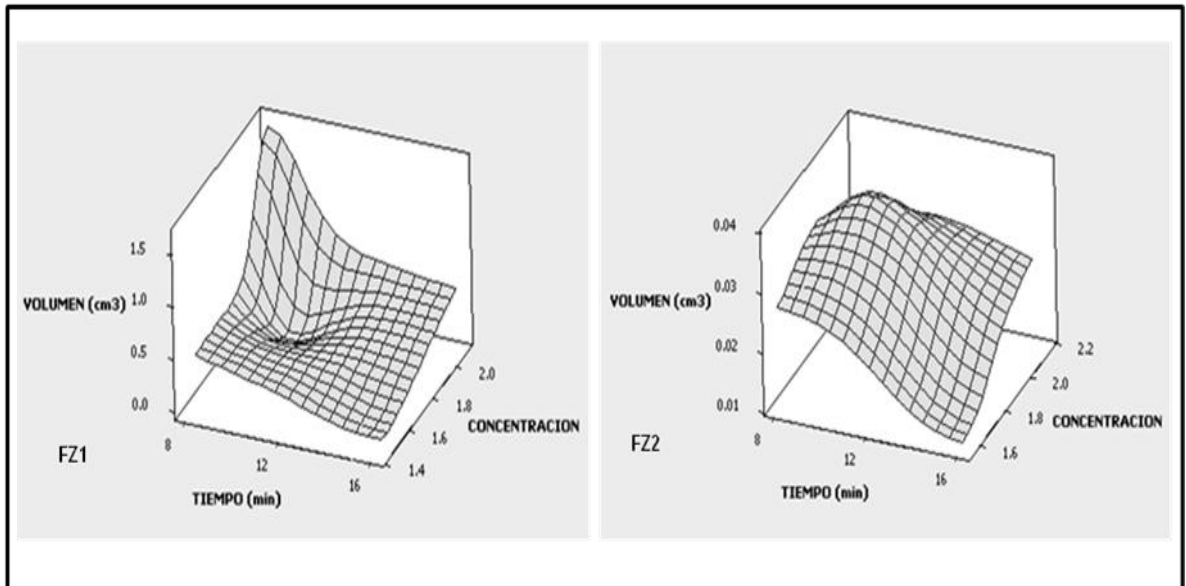


Figura 3.5.2. Gráfica que representa el tiempo de gelificación con respecto del, volumen y la concentración de la muestra, para el yogurt sabor fresa-zarzamora.

### 3.6 ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA

La cinética de gelificación con una reacción de primer orden se ve reflejada con frecuencia en la textura de la muestra. Los cambios de textura en los alimentos son resultado de muchas modificaciones moleculares en los componentes de la pared celular (Van Boekel, 2009).

La dureza es el máximo de fuerza que tiene lugar en cualquier tiempo durante el primer ciclo de compresión, esta relacionado con la fuerza de ruptura del material (Rosenthal, 2001).

El comportamiento de la fractura y la obtención de geles de alimentos es una marca importante en la calidad, que afecta en aspectos tales como: 1) propiedades de uso: facilidad de corte y difusión y 2) manejo de propiedades de almacenamiento (Dickinson, 1991)

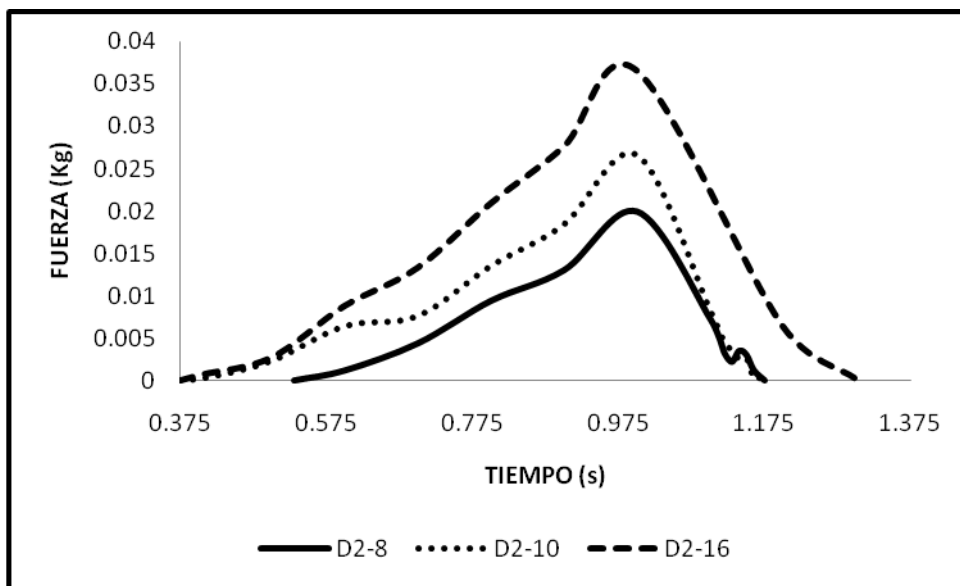
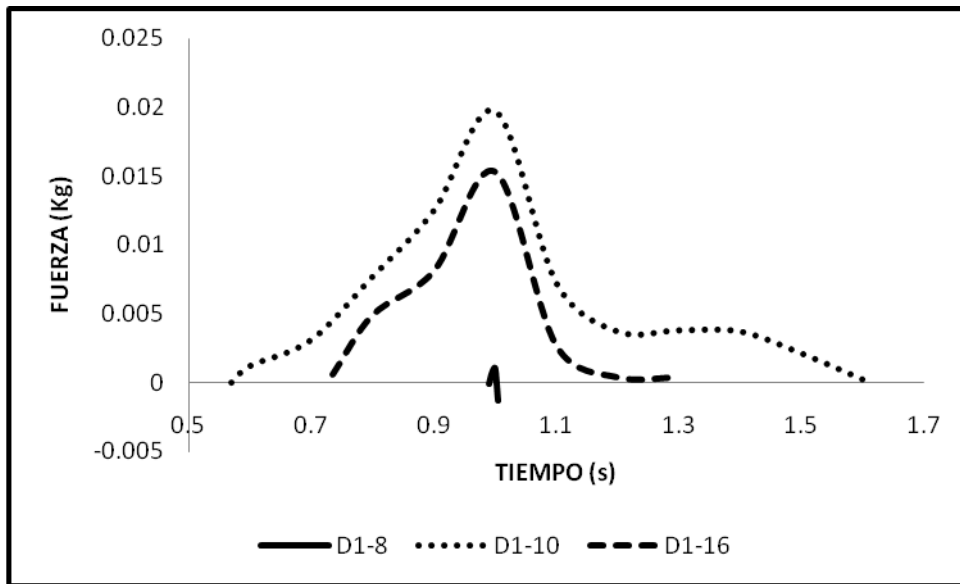
El tamaño tiene un efecto importante sobre la fractura. Es un objeto grande existe mayor volumen relativo de área de grieta en el cual se almacena el exceso de energía de deformación (Rosenthal, 2001).

### **3.6.1 YOGURT NATURAL SIN AZÚCAR, YOGURT CON SABOR: FRESA Y ZARZAMORA.**

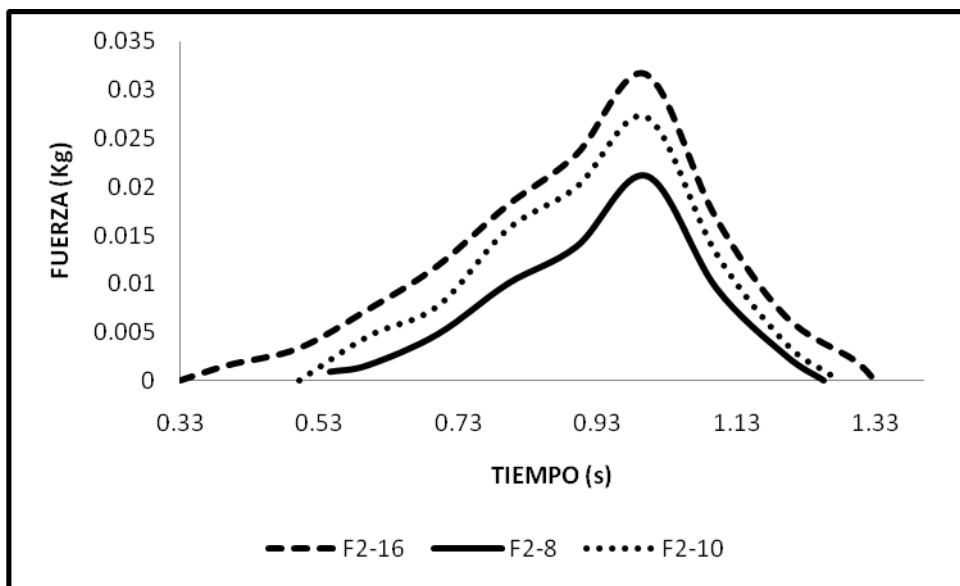
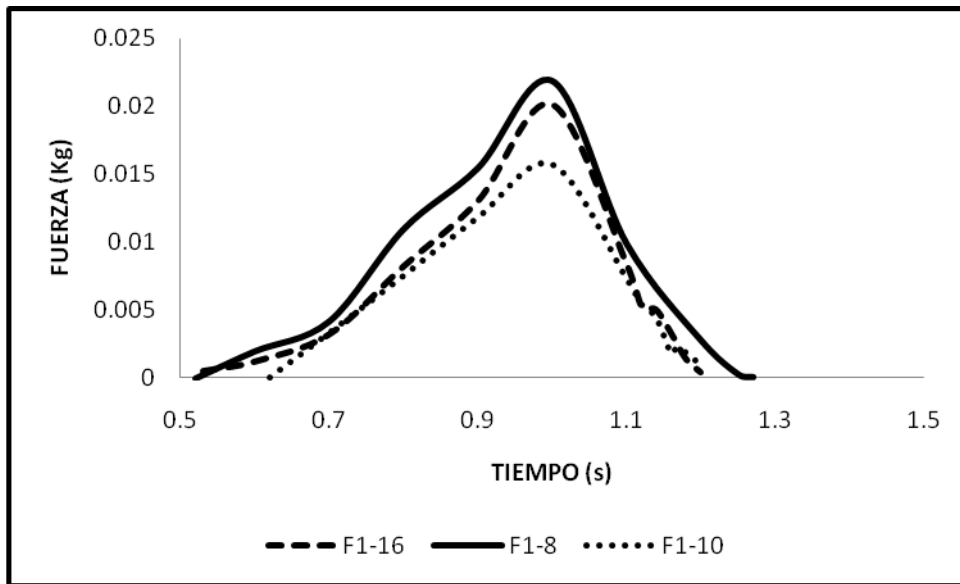
En la Figura 3.6.1 (A-C) se muestra la dureza (característica textural), que tuvo lugar en un cierto tiempo, durante el primer ciclo de compresión, con respecto de las esferas de yogurt natural sin azúcar, yogurt con sabor a fresa y a zarzamora. Los cuales presentaron un comportamiento directamente proporcional, conforme aumenta el tiempo de gelificación y el tamaño de la esfera, aumenta la dureza del producto, provocando un mayor esfuerzo para lograr que se llegue a fracturar ésta.

Para el caso de estas pruebas, se aplica la teoría de la elasticidad de un gel, que predice el endurecimiento por deformación de los segmentos de la cadena entrecruzada con distancias más largas y el movimiento de moléculas relativos con respecto de otros (Mancini, y *col.*, 1999).

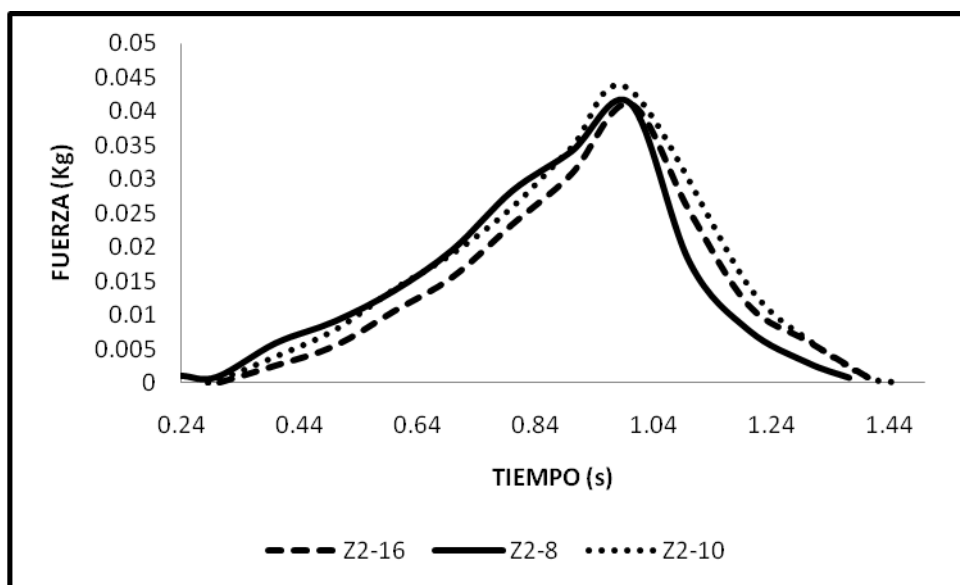
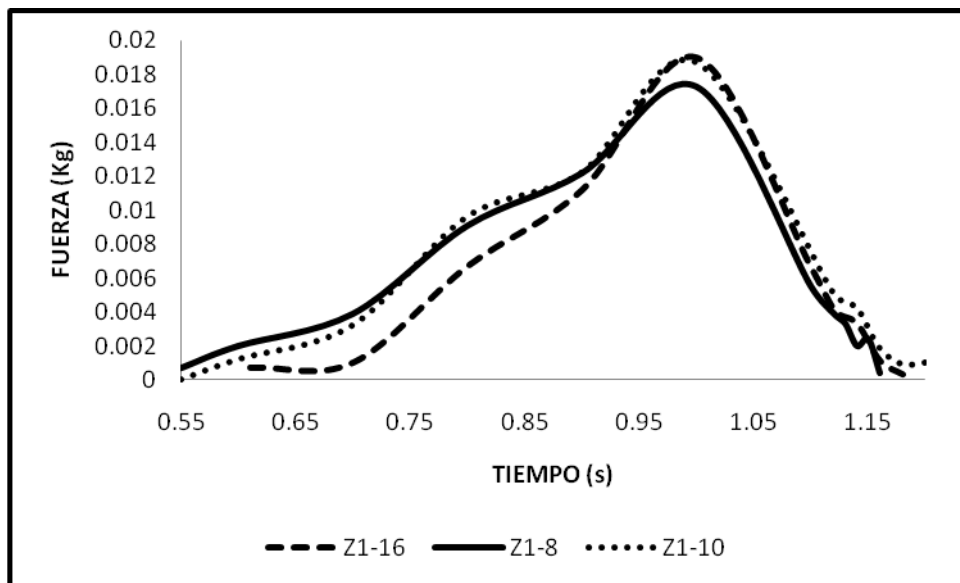
Para la muestra de yogurt natural sin azúcar (B1-8), presento fermentación, de acuerdo con Mancini y *col.*, (1999) en grandes moléculas que contienen aire (es decir las formadas durante la gelificación) pueden colapsar o fracturar, lo que limita la resistencia mecánica de la estructura.



(A)



(B)



(c)

Figura 3.6.1. Gráficas de análisis de perfil de textura que representa la fuerza aplicada a la esfera con respecto del tiempo de gelificación, a los dos diferentes áreas, para las muestras: A) yogurt natura sin azúcar, B) yogurt sabor fresa y C) yogurt sabor zarzamora.

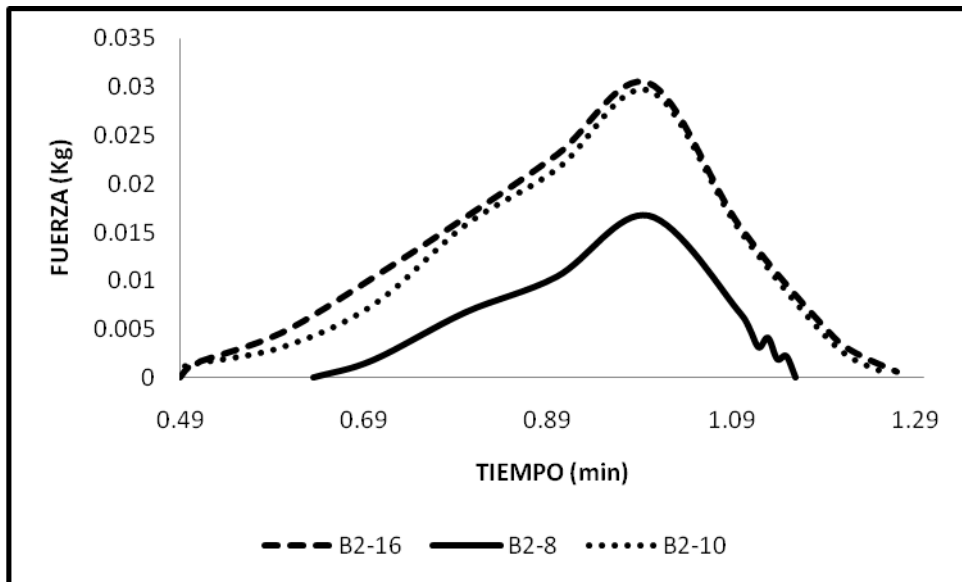
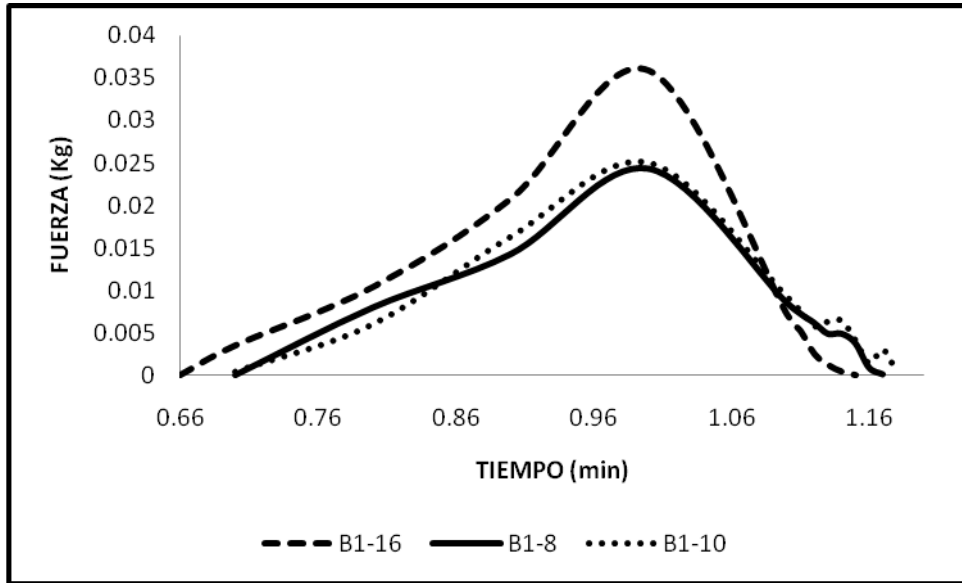
### **3.6.2 YOGURT NATURAL CON AZÚCAR Y YOGURT CON SABOR: FRESA-ZARZAMORA.**

En la Figura 3.6.2 (A-B) se presentan las pruebas de yogurt natural sin azúcar y yogurt con sabor a fresa-zarzamora, en las cuales se muestra la característica textural de dureza, en las pruebas, la forma general de las curvas se caracterizó por una concavidad hacia arriba. En este caso el factor que influyó en las muestras fue el contenido de azúcar y la mezcla de frutas, lo que hace que el comportamiento de ambos sea inversamente proporcional, ya que a mayor tiempo de gelificación menor es el grado de dureza.

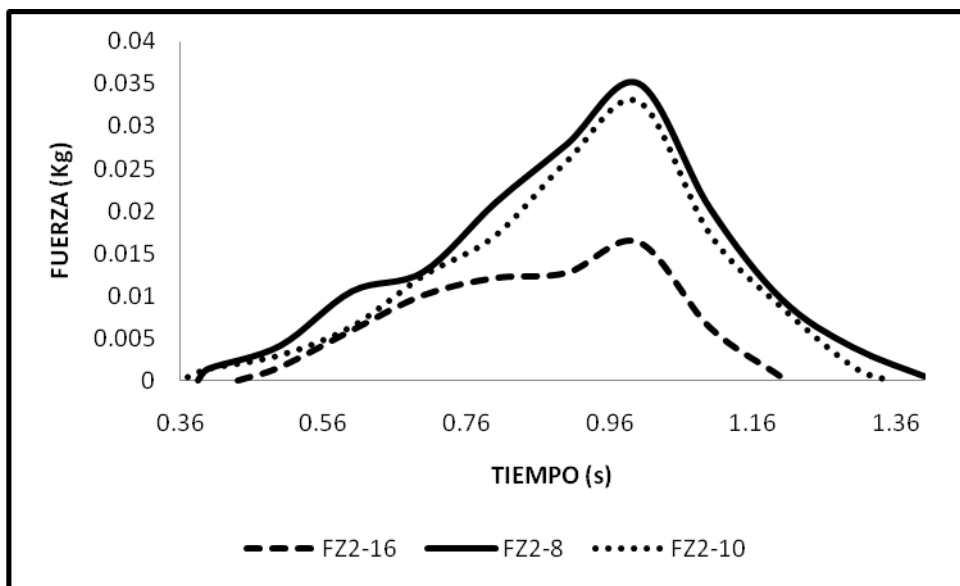
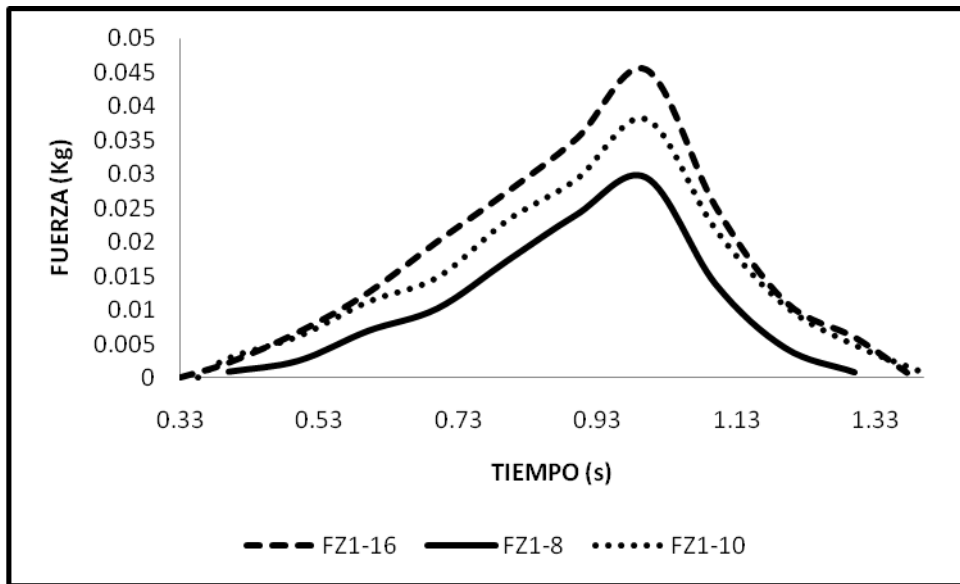
En general, predominan las propiedades elásticas en un sistema polimérico cuando el grado de enlaces entrecruzados es relativamente bajo, mientras que en un alto grado de enlaces entrecruzados da como resultado una forma más ordenada y un gel frágil. Algunos geles con formas frágiles, durante la formación de un gel precipitan, principalmente este tipo de efectos se da en geles de alginato o pectina que se van gelificando mediante enlaces con iones calcio. Las reacciones incontroladas de los iones calcio con alginato provocan que el gel se rompa (Glicksman, 1969).

Los efectos del azúcar resultantes son complementarios ya que aumentan las propiedades elásticas del gel terminado, pero si la concentración de enlaces cruzados es demasiado alta, entonces la estructura del gel es quebradiza. Por ejemplo en un sistema de gel calcio-pectina-azúcar, se encontró que forma estructuras no deseadas (geles quebradizos) fue más propenso en concentraciones de azúcar más alto que en concentraciones bajas (Glicksman, 1969).





(A)



(B)

Figura 3.6.2. Gráficas de análisis de perfil de textura que representa la fuerza aplicada a la esfera con respecto del tiempo de gelificación, a las dos diferentes áreas, para las muestras: A) yogurt natura con azúcar y B) yogurt sabor fresa-zarzamora.

## CONCLUSIONES

La técnica de esferificación inversa, que proviene de la cocina molecular se utilizó como pretexto para conocer las reacciones físico-químicas que presentan el sistema yogurt-alginato de sodio y conocer como influyen el tiempo de inmersión, el volumen y la composición de la muestra, sobre la cinética de gelificación.

- En el caso de todas las muestras se tuvo un cinética de reacción de primer orden.
- En la cinética de gelificación intervinieron los fenómenos de difusión y adsorción, ya que dependiendo del tiempo de inmersión, volumen (ya sea mayor o menor) y la composición (contenido de azúcar) que presenta la esfera, son las interacciones que existirán entre las partículas, por lo que se verá reflejado sobre la constante de velocidad de gelificación.
- Dependiendo del tipo de área que se tenga para las esferas de yogurt de alginato de sodio, éstas se verán influenciadas por el contenido de concentración del polisacárido, el tiempo de inmersión y la composición del yogurt. Por lo que se tiene un tipo de cinética de gelificación.
- Para el caso de la cinética de gelificación referido al yogurt natural sin azúcar, se tuvo un aumento en la constante de velocidad de gelificación y en el volumen de la esfera, pero una disminución en el grado de dureza. Esto quiere decir que existió una mayor interacción entre las moléculas provocando un colapso en su estructura, lo que limita la resistencia mecánica de ésta.
- La cinética de gelificación para las esferas de yogurt natural con azúcar y yogurt sabor a zarzamora, se caracterizaron por tener un comportamiento similar. Esto quiere decir que ambos presentan una menor constante de velocidad de gelificación, esto se debe al contenido de azúcar, ya que el polímero compete con el agua reduciendo su solubilidad y provocando una

reducción en la difusividad entre el alginato de sodio y el yogurt. A pesar de esto, el volumen y la dureza del producto aumentan, teniendo una estructura prácticamente inalterada al ejercer una fuerza sobre ella.

- El comportamiento de la cinética de gelificación con relación al yogurt sabor a fresa, se tiene un aumento en la constante de velocidad de gelificación, el volumen y la dureza. Por lo que existe mayor velocidad de adsorción y difusividad entre el polisacárido y el yogurt, teniendo una estructura poco inalterable, al momento en que se aplica una fuerza ésta vuelve a su forma original, una vez que la carga aplicada sea descartada.
- Por el contrario para la cinética de gelificación del yogurt sabor fresa-zarzamora, se tiene una disminución en la constante de gelificación, el volumen y la dureza. Esto es, que a pesar que aumentó el tiempo de inmersión, las moléculas de alginato de sodio no se llegan a difundir por lo tanto tampoco se llegan a adsorber, por lo se tiene una esferas frágil y quebradiza.

## ANEXO 1. CINÉTICA DE GELIFICACIÓN

A continuación se muestran los datos, obtenidos en el proceso para calcular la constante de velocidad de gelificación y el orden de reacción de la muestras.

### Yogurt natural sin azúcar.

Cuadro 1.a. Datos obtenidos para determinar la constante de velocidad de gelificación, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

<b>D1 t(min)</b>	<b>Potencial zeta (mV)</b>	<b>[C]</b>	<b>ln [C]</b>	<b>Velocidad de reacción</b>
8	70	2.6	0.9555114	
10	82	2.4	0.8754687	
12	110	2.2	0.7884574	<b>0.0447</b>
14	130	2.05	0.7178398	
16	160	1.8	0.5877867	
<b>X</b>	110.4	2.21	0.7850128	
<b>DS</b>	36.342812	0.3090307	0.1420161	
<b>CV</b>	32.919214	13.983292	18.090928	

<b>D2 t(min)</b>	<b>Potencial zeta (mV)</b>	<b>[C]</b>	<b>ln [C]</b>	<b>Velocidad de reacción</b>
8	110	2.2	0.7884574	
10	145	1.9	0.6418539	<b>0.0846</b>
12	183	1.6	0.4700036	
14	210	1.4	0.3364722	
16	220	1.1	0.0953102	
<b>X</b>	173.6	1.64	0.4664195	
<b>DS</b>	45.905337	0.427785	0.2688433	
<b>CV</b>	26.443167	26.084451	57.639811	

Cuadro 1.b. Comparación de la constante de velocidad de gelificación, para los dos diferentes áreas y los parámetros: media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

	<b>Velocidad de reacción</b>
D1	<i>0.0447</i>
D2	<i>0.0846</i>
<b>X</b>	0.06465
<b>DS</b>	0.028213561
<b>CV</b>	43.64046492

*Yogurt natural con azúcar.*

Cuadro 1.c. Datos obtenidos para determinar la constante de velocidad de gelificación, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

<b>B1</b> <b>t (min)</b>	<b>Potencial</b> <b>zeta (mV)</b>	<b>[C]</b>	<b>ln [C]</b>	<b>Velocidad de</b> <b>reacción</b>
8	72	2.62	0.9631743	
10	74	2.57	0.9439059	
12	75	2.53	0.9282193	<b>0.0099</b>
14	80	2.47	0.9042182	
16	82	2.42	0.8837675	
<b>X</b>	76.6	2.522		
<b>DS</b>	4.2190046	0.0791833		
<b>CV</b>	5.5078389	3.1397039		

<b>B2</b> <b>t (min)</b>	<b>Potencial</b> <b>zeta (mV)</b>	<b>[C]</b>	<b>ln [C]</b>	<b>Velocidad de</b> <b>reacción</b>
8	150	1.9	0.6418539	
10	155	1.87	0.6259384	
12	157	1.85	0.6151856	<b>0.0065</b>
14	158	1.83	0.604316	
16	160	1.8	0.5877867	
<b>X</b>	156	1.85		
<b>DS</b>	3.8078866	0.0380789		
<b>CV</b>	2.4409529	2.0583171		

Cuadro 1.d. Comparación de la constante de velocidad de gelificación, a las dos diferentes áreas y los parámetros: media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

	<b>Velocidad de reacción</b>
B1	0.0099
B2	0.0065
<b>X</b>	0.0082
<b>DS</b>	0.002404163
<b>CV</b>	29.31906166

Yogurt sabor fresa.

Cuadro 1.e. Datos obtenidos para determinar la constante de velocidad de gelificación, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

<b>F1 t (min)</b>	<b>Potencial zeta (mV)</b>	<b>[C]</b>	<b>ln [C]</b>	<b>Velocidad de reacción</b>
8	160	1.8	0.5877867	
10	172	1.7	0.5306283	
12	187	1.6	0.4700036	<b>0.0279</b>
14	201	1.5	0.4054651	
16	205	1.45	0.3715636	
<b>X</b>	185	1.61		
<b>DS</b>	19.065676	0.1431782		
<b>CV</b>	10.305771	8.8930566		



<b>F2</b> <b>t (min)</b>	<b>Potencial</b> <b>zeta (mV)</b>	<b>[C]</b>	<b>ln [C]</b>	<b>Velocidad de</b> <b>reacción</b>
8	156	1.9	0.6418539	
10	201	1.5	0.4054651	
12	215	1.2	0.1823216	<b>0.1328</b>
14	232	0.9	-0.105361	
16	250	0.65	-0.430783	
<b>X</b>	210.8	1.23		
<b>DS</b>	35.716943	0.491935		
<b>CV</b>	16.943521	39.994712		

Cuadro 1.f. Comparación de la constante de velocidad de gelificación, a las dos diferentes áreas y los parámetros: media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

	<b>Velocidad de</b> <b>reacción</b>
F1	<i>0.0279</i>
F2	<i>0.1328</i>
<b>X</b>	0.08035
<b>DS</b>	0.074175501
<b>CV</b>	92.31549639

*Yogurt sabor zarzamora.*

Cuadro 1.g. Datos obtenidos para determinar la constante de velocidad de gelificación, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

<b>Z1</b> <b>t (min)</b>	<b>Potencial</b> <b>zeta (mV)</b>	<b>[C]</b>	<b>ln C</b>	<b>Velocidad de</b> <b>reacción</b>
8	82	2.4	0.8754687	
10	185	1.64	0.4946962	
12	215	1.2	0.1823216	<b>0.1745</b>
14	240	0.8	-0.223144	
16	253	0.6	-0.510826	
<b>X</b>	195	1.328		
<b>DS</b>	68.297145	0.7196666		
<b>CV</b>	35.024177	54.191761		

<b>Z2</b> <b>t (min)</b>	<b>Potencial</b> <b>zeta (mV)</b>	<b>[C]</b>	<b>ln [C]</b>	<b>Velocidad de</b> <b>reacción</b>
8	110	2.2	0.7884574	
10	169	1.76	0.5653138	
12	209	1.34	0.2926696	<b>0.1279</b>
14	222	1.03	0.0295588	
16	260	0.8	-0.223144	
<b>X</b>	194	1.426		
<b>DS</b>	57.109544	0.5627433		
<b>CV</b>	29.437909	39.463063		

Cuadro 1.h. Comparación de la constante de velocidad de gelificación, a las dos diferentes áreas y los parámetros: media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

	<b>Velocidad de reacción</b>
Z1	0.1745
Z2	0.1279
<b>X</b>	0.1512
<b>DS</b>	0.032951176
<b>CV</b>	21.79310582

Yogurt sabor fresa-zarzamora.

Cuadro 1.i. Datos obtenidos para determinar la constante de velocidad de gelificación, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

<b>FZ1 t (min)</b>	<b>Potencial zeta (mV)</b>	<b>[C]</b>	<b>ln [C]</b>	<b>Velocidad de reacción</b>
8	125	2.1	0.7419373	
10	150	1.9	0.6418539	
12	174	1.73	0.5481214	<b>0.0439</b>
14	188	1.61	0.4762342	
16	206	1.47	0.3852624	
<b>X</b>	168.6	1.762		
<b>DS</b>	31.824519	0.2463128		
<b>CV</b>	18.875753	13.979161		

<b>FZ2 t (min)</b>	<b>Potencial zeta (mV)</b>	<b>[C]</b>	<b>ln [C]</b>	<b>Velocidad de reacción</b>
8	126	2.12	0.7514161	
10	151	1.92	0.6523252	
12	161	1.82	0.5988365	<b>0.0374</b>
14	172	1.7	0.5306283	
16	198	1.55	0.4382549	
<b>X</b>	161.6	1.822		
<b>DS</b>	26.519804	0.2163793		
<b>CV</b>	16.41077	11.875922		

Cuadro 1.j. Comparación de la constante de velocidad de gelificación, a las dos diferentes áreas y los parámetros: media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

	<b>Velocidad de reacción</b>
FZ1	0.0439
FZ2	0.0374
<b>X</b>	0.04065
<b>DS</b>	0.004596194
<b>CV</b>	11.3067505

## ANEXO 2. ESFERICIDAD

### Yogurt natural sin azúcar.

Cuadro 2.a. Datos obtenidos en el programa Imagen J, para las dos diferentes áreas. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

<b>D1</b>	<b>Área</b>		<b>Perímetro</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Radio</b>	<b>Volumen</b>
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>(cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cir.</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>)</b>
8	137	0.9	1	0.3183	0.1591	0.0168
10	123.4	0.9	0.9	0.1432	0.1432	0.0123
16	79.5	0.9	1	0.1591	0.1591	0.0168
					<b>X</b>	0.0153
					<b>DS</b>	0.0025981
					<b>CV</b>	16.98089

<b>D2</b>	<b>Área</b>		<b>Perímetro</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Radio</b>	<b>Volumen</b>
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>(cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cir.</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>)</b>
8	74.8	0.9	1.2	0.3819	0.1909	0.0291
10	84.7	0.9	1	0.3183	0.1591	0.0168
16	111	0.9	0.7	0.2228	0.1114	0.0057
					<b>X</b>	0.0172
					<b>DS</b>	0.0117051
					<b>CV</b>	68.053064

Yogurt natural con azúcar.

Cuadro 2.b. Datos obtenidos en el programa Imagen J, para las dos diferentes áreas. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

<b>B1</b>	<b>Área</b>	<b>Cir</b>	<b>Perímetro</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Radio</b>	<b>Volumen</b>	
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>(cm<sup>2</sup>)</b>		<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>)</b>	
8	103.4	0.9	0.9	0.2864	0.1432	0.0123	
10	124.8	0.9	0.9	0.2864	0.1432	0.0123	
16	76.4	0.9	1.2	0.3819	0.1909	0.0294	
						<b>X</b>	0.018
						<b>DS</b>	0.0098727
						<b>CV</b>	54.848276

<b>B2</b>	<b>Área</b>	<b>Cir.</b>	<b>Perímetro</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Radio</b>	<b>Volumen</b>	
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>(cm<sup>2</sup>)</b>		<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>)</b>	
8	75.6	0.9	0.8	0.2546	0.1273	0.0086	
10	85.4	0.9	1	0.3183	0.1591	0.0168	
16	89.9	0.9	0.8	0.2546	0.1273	0.0086	
						<b>X</b>	0.0113333
						<b>DS</b>	0.0047343
						<b>CV</b>	41.77299

Yogurt sabor fresa.

Cuadro 2.c. Datos obtenidos en el programa Imagen J, para las dos diferentes áreas. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

<b>F1</b>	<b>Área</b>		<b>Perímetro</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Radio</b>	<b>Volumen</b>	
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>(cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cir.</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>)</b>	
8	85.6	0.9	1	0.3183	0.1591	0.0168	
10	86.3	0.9	0.9	0.2864	0.1432	0.0123	
16	99.7	0.9	1	0.3183	0.1591	0.0168	
						<b>X</b>	0.0153
						<b>DS</b>	0.0025981
						<b>CV</b>	16.98089

<b>F2</b>	<b>Área</b>		<b>Perímetro</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Radio</b>	<b>Volumen</b>	
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>(cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cir.</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>)</b>	
8	87.7	0.9	1	0.3183	0.1591	0.0168	
10	88.8	0.9	0.9	0.2864	0.1432	0.0123	
16	138.9	1	4.8	1.5278	0.7639	1.8672	
						<b>X</b>	0.6321
						<b>DS</b>	1.0696303
						<b>CV</b>	169.21853

Yogurt sabor zarzamora.

Cuadro 2.d. Datos obtenidos en el programa Imagen J, para las dos diferentes áreas. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

<b>Z1</b>			<b>Perímetro</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Radio</b>	<b>Volumen</b>	
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>Áreacm<sup>2</sup></b>	<b>Cir.</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>)</b>	
8	83	0.9	0.9	0.2864	0.1432	0.0168	
10	117.4	0.9	1.1	0.3501	0.175	0.0123	
16	119.3	0.9	2.2	0.7002	0.3501	0.0168	
						<b>X</b>	0.0153
						<b>DS</b>	0.0025981
						<b>CV</b>	16.98089

<b>Z2</b>			<b>Perímetro</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Radio</b>	<b>Volumen</b>	
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>Área</b>	<b>Cir.</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>)</b>	
8	80.4	0.9	1.1	0.3501	0.175	0.0224	
10	123.9	0.9	1.8	0.5729	0.2864	0.0984	
16	131.1	0.9	1.7	0.5411	0.2705	0.0829	
						<b>X</b>	0.0679
						<b>DS</b>	0.0401591
						<b>CV</b>	59.144416



Cuadro 2.e. Datos obtenidos en el programa Imagen j, para las dos diferentes áreas. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación.

<b>FZ1</b>	<b>Área</b>		<b>Perímetro</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Radio</b>	<b>Volumen</b>	
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>(cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cir.</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>)</b>	
8	116.9	0.9	4.6	1.4642	0.7321	1.6436	
10	101.7	0.9	1.1	0.3501	0.175	0.0224	
16	106.9	0.9	1	0.3183	0.1591	0.0168	
						<b>X</b>	0.5609333
						<b>DS</b>	0.937621
						<b>CV</b>	167.15374

<b>FZ2</b>	<b>Área</b>		<b>Perímetro</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Radio</b>	<b>Volumen</b>	
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>(cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cir.</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>)</b>	
8	90.6	0.9	1.1	0.3501	0.175	0.0224	
10	131.9	0.9	1.3	0.4138	0.2069	0.037	
16	140.5	0.9	2.2	0.7002	0.3501	0.0112	
						<b>X</b>	0.0235333
						<b>DS</b>	0.0129373
						<b>CV</b>	54.974297

Yogurt natural sin azúcar.

Cuadro 3.a. Muestra la máxima fuerza ejercida en relación con el tiempo de inmersión, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

<b>D1</b>	<b>Dureza (Kgf)</b>	<b>D2</b>	<b>Dureza (Kgf)</b>
8min	0.001	8min	0.0199
10min	0.0197	10min	0.0266
16min	0.0153	16min	0.0366
<b>X</b>	0.012	<b>X</b>	0.0277
<b>DS</b>	0.009777014	<b>DS</b>	0.008404166
<b>CV</b>	81.47511549	<b>CV</b>	30.33994814

Yogurt natural con azúcar.

Cuadro 3.b. Muestra la máxima fuerza ejercida en relación con el tiempo de inmersión, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

<b>B1</b>	<b>Dureza (Kgf)</b>	<b>B2</b>	<b>Dureza (Kgf)</b>
8min	0.0244	8min	0.0167
10min	0.0251	10min	0.0286
16min	0.0359	16min	0.0304
<b>X</b>	0.028466667	<b>X</b>	0.025233333
<b>DS</b>	0.006446963	<b>DS</b>	0.007444685
<b>CV</b>	22.64741139	<b>CV</b>	29.50337479

Yogurt sabor fresa.

Cuadro 3.c. Muestra la máxima fuerza ejercida en relación con el tiempo de inmersión, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

<b>F1</b>	<b>Dureza (Kgf)</b>	<b>F2</b>	<b>Dureza (Kgf)</b>
8min	0.0219	8min	0.0212
10min	0.0157	10min	0.0272
16min	0.0201	16min	0.316
<b>X</b>	0.019233333	<b>X</b>	0.121466667
<b>DS</b>	0.003189566	<b>DS</b>	0.168497517
<b>CV</b>	16.58353375	<b>CV</b>	138.7191416

Yogurt sabor zarzamora.

Cuadro 3.d. Muestra la máxima fuerza ejercida en relación con el tiempo de inmersión, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

<b>Z1</b>	<b>Dureza (kgf)</b>	<b>Z2</b>	<b>Dureza (Kgf)</b>
8min	0.0173	8min	0.0412
10min	0.0187	10min	0.0432
16min	0.019	16min	0.0411
<b>X</b>	0.018333333	<b>X</b>	0.041833333
<b>DS</b>	0.000907377	<b>DS</b>	0.001184624
<b>CV</b>	4.949330032	<b>CV</b>	2.831769824

Yogurt fresa-zarzamora.

Cuadro 3.d. Muestra la máxima fuerza ejercida en relación con el tiempo de inmersión, para las dos diferentes áreas de esfera. De cada parámetro se obtuvo la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

<b>FZ1</b>	<b>Dureza (Kgf)</b>	<b>FZ2</b>	<b>Dureza (Kgf)</b>
8min	0.0295	8min	0.035
10min	0.0382	10min	0.0329
16min	0.035	16min	0.0163
<b>X</b>	0.034233333	<b>X</b>	0.028066667
<b>DS</b>	0.004400379	<b>DS</b>	0.010244185
<b>CV</b>	12.85407626	<b>CV</b>	36.49947272

## **BIBLIOGRAFÍA.**

- Adamson, A. 1990. Physical chemistry of surfaces. Acribia. España
- Baduí, S. 2006. Química de los alimentos. Addison Wesley. México
- Ball, D. 2004. Fisicoquímica. Thomson. México
- Blandino, A., Macias, M., Cantero, D. 1999. Formation of calcium alginate gel capsules: influence of sodium alginate and  $Ca_2$  concentration on gelation kinetics. Journal of Bioscience and Bioengineering, 88, 686-689
- Belitz, H. 1997. Química de los alimentos. Acribia. España
- Castellan, G. 1998. Fisicoquímica. Addison-Wesley Longman. México
- Deman, J. 1976. Rheology and texture in food quality. The Avi Publishing Company. USA
- Dickinson, E. 1991. Food polymers, gels and colloids. The Royal Society of Chemistry. Cambridge
- Euston, S., Finninga, S., Hirst, R. 2000. Aggregation kinetics of heated whey protein-stabilized emulsions. Food Hydrocolloids, 14, 155-161
- Fundueanu, G., Esposito, E., Mihai, D. 1998. Preparation and characterization of Ca-alginate microspheres by a new emulsification method. International Journal of Pharmaceutics, 170, 11-21
- Glicksman, M., 1969. Gum technology in the food industry. Academic Press. London

- Geankopolis, C. 1992. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Cotinental. México
- Harnsilawat, T., Pongsawatmanit, R., McClements, D. 2006. Characterization of  $\beta$ - lactoglobulin-sodium alginate interactions in aqueous solutions: A calorimetry, light scattering, electrophoretic mobility and solubility study. Food Hydrocolloids, 20, 577-585
- Khairou, K., Al-Gethami, W., Hassan, R. 2002. Kinetic and mechanism of sol-gel transformation between sodium alginate polyelectrolyte and some heavy divalent metal ions with formation of capillary structure polymembranes ionotropic gel. Journal of Membrane Science, 29, 445-456
- Kindle, J. 1995. Geometría analítica. McGraw Hill. México
- Laidler, K. 1997. Fisicoquímica. Continental. México
- Lehmann, H. 1992. Geometría Analítica. Limusa. México
- Luguét, F. 1993. Leche y productos lácteos 2. Acribia. España
- Mancini, M., Moresi, M., Rancini, R. 1999. Mechanical properties of alginate gel: empirical characterization. Journal of Food Engineering, 39, 369-378
- Mataix, J. 2003. Tabla de composición de los alimentos. Universidad de Granada. España
- McKenna, B. 2003. Semi-solid foods. Woodhead Publishing Limited. England
- Nussinovitch, A., Gershon, Z. 1996. A rapid method for determining sphericity of hydrocolloids beads. Food Hydrocolloids, 10, 263-266

- Rosas, M. 1994. Caracterización reológica de geles de alginato. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Tesis de licenciatura
- Rosenthal, A. 2001. Textura de los alimentos. Acribia. España
- Roudot, A. 2004. Reología y análisis de textura de los alimentos. Acribia. España
- Seira, J. 2008. Adsorción del boro mediante perlas de alginato. Universidad Politécnica de Cataluña. España. Tesis doctorado
- Somorjai, G. 1994. Introduction to surface chemistry and catalysis. University Oxford. USA
- Toral, M. 1973. Fisicoquímica de superficies y sistemas dispersos. Urmo. Bilbao
- Van Boekel, M. 2009. Kinetic modeling of reactions of foods. CRC Press. USA
- Veisseyre, R. 1971. Lactología técnica. Acribia. España
- Wastra, P. 2001. Ciencia de la leche y tecnología de los productos lácteos. Acribia. España

#### **INTERNET.**

- Adrià, F., *El Bulli*. URL: [www.elbulli.com](http://www.elbulli.com) (Consultado 2 de febrero de 2010)
- Adrià, F., Textura\_Esferificación., *El Bulli*. URL: [www.albertyferranadria.com/esp/texturas\\_sferificacion.html](http://www.albertyferranadria.com/esp/texturas_sferificacion.html) (Consultado 2 de febrero de 2010)

- Alginato., *Aula Chocovic (Tecnología alimentaria)*. URL: [www.bdnhome.com](http://www.bdnhome.com) (Consultado 3 de febrero de 2010)
- Analyze Menu., *Manual ImageJ*. URL: <http://rsh.info.nih.gov/ij/docs/menus/analyzer.html> (Consultado 3 de mayo de 2010)
- Cocina Molecular., *Herdez food service*. URL: [www.herdezfoodservice.com/sire/cocina\\_molecular\\_quess.asp](http://www.herdezfoodservice.com/sire/cocina_molecular_quess.asp) (Consultado 30 abril de 2010)
- Equipo Softonic., *ImageJ*. URL: <http://imagen.softonic.com> (Consultado 26 de noviembre de 2010)
- Equipo Softonic., *MINITAB* URL: <http://minitab15.softonic.com> (Consultado 12 de mayo de 2011)
- Gastronlab., *Gastronomía molecular y su definición en la ciencia*. URL: <http://gastronlab.com/2010/01/esferas-de-yogurt.html> (Consultado 4 de marzo de 2010)
- Malvern, *Manual Zetasizer Nano Series*. URL: <http://www.malvern.com/?gclid=CLr8iu-f6KgCFUhr7QodtjZGCw> (Consultado 22 de junio 2010)
- Pinto, F., *Cocina Molecular., Selecciones Argentina*. URL: [http://ar.selecciones.com/contenido/a1171\\_cocina\\_molecular](http://ar.selecciones.com/contenido/a1171_cocina_molecular) (Consultado 2 de febrero de 2010)
- Propiedades Alginto., *Química Corporation*. URL: [www.kimica.jpg/spanish/pag\\_10\\_vease.html](http://www.kimica.jpg/spanish/pag_10_vease.html) (Consulta 2 de febrero de 2010)



- Técnicas Esferificación., *Gourmetología*. URL:  
[www.gourmetol.com/es/tecnicas/esferificacion](http://www.gourmetol.com/es/tecnicas/esferificacion) (Consultado 2 de febrero de 2010)
- Yogurt denominación, especificaciones fisicoquímicas y microbiológicas, información comercial y métodos de prueba., *Norma Oficial Mexicana NOM-181-SCFI-2010*. URL:  
[www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5167303&fecha=16/11/2010](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5167303&fecha=16/11/2010)  
(Consultado 16 de enero de 2011)