

25  
2ci



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN



## FALLA DE ORIGEN

EFECTO DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS DE LA  
FASE CONTINUA EN EL RENDIMIENTO Y ESTABILIDAD  
DE ESPUMAS DE PROTEINAS ESTABILIZADAS CON  
POLISACARIDOS

## TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO EN ALIMENTOS**

P R E S E N T A N :

**ELSA MUÑOZ MARMOLEJO**

**CORA MARIA SILVA PAEZ**

ASESOR: I.B.Q. NORMA B. CASAS ALENCASER

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX. 1995.



## **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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
SECRETARIA ACADEMICA  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:  
Efecto de las Propiedades Reológicas de la Fase Continua  
en el Rendimiento y Estabilidad de Espumas de Proteína  
Estabilizadas con Polisacáridos.

que presenta la pasante: Elsa Nuñez Marmolejo  
con número de cuenta: 8659595-3 para obtener el TITULO de:  
Ingeniera en Alimentos ; en colaboración con :  
Gora María Silva Paez

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

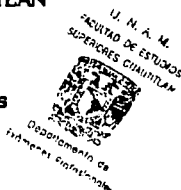
A T E N T A M E N T E .  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 21 de Junio de 1995

PRESIDENTE	IBQ. Rosa M. Arriaga Orihuela	<i>[Firma]</i>
VOCAL	IBQ. Norma B. Casas Alencaster	<i>[Firma]</i>
SECRETARIO	Dra. Sara E. Valdés Martínez	<i>[Firma]</i>
PRIMER SUPLENTE	IA. Rosalía Meléndez Pérez	<i>[Firma]</i>
SEGUNDO SUPLENTE	IBQ. Leticia Figueroa Villareal	<i>[Firma]</i>



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES



ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLÁN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

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

Efecto de las Propiedades Reológicas de la Fase Continua en el  
Rendimiento y Estabilidad de Espumas de Proteína Estabilizadas  
con Polisacáridos.

que presenta la pasante: Cora María Silva Paez  
con número de cuentas 7311553-7 para obtener el TÍTULO de:  
Ingeniera en Alimentos ; en colaboración con:  
Elisa Muñoz Marmolejo

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 21 de Junio de 1995.

PRESIDENTE	<u>IBQ. Rosa M. Arriaga Orihuela</u>	
VOCAL	<u>IBQ. Norma B. Casas Alencaster</u>	
SECRETARIO	<u>Dra. Sara E. Valdés Martínez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>IA. Rosalía Meléndez Pérez</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>IBQ. Leticia Figueroa Villarreal</u>	

## DEDICATORIAS

Nuestra infinita gratitud a:

Director de tesis Norma B. Casas A., por su especial dedicación en la realización de este trabajo.

LAPRYFAL y a los profesores: F. Beristain, P. Martínez y F. López, por su gran ayuda e intervención en la culminación de esta tesis.

Miembros del jurado por su magnífica orientación para concluir esta tesis.

A Dios doy gracias por iluminar mi camino y permitir realizar cada uno de mis sueños.

A mi mamá (Ma. Elena Marmolejo de Muñoz) porque gracias a su apoyo y consejo he llegado a realizar la más grande de mis metas, la cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir.

A mis hermanos Ma. de la Luz Muñoz, Roberto Mocoroa y mi sobrina Berenice, por compartir los momentos difíciles e importantes en mi vida.

A mi tía Alicia Marmolejo Mercado que con su cariño y ayuda ha estado cerca de mí.

A Ivette, Bertha, Alejandra y Paula por la amistad de estos años.

A tí Cora por compartir éste trabajo y al mismo tiempo brindarme tu amistad.

Elsa Muñoz Marmolejo

Mil gracias a:

Margarita mi madre y hermanos (Lulú, Silvia, Manuel, Carmen, Elvira y Alma), por su apoyo incondicional que siempre me han brindado.

German mi hijo, por haberme cedido su tiempo sin habérselo pedido.

Dios, por haber mantenido en mí la constancia y dedicación para llegar al final de éste trabajo.

Los amigos, Luis, Marisol, Mónica, Gabriela y Pedro, porque siempre han sido ejemplo de dedicación y superación.

Y a Elsa por su compañerismo y colaboración en ésta tesis.

Cora María Silva Paez



**INDICE****PAG.**

Indice de cuadros, gráficas y figuras	
Resumen	1
Introducción	3
Objetivo General	5
Objetivos Particulares	6
1 Antecedentes	
1.1 Sistemas coloidales en alimentos	7
1.1.1 Espumas	8
1.1.2 Proteínas	10
1.1.2.1 Estructura de proteínas	11
1.1.2.2 Propiedades funcionales de proteínas	12
1.1.2.3 Propiedades superficiales de proteínas	15
1.1.3 Formación de espumas de proteína	15
1.1.4 Estabilidad de espumas de proteína	17
1.1.4.1 Estabilización de espumas de proteínas	20
1.1.5 Propiedades físicas de las espumas	23
1.1.6 Propiedades reológicas de las espumas	24
1.1.7 Polisacáridos	26
1.1.7.1 Propiedades funcionales de polisacáridos	27
1.2 Aplicación de albúmina en alimentos y sus limitaciones	32
1.2.1. Albúmina de huevo	32
1.2.1.1 Propiedades espumantes de las diferentes proteínas de la albúmina	34
1.2.2 Caseínas	35
1.2.2.1 Propiedades espumantes de las caseínas	38
1.2.3 Proteínas de gluten	38

1.3	Aplicación de polisacáridos como estabilizantes de espumas	40
1.3.1	Carrageninas	40
1.3.2	Carboximetil celulosa	43
2	Metodología	46
2.1	Cuadro metodológico	48
2.2	Descripción del cuadro metodológico	52
2.2.1	Métodos empleados	
2.2.1.1	Caracterización reológica	52
2.2.1.2	Burbujeo-Drenado	55
2.2.1.3	Batido-Drenado	58
2.2.1.4	Propiedades físicas	
2.2.1.4.1	Densidad	59
2.2.1.4.2	Diámetro de burbuja	60
2.2.1.4.3	Consistencia de la espuma	60
3	Resultados y Discusión	
3.1	Propiedades reológicas de la fase continua	62
3.2	Formación de espuma por el método de Burbujeo-Drenado	70
3.2.1	Selección del flujo de aire para cada formulación	70
3.2.2	Formación de espuma a flujos elegidos	72
3.2.3	Formación de espuma por el método de Batido-Drenado	76
3.2.3.1	Expansión de la espuma (%FE)	76
3.2.3.2	Estabilidad del volumen de la espuma (%FVS)	79
3.2.3.3	Estabilidad del líquido en la espuma (%FLS)	81
3.3	Comparación de métodos (Burbujeo-Drenado y Batido-Drenado)	89
3.4	Propiedades Físicas	91
3.4.1	Densidad	91
3.4.2	Diámetro de burbuja	93
3.4.3	Consistencia de la espuma	96

3.4.4	Relación entre propiedades físicas	98
4	Conclusiones	99
5	Recomendaciones	102
6	Apéndices	103
7	Bibliografía	115

INDICE DE CUADROS	PAG.
CUADRO 1 Propiedades funcionales de las proteínas empleadas en alimentos	14
CUADRO 2 Factores que determinan la estabilidad y propiedades de las espumas	22
CUADRO 3 Características de las espumas típicas alimenticias	24
CUADRO 4 Atributos funcionales impartidos en alimentos por productos de caseína	37
CUADRO 5 Efecto de la concentración de estabilizante con los parámetros reológicos de la fase continua en las diferentes formulaciones	64
CUADRO 6 Resultados de pruebas estadísticas para n y K	68
CUADRO 7 Flujos elegidos para las formulaciones modelo	72

<b>CUADRO 8</b>		
Efecto de la concentración de estabilizante en el %Gr y %Dr a los flujos elegidos para cada formulación	74	
<b>CUADRO 9</b>	Resultados de pruebas estadísticas para %Gr y %Dr	76
<b>CUADRO 10</b>		
Resultados de pruebas estadísticas para %FE		79
<b>CUADRO 11</b>		
Efecto de la concentración de estabilizante en la estabilidad del volumen de la espuma (%FVS)		80
<b>CUADRO 12</b>		
Resultados de pruebas estadísticas para %FVS		81
<b>CUADRO 13</b>		
Resultados de pruebas estadísticas para %FLS		84
<b>CUADRO 14</b>		
Concentración e índice de consistencia de la fase continua a las que cada formulación alcanzó el 100% de FLS		87
<b>CUADRO 15</b>		
Efecto de la concentración de estabilizante en la duración total de espumas		88
<b>CUADRO 16</b>		
Resultados de pruebas estadísticas para Densidad, Diámetro de burbuja y Consistencia de la espuma		93

## INDICE DE GRAFICAS

PAG

### GRAFICA 1

Comportamiento reológico de la fase continua de las diferentes formulaciones a 0.5% de concentración de estabilizante 63

### GRAFICA 2

Efecto de la concentración de estabilizante en el índice de consistencia 66

### GRAFICA 3

Efecto de la concentración de estabilizante en el índice de comportamiento al flujo 67

### GRAFICA 4

Efecto de la concentración de estabilizante en la expansión de la espuma (%FE) 78

### GRAFICA 5

Efecto de la concentración de estabilizante en la estabilidad del líquido en la espuma (%FLS) 83

### GRAFICA 6

Efecto de la concentración de estabilizante en la densidad 92

### GRAFICA 7

Efecto de la concentración de estabilizante en el diámetro de burbuja 95

**GRAFICA 8**

**Efecto de la concentración de estabilizante en la  
consistencia de la espuma**

## INDICE DE FIGURAS

	PAG.
FIGURA 1	
Representación esquemática de la estructura de espumas	8
FIGURA 2	
Representación esquemática de la conformación de lisozima y $\beta$ caseína en una interfase aire-agua en un rango de concentración superficial y presión	16
FIGURA 3	
Representación de la interacción polisacárido-agua	29
FIGURA 4	
Puentes de disulfuro intramoleculares de la gliadina de trigo	38
FIGURA 5	
Puentes de disulfuro intra e intermoleculares de la glutenina de trigo	39
FIGURA 6	
Representación esquemática del viscosímetro Brookfield RVT modelo Rheosetcon geometría de cono y plato	53
FIGURA 7	
Representación esquemática de la columna de aereación	56



## RESUMEN

## RESUMEN

En la actualidad la albúmina de huevo está siendo sustituida por proteínas hidrolizadas como la caseína y el gluten de trigo. Estas presentan una capacidad espumante superior a la albúmina de huevo; para estabilizar estas espumas se usan polisacáridos aniónicos, cuyo efecto estabilizante depende en parte del aumento que ocasionan en la viscosidad de la fase continua. Si se encuentra el polisacárido y concentración adecuada se pueden obtener espumas más económicas, con mayor rendimiento, estabilidad y consistencia para cada caso particular.

El presente trabajo tuvo la finalidad de analizar el efecto de las propiedades reológicas de la fase continua en el rendimiento y estabilidad, además de otros parámetros de calidad de espumas de proteínas empleando sistemas modelo tipo merengue, que constan de 2% de proteína, 38% de azúcar y una concentración de estabilizante que va de 0 a 0.5%.

Las proteínas que se estudiaron: Hyfoama 88 (proteína hidrolizada de gluten de trigo), Prolac-H (proteína hidrolizada de caseína) y Albúmina de Alta Espuma, las cuales se estabilizaron con polisacáridos aniónicos como Genuvisco tipo J y CSW<sub>2</sub> (carrageninas iota y kappa respectivamente) y Macrocel 40 PAA (carboximetil celulosa). Las formulaciones modelo quedaron formadas de la siguiente manera:

- a) Prolac-H -Genuvisco J -Azúcar (PH-GJ)
- b) Prolac-H -Macrocel -Azúcar (PH-MC)
- c) Hyfoama 88 -Genuvisco CSW<sub>2</sub> -Azúcar (H88-GC)
- d) Hyfoama 88 -Macrocel -Azúcar (H88-MC)
- e) Albúmina de Alta Espuma -Genuvisco J -Azúcar (AAE-GJ)

En cada formulación la concentración de proteína y azúcar se mantuvieron constantes y únicamente se varía la concentración de estabilizante de 0% a 0.5%.

La interacción polisacárido aniónico-proteína que se da, juega un papel fundamental, ya que influye en las propiedades reológicas de la fase continua, mejora las propiedades de la película interfacial favoreciendo notablemente las características de proteína con alto poder espumante pero baja estabilidad como la caseína (Prolac-H) y la proteína de gluten (Hyfoama 88).

El aumento de concentración de estabilizante en todos los casos aumentó el índice de consistencia (K) y disminuyó el índice de comportamiento al flujo (n) de la fase continua afectando directamente a las propiedades físicas de las espumas tales como diámetro de burbuja, densidad y consistencia. El aumento del índice de consistencia de la fase continua aumentó la estabilidad de las espumas y mejoró sus propiedades de diámetro de burbuja y de consistencia dentro de cada formulación.

# INTRODUCCION

## INTRODUCCION

Las propiedades funcionales de proteínas y polisacáridos tienen amplia aplicación en alimentos, que con las tendencias actuales de consumo (alimentos instantáneos, precocinados, análogos, extendidos,

bajos en calorías y de comida rápida) va en aumento. La formación y estabilización de espumas es una de estas importantes aplicaciones en productos de panadería (merengues, cremas batidas, rellenos espumosos, etc), postres (helados, mousses, toppings, merengues) y confitería (malvaviscos, nougats, etc). En estos productos se ha utilizado tradicionalmente la albúmina de huevo como proteína espumante y sus espumas se estabilizan con azúcares y polisacáridos. Se han desarrollado proteínas de otras fuentes con propiedades espumantes como proteínas de soya, caseínas y proteínas de gluten hidrolizadas. Estas han demostrado mayor rendimiento de espuma que la albúmina y si sus espumas se estabilizan adecuadamente,

eligiendo los polisacáridos idóneos, se obtienen productos con mejores características que los elaborados con albúmina y a más bajo costo. Los factores que determinan el rendimiento y la estabilidad de una espuma de proteína se pueden clasificar como aquellos propios de la proteína (estructura, conformación, facilidad de reducir tensión superficial, propiedades reológicas de la interfase formada, contenido de enlaces disulfuro, hidrofobicidad) y aquellos del sistema (viscosidad de la fase continua, pH, fuerza iónica, interacción polisacárido-proteína, etc).

De especial importancia en las propiedades funcionales de

proteínas, es su compatibilidad con polisacáridos aniónicos, cuando éstos coexisten en el mismo medio. Dependiendo del tipo de polisacárido y tipo de proteína que se encuentren en el medio puede darse desde una incompatibilidad total en donde ambos se encuentran en diferente fase, hasta la formación de complejos solubles e insolubles. Estos sistemas polisacárido-proteína modifican las propiedades superficiales de la proteína y las propiedades reológicas del medio en diferente medida, según el tipo de polisacárido y proteína de que se trate y las condiciones del medio ( pH y fuerza iónica) y estas modificaciones influyen en el poder espumante. Uno de los factores que determinan la estabilidad de las espumas, en especial con respecto al drenado del líquido son las propiedades reológicas de la fase continua, las cuales dependen fundamentalmente de las del polisacárido estabilizante y del sistema que resulte de la interacción polisacárido aniónico-proteína (23).

En la medida en que se conozca como se modifican las propiedades reológicas de la fase continua por efecto del aumento de concentración del polisacárido se puede tener una mejor comprensión del tipo de interacción que se está dando en cada formulación y esto ayuda a interpretar mejor los resultados y da bases para la aplicación en diferentes productos.

## OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

EVALUAR EL EFECTO DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE

LA FASE CONTINUA EN EL RENDIMIENTO

Y ESTABILIDAD DE ESPUMAS DE PROTEÍNAS

ESTABILIZADAS CON POLISACÁRIDOS ANIÓNICOS



## OBJETIVOS PARTICULARES

En formulaciones modelo de AAE-GJ, PH-MC, PH-GJ, H88-MC Y H88-GC

1.0 Evaluar el efecto de la concentración de estabilizante en las propiedades reológicas de la fase continua, como una medida del grado de interacción entre la proteína y el polisacárido.

2.0 Determinar el efecto de las propiedades reológicas de la fase continua en el rendimiento y estabilidad de las espumas utilizando los métodos de Burbujeo-Drenado y Batido-Drenado, para seleccionar el que dé los resultados más confiables.

3.0 Evaluar el efecto de las propiedades reológicas de la fase continua en las propiedades físicas de las espumas, para determinar la relación entre estas propiedades.

## ANTECEDENTES

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1 Sistemas Coloidales en Alimentos(1)

Los constituyentes de los alimentos tienen la capacidad de interaccionar a través de sus diferentes grupos reactivos, dando como resultado la formación de sistemas estables con características de consistencia, apariencia y estructura global propias de cada producto.

En su mayoría, son sistemas coloidales que se caracterizan por estar integrados por dos o más fases: una discontinua, también conocida como fase dispersa o externa y otra, llamada continua, fase dispersante o interna, que puede ser agua, una solución acuosa o aceite; las partículas de mayor tamaño producen la fase dispersa y se encuentran distribuidas entre las moléculas de peso molecular bajo de la fase dispersante.

En alimentos existen sistemas como soles (sólido-líquido), espumas (gas-líquido), emulsiones (líquido-líquido) y geles (líquido-sólido).

Una de las propiedades más importantes de los coloides, que los diferencian de otros sistemas es el alto grado de subdivisión de la materia de la fase dispersa, lo que hace que adquiera una enorme superficie específica (área/volumen). La subdivisión de la materia hace que sus propiedades físicas y reológicas sean muy diferentes del resto de los sistemas. Esta característica produce una gran área de contacto entre la fase dispersa y la dispersante que genera una elevada energía interfacial sobre la superficie que las separa. La estabilidad de los coloides depende directamente de la formación y naturaleza de las interacciones

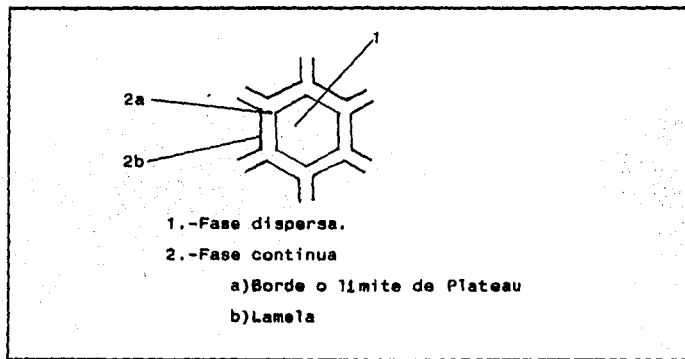
que ocurren en la superficie de contacto entre las dos fases (1,26).

Los fenómenos de superficie asumen un papel importante en las propiedades coloidales. La tensión superficial, tensión interfacial, adsorción, formación de una capa superficial, orientación de moléculas, cohesión y adhesión son importantes para la formación y propiedades de estos sistemas (31).

#### 1.1.1 Espumas

Las espumas pueden definirse como una dispersión de burbujas de gas en una fase líquida (o semisólida). De este modo las burbujas están separadas entre sí por paredes líquidas (o semisólidas), también denominadas películas o lamelas, que en espumas estables son elásticas (Fig.1).

**Fig.1 Representación esquemática de la estructura de espumas.**



Fuente: Halling, J.P. Protein-stabilized foams and emulsions. CRC Critical reviews in food science and nutrition. October, pág. 158 (12)

Los diámetros de burbuja de la espuma oscilan desde aproximadamente un micrómetro a varios centímetros. Según el tamaño de las burbujas y el espesor de la pared, una espuma puede ser casi tan densa como la fase continua líquida o casi tan ligera como la gaseosa dispersa (9).

En las espumas pueden distinguirse dos situaciones estructurales: el primer tipo (espumas diluidas) está constituido por burbujas casi esféricas separadas por películas bastante espesas de líquido algo viscoso. El otro tipo (espumas concentradas) es casi fase gaseosa, y consiste en células gaseosas poliédricas separadas por películas líquidas delgadas (éstas pueden proceder de espumas más diluidas como consecuencia de una eliminación de líquido o formarse directamente a partir de un líquido de viscosidad relativamente baja) (7). La estabilidad de las espumas depende fundamentalmente de la naturaleza y la concentración del agente espumante. Al paso del tiempo, las películas entre las burbujas de espuma llegan a ser tan delgadas, que las burbujas se rompen destruyéndose la espuma. La estabilidad puede ser determinada a través del tiempo de vida media de las burbujas de gas en la interfase, entre el líquido y el aire (33).

Las espumas en alimentos generalmente emplean proteínas como agentes espumantes. La estabilidad de estos sistemas no solo depende de la naturaleza y concentración de la proteína, sino de la temperatura, viscosidad de la fase continua, contenido de electrolitos en el líquido, el pH del medio y la naturaleza del estabilizante de la espuma (generalmente un polisacárido) (33).

### 1.1.2 Proteínas

Las proteínas son los ingredientes más complejos de los alimentos siendo polímeros de 20 o más aminoácidos. Consecuentemente hay numerosas posibilidades de la secuencia del rearrreglo de estos diferentes aminoácidos y un amplio rango de estructuras secundaria, terciaria y cuaternaria, pueden ser generadas de estas diferentes secuencias (31).

Existen varios métodos de clasificación de las proteínas pero los principales están basados en la composición, la forma, la solubilidad y la función biológica de estos biopolímeros (13).

Dentro de la clasificación por forma pueden distinguirse dos extensas clases de proteína, en base a sus proporciones axiales (la relación entre longitud y amplitud) (13):

a) Las proteínas globulares, tienen proporciones axiales menores de 10 y por lo general no exceden 3-4, se caracterizan por estar plegadas en forma compacta, con las cadenas polipeptídicas enrolladas y tienen un pequeño efecto sobre la viscosidad del agua excepto a altas concentraciones; esto es debido a que las proteínas globulares (lisozima,  $\beta$  lipoproteína, quimi tripsina), son biológicamente activas y su forma asegura la movilidad y el sistema dinámico no es muy afectado (13,31).

b) Las proteínas fibrosas ( $\beta$  caseína) tienen proporciones axiales mayores de 10 y se caracterizan porque sus cadenas polipeptídicas o sus grupos de cadena están enrolladas en una espiral o hélice y poseen entrecruzamientos a base de puentes de hidrógeno y enlaces disulfuro y en algunos casos cadenas flexibles. Los ejemplos incluyen a la queratina (proteína principal de pelo, lana y la piel), y la miosina (proteína

contractil principal del músculo) (13,31).

Las propiedades y características de las proteínas ya sean inmunológicas, enzimáticas, nutritivas, hormonales, etc., dependen fundamentalmente de la conformación en que se encuentren, es decir; para que la proteína tenga una determinada actividad biológica es necesario que adquiera una conformación específica y única. La destrucción de dicha conformación trae consigo la pérdida de su actividad (1).

#### 1.1.2.1 Estructura de Proteínas

Las proteínas presentan cuatro estructuras, las cuales están estabilizadas por los diferentes tipos de uniones químicas como por ejemplo enlaces covalentes, enlaces iónicos, puentes de hidrógeno y fuerzas atractivas de Van Der Waals (13).

La **estructura primaria** se refiere al orden de los aminoácidos en la cadena o cadenas polipeptídicas y a la ubicación de los enlaces disulfuro, si están presentes (13).

La **estructura secundaria** se refiere a la ordenación regular y periódica en el espacio de las cadenas polipeptídicas a lo largo de una dirección, lo que es más evidente en las proteínas fibrosas en donde los polímeros poseen una conformación extendida o enrollada longitudinalmente. Existen tres principales tipos de estructuras secundarias de las proteínas. La hélice  $\alpha$ , la conformación  $\beta$  y la hélice de la colágena, pero todas están estabilizadas por diferentes fuerzas siendo las más importantes las electrostáticas, los puentes de hidrógeno, las interacciones hidrófobas y las interacciones dipolo-dipolo (1).

La **estructura terciaria** se refiere al modo en que la cadena polipeptídica se curva o se pliega, para formar una estructura estrechamente plegada y compacta, característica de las proteínas globulares, en este caso las principales fuerzas que contribuyen a la estabilidad de la estructura son los enlaces disulfuro, los hidrófobos, los hidrófilos y los puentes iónicos (1).

La **estructura cuaternaria** no necesariamente existe en todos los polipéptidos y se refiere a la asociación de dos o más cadenas de proteínas a través de uniones covalentes y no covalentes. Esta estructura pone de manifiesto la forma física en que se dispone en el espacio las cadenas individuales polipeptídicas de una proteína que está compuesta por más de una cadena (1).

#### 1.1.2.2 Propiedades Funcionales de Proteínas(1)

Las proteínas poseen muy diferentes propiedades físicas y químicas que las hacen impartir distintas características a los alimentos. Muchas de estas propiedades dependen directamente de factores propios de la proteína como son: la estructura terciaria (que puede ser globular o enrollamiento al azar), hidrofobicidad y contenido de enlaces disulfuro, que van a determinar tanto la facilidad con que se desdoble la proteína como la reducción de la tensión superficial y los factores externos como son: pH, fuerza iónica, temperatura, surfactantes complementarios, viscosidad de la fase continua, concentración de proteína y estabilizantes (aniónicos y no iónicos).

Estos factores influyen en las propiedades funcionales de las



(cuadro 1) proteínas que dependen en gran parte de las interacciones de las proteínas con otros constituyentes como carbohidratos, lípidos, agua, sales y consigo mismas. Las principales fuerzas que contribuyen a la interacción proteína-proteína son las uniones hidrófobas orientadas en forma ordenada que hacen que se produzcan grandes complejos de proteína. Las estructuras cuaternarias de las proteínas son el resultado de este tipo de interacción (micelas de la leche y proteínas de soya).

Las interacciones proteína-polisacárido son muy importantes ya que muchas de las propiedades y características físicas de los alimentos dependen de ellas; en general las reacciones entre carbohidratos y proteínas son de origen iónico; son muy raros los enlaces covalentes y los puentes hidrófobos. Debido a que las proteínas y los polisacáridos tienen características coloidales, pueden formar grandes agregados con estructuras tridimensionales muy firmes cuya estabilidad es una función de la fuerza iónica, del pH del sistema y además de la relación proteína-polisacárido que exista. Estas interacciones influyen notablemente en las propiedades reológicas del sistema.

Los lípidos pueden interaccionar de diferente manera con las proteínas a través de puentes hidrófobos iónicos, aunque también existen puentes salinos con iones divalentes como el calcio.

**Cuadro 1****Propiedades funcionales de las proteínas empleadas en alimentos.**

PROPIEDAD	FUNCION
Hidratación	solubilidad, dispersión, absorción de agua, espesante, gelificante, viscosidad, formación de masas y propiedades reológicas en general.
Estructurales y reológicas	Elasticidad, cohesión, formación de redes tridimensionales, formación de fibras, viscosidad, agregación y gelificación.
Organolépticos	Color, sabor, olor, textura, turbidez y arenosidad
Superficiales	Emulsificación, espumante, estabilización formación de complejos lípidos-proteicos.
Otras	Compatibilidad con aditivos, acción enzimática y modificación de propiedades de los alimentos.

Fuente: Baduá, D.S. (1988) Química de los alimentos. Alhambra Mexicana, cuarta edición, pág. 149 (1)

### 1.1.2.3. Propiedades Superficiales de Proteínas (28)

Las películas de proteína en interfases líquidas son importantes en la industria alimentaria debido a que las capas de proteína adsorbidas en interfases aire/agua o aceite/agua, estabilizan sistemas coloidales alimenticios tales como merengues, helados, etc.

Debido a su naturaleza anfipática, las moléculas de proteína tienen actividad superficial. Los cambios en condiciones que acompañan la adsorción de una proteína en la interfase pueden ser suficientes para causar desnaturalización. Cuando una proteína es adsorbida en una interfase aire-agua o aceite-agua ocurre un acomodo de la molécula para minimizarla energía libre hidrofóbica, además del acomodo hacia el interior de un glóbulo en la fase acuosa, las cadenas laterales puede ser localizadas en la fase aire o aceite. Para una proteína con enrollamiento al azar esto puede dar lugar a la formación de una película adsorbida conteniendo cadenas de aminoácidos los cuales están en contacto con la superficie, y rizos o colas de residuo los cuales sobresalen hacia la fase continua.

### 1.1.3 Formación de Espumas de Proteínas

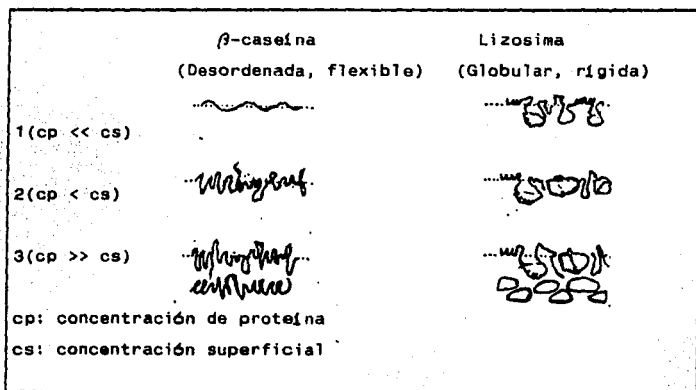
Para la formación de espumas de proteínas es fundamental una adecuada adsorción en la interfase. La forma de la molécula de la proteína influye notablemente en las características de la interfase como son: el coeficiente de viscosidad, los módulos de elasticidad y dilatación así como, en la concentración superficial, presión de la película y grosor (28).

La formación de espumas con proteínas implica un proceso de desnaturalización controlada, ya que este polímero se tiene que

desdoblar para que oriente sus aminoácidos hidrófobos hacia el interior de la burbuja y los hidrófilos hacia el exterior, en contacto con la fase acuosa (1). Esta depende de la habilidad de las proteínas para formar rápidamente una película cohesiva interfacial que sea capaz de atrapar y retener el aire (27). En algunos casos un calentamiento drástico de estos polipéptidos reduce su capacidad de espumado debido a una excesiva desnaturalización(1).

**Fig.2**

**Representación esquemática de la conformación de la lisozima y  $\beta$ -caseína en una interfase aire-agua en un rango de concentración superficial y presión.**



Fuente: Phillips, M.C. (1981) Food Technology. Enero, Vol. 35, No.1, Pág.54 (28)

En la Figura 2 se muestran los ejemplos típicos de proteínas espumantes con estructura diferente son la  $\beta$ -caseína (estructura flexible) y la lisozima (estructura globular). La caseína debido a la flexibilidad de su molécula se desdobra rápidamente formando gran volumen de espuma, pero poco estable, mientras la lisozima, por tener una molécula muy estructurada, se desdoble menos y forma menor volumen de espuma pero más estable. Phillips (1981) (28) a las mismas concentraciones determinó que las películas de lisozima son más gruesas, más elásticas y con mayor concentración superficial de proteína, debido a lo cual sus espumas son más estables a diferencia de las de caseína que tienen muy baja duración.

Las películas altamente cohesivas formadas por moléculas de proteína las cuales eran originalmente globulares tienen más estructura residual, mayor entrecruzamiento y enrollamiento de cadenas además de que su resistencia a la deformación mecánica (dilatación y corte) es superior a las películas de proteína flexibles (28).

La distribución del tamaño de burbuja de aire es también diferente en espumas estabilizadas por los dos tipos de proteína: las celdas de aire en espumas de altos rendimientos formadas por moléculas de proteína flexible ( $\beta$  caseína) son más pequeñas que las espumas de bajos rendimientos formadas por moléculas de proteína globular (lisozima) (28).

#### 1.1.4 Estabilidad de Espumas de Proteínas.

Desde un punto de vista termodinámico todas las espumas son inestables debido a su elevada área interfacial y a su energía

### libre superficial (8).

La persistencia de una espuma, definida como el período de tiempo que una unidad de volumen de gas puede permanecer en una espuma, está relacionada con la resistencia de las paredes de los alvéolos a las fuerzas de ruptura. La causa principal para que se destruya una espuma es que el líquido de las paredes de la burbuja disminuya hasta que una porción de la pared alcance el grosor crítico, entre los 50 y 150 Å, con lo cual se produce la coalescencia. Causan la pérdida del líquido en las paredes la fuerza de gravedad, el efecto de succión en la periferia de la pared debida a la elevada curvatura y la evaporación del disolvente y las fuerzas de deformación efectuadas por los movimientos del gas (difusión) desde las burbujas pequeñas a otras mayores (9).

La estabilidad de las espumas puede ser explicada por varios factores: a) el efecto de Gibbs (efecto de elasticidad superficial), b) la alta viscosidad superficial o las propiedades mecánicas específicas (factor estructural-mecánico de estabilidad) y c) la existencia de capas dobles hidratantes o eléctricas cerca de la capa superficial la cual previene el adelgazamiento de la película (9).

Para elevar la estabilidad de la espuma se incrementa la elasticidad de la pared de la burbuja, se aumenta la viscosidad de la fase continua y de la superficie de la pared o se introduce materia en forma de partículas. La elasticidad guarda relación con el cambio de tensión superficial que ocurre en respuesta a la deformación de la pared de la espuma.

Para que una espuma sea estable la tensión superficial debe cambiar rápidamente para oponerse a cualquier fuerza que deforme a las películas. Si la superficie de una película contiene moléculas adsorbidas de un espumante, cualquier dilatación por una fuerza conduce a una disminución de la concentración de las moléculas superficiales. Como resultado, aumenta la tensión superficial y se contrarresta la fuerza externa para inhibir una posterior dilatación.

Después las moléculas de la superficie del espumante se desplazan desde una región de baja tensión superficial a una de alta y arrastran con ellas a las moléculas de agua subyacentes, con lo que se restablece el grosor inicial de la pared. Sin ninguna molécula adsorbida en la superficie, la solución carecería de elasticidad. Un líquido puro pertenece a esta categoría y, en consecuencia no forma espuma (9).

Si durante la formación de la espuma, las moléculas del espumante se desplazan de manera rápida desde la masa de solución hasta las películas, se destruye velozmente el gradiente de tensión superficial y el agua que se transfiere no es suficiente para recuperar el grosor de la película. Sucede una situación de este tipo en soluciones que contienen elevadas concentraciones de espumante y estas muestran baja estabilidad de la misma (9).

Cuando una espuma es obtenida por el paso de las burbujas de aire a través de un líquido o cuando el volumen de espuma disminuye lentamente como un resultado de la compresión o destrucción de

estas burbujas, las películas de las espumas, experimentan un esfuerzo local y por tanto ellas deben resistir tanto la compresión como la extensión. La baja tensión superficial en la interfase entre un líquido espumoso y al aire podría promover la fácil deformabilidad de esta espuma (9, 33).

La descarga del líquido de la lamela de una película delgada está regida por la diferencia de presión del líquido en esta región respecto a los límites de Plateau (Fig.1). Existen tres factores que con gran probabilidad intervienen en este proceso. Las fuerzas atractivas de Van Der Waals favorecen el adelgazamiento de la película y el solapamiento de las dobles capas eléctricas del mismo signo se opondrán a este adelgazamiento. El otro factor importante es la presión capilar, que favorece el adelgazamiento. Esto se debe a que la presión de la fase gaseosa adyacente es uniforme y por consiguiente, la presión del líquido en los límites de Plateau, donde la interfase es curva, es menor que la del líquido en la película laminar. Dependiendo del equilibrio entre estas fuerzas la película puede adelgazar continuamente y finalmente romperse o llegar a un espesor de equilibrio. Este espesor puede estar afectado por cualquier estructura que exista dentro de la película (6).

#### 1.1.4.1 Estabilización de Espumas de Proteínas.

Una viscosidad alta de la fase continua solo disminuye la velocidad de colapso de la espuma. La viscosidad superficial alta implica un fuerte retraso en el flujo de líquido próximo a las superficies, y por lo tanto la descarga del líquido en películas gruesas es mucho más rápido que en las delgadas, lo que facilita que la película alcance un espesor uniforme (7).



Tomando en cuenta que la estructura de las películas adsorbidas es una función de la estructura nativa de la proteína, es de esperar que sus propiedades reológicas también dependen de la estructura terciaria original (28). Las propiedades reológicas de una película interfacial afectan la estabilidad de la espuma debido a que ellas indican la capacidad de las películas para soportar choques y rupturas bajo gravedad (18).

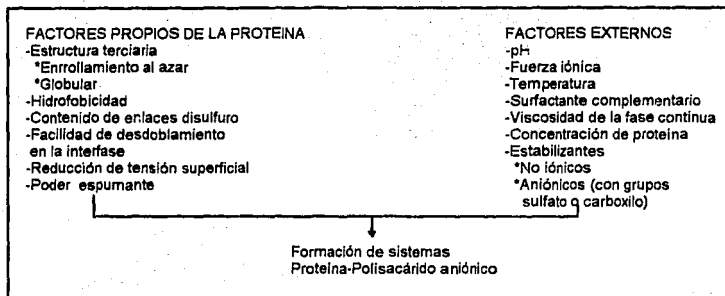
Las películas altamente cohesivas formadas por la adsorción de moléculas globulares rígidas son mucho más resistentes a la deformación mecánica que las películas conteniendo moléculas flexibles (28).

Las propiedades mecánicas de las películas superficiales tienen con frecuencia una gran importancia en la estabilidad de las espumas como en el caso de las emulsiones (7).

La estabilidad de una espuma de proteína, puede conseguirse, seleccionando el tipo de proteína que proporcione interfases con buenas características y/o aumentando la viscosidad de la fase continua. Esto último se puede lograr en alimentos, por medio de la adición de azúcar y con polisacáridos. Si se emplean polisacáridos aniónicos que puedan formar algún tipo de sistema por medio de su interacción o incompatibilidad con la proteína es posible obtener espumas sumamente estables. El tipo de sistema depende a su vez de la estructura de la proteína, el polisacárido (aniónico con grupos sulfato o carboxilo) y factores como el pH y fuerza iónica que influyen en la carga y estructura del polisacárido y la proteína. Estos factores se muestran en el cuadro 2 (7).

## Cuadro 2

Factores que determinan la estabilidad y propiedades de las espumas.



Fuente: Cherry, J.P. (1982) Food protein deterioration. Mechanisms and functionality. Ed. ACS symb ser. 206 (5)

Mitchell, J.R., D.A. Ledward. (1986) Functional properties of food macromolecules. Ed. Elsevier Applied Science Publisher, Londres, primera edición. (23, 24)

La combinación de estos factores determina el tipo de interacción proteína-polisacárido y esta a su vez, las propiedades reológicas de la fase continua y de la interfase, ambos factores de importancia en la estabilidad de la espuma (7).

#### 1.1.5 Propiedades Físicas de las Espumas.

Las propiedades físicas como son la textura y que el producto sea agradable a la vista, las espumas alimenticias deben poseer una o más de las propiedades que se mencionan en el cuadro 3, pueden ser esenciales para los procesos tecnológicos. Por ejemplo, la baja densidad, pared delgada y estructura turgente son esenciales para la suavidad, propiedad de textura que es suma de la sensación que se tiene cuando las burbujas estallan al presionar la espuma contra el paladar. El que una espuma sea blanda, por ejemplo, un bizcocho, depende del volumen de las burbujas, así como, del espesor y de las propiedades reológicas de las películas (9)

### **Cuadro 3**

#### **Características de las espumas típicas alimenticias**

- Contener gran cantidad de gas retenido (baja densidad)
- Tener gran superficie entre la fase continua y la continua líquida
- Poseer mayor concentración de soluto en la superficie que en la masa líquida
- Sus paredes son túrgidas y rígidas o semirígidas o elásticas
- Refleja la luz por lo que su aspecto es opaco
- Densidad

Fuente: Fennema, O.R. (1982) Introducción a la ciencia de los alimentos. Ed. Reverté S.A., España, primera edición, pág. 666 (9)

#### **1.1.6 Propiedades Reológicas de las Espumas**

La densidad, aspecto óptico y propiedades reológicas de las espumas están determinadas en gran medida por propiedades como fracción volumen de la fase dispersa, diámetro de burbuja, propiedades reológicas de la fase continua y tensión superficial.

Las espumas tienen propiedades reológicas altamente dependientes de la velocidad de corte o razón de flujo y también de las propiedades físicas de la espuma, por ejemplo, la concentración volumétrica de gas en la espuma y el tamaño de burbuja. A muy bajas velocidades de corte las espumas usualmente muestran

valores de esfuerzo características de un plástico. A altas velocidades de corte muestran un comportamiento de fluidos pseudoplásticos, y a bajas velocidades pueden llegar a ser fluidos newtonianos (19).

Las espumas presentan propiedades reológicas peculiares cuando la fracción del volumen de la fase dispersa ( $\phi$ ), sobrepasa la configuración de esfera compacta ( $\phi_0$ ). Para sistemas polidispersos  $\phi_0$  es aproximadamente 0.72 (29).

H.M. Princen y A.D. Kiss (1989) (29) proponen la siguiente ecuación para describir el efecto de las propiedades físicas de la espuma en su consistencia.

$$\mu_e = \tau_0/\gamma + 32 (\phi - 0.73) \mu (\mu R 32 \gamma/0)^{-1/2}$$

donde:

$\mu_e$ : viscosidad de la espuma

$\tau_0$ : esfuerzo inicial

$\mu$ : viscosidad de la fase continua newtoniana

$\gamma$ : velocidad de corte

$\sigma$ : tensión interfacial

R32: radio de la burbuja

Cuando  $\phi > \phi_0$ , las burbujas o gotas se juntan unas con otras. Estas permanecen separadas por una película delgada de la fase continua, que es estabilizada contra la ruptura por adsorción de capas de surfactante o polímero. Conforme  $\phi$  tiende a la unidad, las burbujas adquieren una forma poliédrica. Debido a su agrupamiento, cuando tal sistema está sujeto a la deformación de

corte a una velocidad pequeña, ésta se comporta como un sólido elástico puro hasta un esfuerzo inicial  $\tau_0$ , sobre del cual el flujo es iniciado y el sistema llega a ser pseudoplástico.

Esta ecuación nos permite observar el efecto que muestra el diámetro de burbuja, tensión interfacial, % de aire incorporado (volumen de la fase dispersa) y  $\mu$  de la fase continua sobre la consistencia de la espuma. Es decir que si aumenta la tensión interfacial, la consistencia disminuye, mientras que al aumentar el radio de las burbujas y al disminuir la fracción volumen de la fase dispersa la consistencia disminuye (29).

#### 1.1.7 Polisacáridos

Los polisacáridos son considerados productos de la policondensación de monosacáridos unidos glucosídicamente con eliminación de agua, formando cadenas lineales o ramificadas que pueden estar constituidos por un solo tipo de monosacárido (homopolisacáridos), como el almidón o la celulosa, o bien estar formadas por diferentes monosacáridos (heteropolisacáridos) como es el caso de la mayoría de las gomas (1).

Existen dos grupos principales de polisacáridos que tienen una diferente función biológica: los polisacáridos que constituyen tejido estructural (celulosa, carragenina, ác. murámico, pectinas, agar, galactanos, etc.), y los que constituyen la reserva energética (almidón, amilosa, amilopectina, fructanos, glucógeno, etc.). Los primeros tienden a formar puentes de hidrógeno muy estables, son poco solubles en agua y adsorben una baja cantidad de este líquido siendo además poco reactivos debido a la alta impermeabilidad que presentan a la mayoría de

Los agentes químicos. Por otra parte los carbohidratos que sirven de reserva energética pueden absorber agua hinchándose inmediatamente, con la facilidad de formar soluciones viscosas coloidales; son susceptibles a ataques químicos y presentan propiedades hidrófilas debido a la gran cantidad de grupos hidroxilos libres que tienen. Estos polisacáridos se dispersan fácilmente al interaccionar con moléculas de agua (1).

Los polisacáridos tienen un gran número de puentes y enlaces químicos que le permiten a sus moléculas una cierta rotación y flexibilidad de movimiento, con un cambio muy pequeño en su energía interna. Estas rotaciones causan que los polímeros tomen diferentes conformaciones siendo la estructura al azar el estado en el cual la cadena está fluctuando continuamente entre las diferentes posibilidades de conformación. El tipo de enlace glucosídico, al igual que los monosacáridos constituyentes, determinan fundamentalmente la conformación y la estructura del polisacárido. En cada caso de estructura los polímeros tienen diferentes propiedades físicas que se reflejan en su funcionalidad en los alimentos (1).

#### 1.1.7.1 Propiedades Funcionales de Polisacáridos

Los polisacáridos se encuentran en forma nativa en muchos alimentos, pero en algunas ocasiones son añadidos para la correcta formulación de otros, como es el caso del almidón, la carragenina, las pectinas y varios otros polímeros que se utilizan debido a sus propiedades funcionales (1).

Los factores que determinan las propiedades funcionales de polisacáridos son:

a) La interacción polisacárido-agua (8). Como se muestra en la Figura 3, el agua establece puentes de hidrógeno con los grupos hidroxilo de los polisacáridos de la misma manera que lo hace con los grupos hidroxilo de otras moléculas.

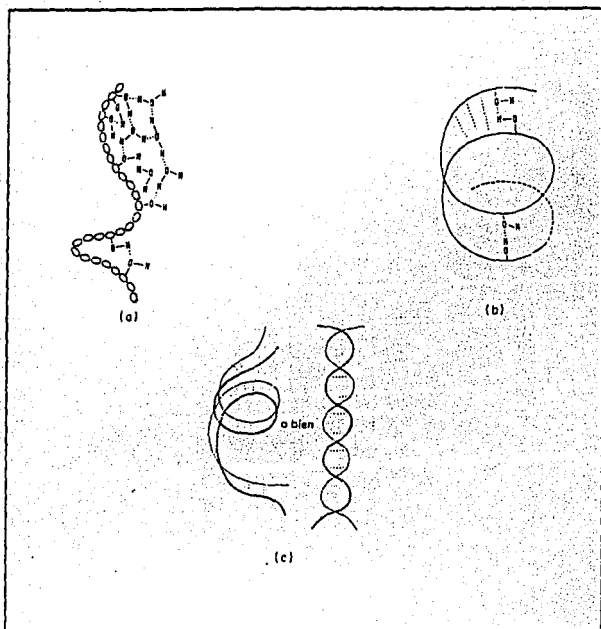
En consecuencia, hay capas de moléculas adyacentes a los grupos hidroxilo de los polisacáridos parcialmente ordenadas e inmovilizadas (Fig. 3a). La creación de esta atmósfera de agua asociada interviene en la disolución y dispersión de las grandes moléculas. A veces hay que recurrir a álcalis fuertes para destruir los enlaces de hidrógeno intermoleculares entre las moléculas de los polisacáridos, de manera que sea posible dispersarlas. Rota la asociación intermolecular, las capas de agua, parcialmente inmovilizadas tienden a mantener separadas las moléculas de los polisacáridos en solución.

Dado que, en solución, las macromoléculas hidratadas giran, los agregados de agua se deslizan y con ello se reorganizan o desplazan. Al plegarse y adquirir forma helicoidal, la molécula del polisacárido se asocia con ella misma para componer rizos (Fig. 3a), hélices o, incluso posiblemente, dobles hélices con otras macromoléculas helicoidales (Fig. 3b y 3c).



**Fig. 3**

**Representación de la interacción polisacárido-agua.**



Fuente: Fennema O.R. (1982) Introducción a la ciencia de los alimentos. Ed. Reverté S.A., España, primera edición, pág.116 (9)

**b) Viscosidad.** Todos los polisacáridos solubles producen soluciones viscosas debido a su gran peso molecular y su interacción con el agua. La viscosidad depende del peso molecular, forma y carga. Está influenciada por la presencia de

polielectrolitos los cuales afectan la conformación, tamaño de la macromolécula y la naturaleza de los iones opuestos, los cuales actúan como un freno al flujo del polímero (8).

Las macromoléculas hidratadas y abiertas de los polisacáridos, ocupan aproximadamente, espacios esféricos cuando giran en solución. A menudo estas esferas móviles establecen contacto entre ellas y dan, incluso en soluciones muy diluidas, una viscosidad considerablemente superior a la del agua sola. Al aumentar la concentración de los polisacáridos se obtiene rápido incremento de la viscosidad. Para moléculas de polisacáridos fuertemente ramificados, el volumen efectivo (volumen hidratado) ocupado por el polisacárido disuelto es más pequeño que el resultante de un polisacárido del mismo peso molecular o inferior, extendido linealmente. Por lo tanto, los polisacáridos muy ramificados presentan menores viscosidades que los lineales del mismo peso molecular (9).

c) **Interacción con otros componentes.** Los polisacáridos juegan un papel importante en los atributos de los alimentos, por ejemplo la textura. La estabilidad de otras cualidades como sabor, apariencia y color dependen del uso de polisacáridos. Los polisacáridos pueden afectar la estabilidad de estos atributos por su influencia en las propiedades reológicas de la fase acuosa de un producto y por interacciones específicas con otros componentes presentes. Por ejemplo, la estabilidad de una emulsión y la estabilidad de la apariencia de un producto pueden ser mejoradas por la adición de un polisacárido que incrementará la viscosidad (11).

**d) Propiedades reológicas de polisacáridos.** Los polisacáridos modifican el comportamiento del flujo de soluciones acuosas. Entre las propiedades físicas de los polisacáridos que son responsables de modificar la reología de una solución están, el peso molecular, la distribución del peso molecular, el grado de hidratación, la extensión de las interacciones intra e intermoleculares. Por lo general los polisacáridos producen dispersiones pseudoplásticas y en algunos casos tixotrópicas (20).

**Principales usos de polisacáridos en alimentos (1):**

- Estabilizadores de suspensiones, emulsiones y espumas a través de sus interacciones con agua y el aumento de viscosidad que esta interacción produce, así como su interacción con otros componentes (proteínas, sales, etc.).
- Gelificantes
- Mejoran la textura, dándole cuerpo al alimento
- Espesantes y agentes de viscosidad
- Encapsulación de sabores artificiales, fijación de sabores
- Estabilizan sistemas donde hay ciclos de congelamiento y descongelamiento
- Controlan la cristalización de azúcares, sales y agua
- Forman películas resistentes
- Agentes de suspensión de sólidos en líquidos
- Agentes adhesivos
- Espesantes en alimentos dietéticos bajos en calorías
- Agentes floculantes
- Reducen el daño estructural del alimento causado por el congelamiento

## 1.2 Aplicación de Albúmina en Alimentos y sus Limitaciones.

En la industria alimentaria la albúmina de huevo es la proteína típicamente utilizada en la formación de espumas, principalmente en usos para panadería y repostería. Uno de los usos más importantes es la elaboración de bases en polvo para merengues.

Los grandes consumidores de estas bases para merengues y los fabricantes de estas, tienen problemas de disponibilidad y calidad de la albúmina que se utiliza. La albúmina de huevo es un buen agente de batido natural, pero tienen el inconveniente de que existe mucha variabilidad en el batido y existe el problema del sobrebato. Ambos casos afectan al producto final, especialmente al volumen y a la textura, lo cual da lugar a la búsqueda de alternativas para sustituir o complementar a esta proteína. En la actualidad se fabrican proteínas en forma natural o modificada de diferentes fuentes como soya, leche y trigo principalmente, las cuales en una formulación en que se den las mejores condiciones para su funcionalidad, pueden ser buenas alternativas para sustituir la albúmina en cuanto a costo y características de las espumas.

### 1.2.1 Albúmina de Huevo.

La albúmina puede ser considerada como un sistema de proteínas conteniendo fibras de ovomucina en una solución acuosa de numerosas proteínas globulares. La composición de la proteína en las capas gruesa y delgada de la albúmina son diferentes únicamente en el contenido de ovomucina (8).

Las proteínas principales de la albúmina son ovoalbumina, conalbumina, ovomucoide, lisozima y globulina.

La ovoalbumina, es la proteína predominante en la albúmina, es clasificada como una fosfoglicoproteína, con el 3.2% de carbohidratos y 0.2 moles de ácido fosfórico ligado a la serina por cada mol de proteína, (componentes  $A_3$ ,  $A_2$  y  $A_1$ , en una cuantía aproximada del 3, 12 y 85%). La ovoalbumina contiene 4 grupos tiol-disulfuro, en la s-ovoalbumina, fracción termoestable obtenida a partir de la proteína nativa, la fracción carbohidrato está unida a la asparagina en la secuencia -Glu-Lys-Tyr-Asn-Leu-Thr-Ser-. La ovoalbumina se desnaturaliza con relativa facilidad por ejemplo: mediante agitación o batido en solución acuosa. Esta desnaturalización en la interfase transcurre por agregación (2).

La conalbumina es una glicoproteína, que contiene grupos libres de sulfidrilo, 0.8% hexosa, 1.4% de hexosamina. El punto isoelectrico de la conalbumina purificada es de 6.6 (2).

La conalbumina es más sensible al calor que la ovoalbumina, pero menos susceptible a la desnaturalización. La proteína no se desnaturaliza en la interfase como sucede con la ovoalbumina. pero coagula a temperatura más baja. Una propiedad característica es la fijación de iones metálicos (2).

El ovomucoide es una glicoproteína resistente al calor. Esta glicoproteína tiene cadenas simples de polipéptidos con porciones helicoidales (22%) y enrollamientos. En soluciones ácidas el ovomucoide es muy resistente a la desnaturalización por calor, en la región alcalina (a pH 9) esta proteína es alterada rápidamente a 80°C (2).

La lisozima (Ovoglobulina G1), se halla ampliamente difundida,

presentándose además de la clara de huevo, en numerosos tejidos y secreciones animales, en el látex de numerosas plantas y en algunos hongos. La lisozima está constituida por una cadena peptídica de 129 restos de aminoácidos, que contiene 4 uniones disulfuro.

Las ovoglobulinas G2 y G3, estas proteínas se conocen como buenas formadoras de espumas (2,8).

Las albúminas son solubles en agua y soluciones salinas y son coaguladas por calor. Estas proteínas son usadas ampliamente en formulaciones alimenticias debido a sus propiedades espumantes y gelificantes. La viscosidad de la albúmina de huevo es dependiente del tiempo, temperatura y velocidad de corte (15).

La tensión superficial es importante en las propiedades funcionales tales como espumación y emulsificación del huevo y decrece marcadamente con los procesos de desnaturalización (15).

#### 1.2.1.1 Propiedades Espumantes de las Diferentes Proteínas de la Albúmina.

La ovoalbúmina es la responsable de la cantidad de espuma producida, constituye cerca del 63% de la proteína de la albúmina, es una glicoproteína con un peso molecular alrededor de 45 000 Daltones, su punto isoeléctrico es de 4.6 a 4.8. La ovoalbúmina se desnaturaliza cuando se sujeta a altas temperaturas, adsorbida en superficies o películas, perturbaciones, o la acción de varios agentes desnaturalizantes. La ovoalbúmina nativa contiene todos los grupos sulfhidrido de la albúmina (1,32).

La ovomucina es el componente de la clara de huevo que forma una película de material insoluble que estabiliza la espuma. La conalbumina, lizosima, ovomucina y ovomucoide solo tienen una pequeña o no tienen capacidad espumante, pero se ha confirmado que la interacción de la lizosima y globulinas son importantes en el proceso de espumación. El sobreatado insolubiliza a la ovomucina y disminuye la elasticidad de las burbujas (2).

Las globulinas contribuyen a una alta viscosidad, disminuyen la tendencia para que el líquido drene fuera de las burbujas de aire de la espuma. Las globulinas también disminuyen la tensión superficial lo cual es importante para el inicio del proceso de espumado. La tensión superficial baja, también mejora la formación de pequeñas burbujas y suaviza la textura (2).

#### 1.2.2 Caseínas

Las caseínas se definen como un grupo heterogéneo de fosfoproteínas que precipitan de la leche descremada a pH de 4.6 y a 20° C., constan de tres componentes principales  $\alpha$  caseína 55%,  $\beta$  caseína 25% y  $\kappa$  caseína (15%) y varios componentes secundarios entre las cuales destaca la  $\gamma$  caseína (5%). Las caseínas son especies polimórficas controladas genéticamente, que se diferencian en uno o más aminoácidos o sustituyentes internos, identificables en los electroferogramas sobre gel (9).

Las  $\alpha$  caseínas se caracterizan por su sensibilidad a las bajas concentraciones de calcio (0.4M CaCl<sub>2</sub> pH 7.0)(9).

Las  $\kappa$  caseínas son solubles en estas condiciones y sirven para

estabilizar las  $\alpha$  caseínas de la leche. Las  $\beta$  caseínas se asocian en especies poliméricas a temperaturas superiores  $85^{\circ}\text{C}$  y a bajas temperaturas se disocian en subunidades monómeras. La composición y comportamiento de las  $\gamma$  caseínas son semejantes a las  $\beta$  caseínas y posiblemente representan productos de degradación de las  $\beta$  caseínas o productos incompletos de síntesis biológica a pH 7.0, las caseínas tienden a asociarse cuando se incrementa la temperatura mientras que a pH 12.0 se disocian en unidades monómeras (9).

Los aminoácidos de las caseínas se caracterizan por una relación relativamente baja entre restos polares y apolares y elevadas concentraciones de prolina (9).

Las  $\kappa$  caseínas contienen dos restos de cistina, por mol, que parecen estar por lo menos en las especies aisladas como enlaces disulfuro intermoleculares. También existen  $\kappa$  caseínas en forma de especies mixtas, cuya concentración de carbono oscila del 0 al 2%. Los grupos fosfato de las caseínas están unidos predominantemente de manera covalente a los restos de serina y constituyen monoésteres (R-O-P). La mayoría de los restos fosforilados se hallan muy próximos entre sí, lo cual sin duda contribuye a las propiedades características de las caseínas (9).

Como se muestra en el cuadro 4, las caseínas son ampliamente usadas en la industria alimentaria por su funcionalidad. En general la funcionalidad óptima es obtenida cuando se usan en un rango de 0.5 a 2%, los ejemplos más conocidos son: sopas, helados, salsas, batidos, yoghurt, formulaciones de carne (14).

Prolac-H fue la caseína utilizada en este trabajo. Es una proteína láctea que se obtiene por hidrólisis fuertemente



alcalina de caseína comestible de máxima calidad (30).

#### Cuadro 4

Atributos funcionales impartidos en alimentos por productos de caseína

PROPIEDAD	ATRIBUTOS FUNCIONALES
-Organolépticas	-Sabor, olor, textura y color
-Apariencia	-Opacidad, color, grano
-Hidratación	-Solubilidad, dispersabilidad, viscosidad, gelatinización
-Surfactante	-Emulsificación, aireación, expansión y estabilidad, atrapamiento de gas durante el batido
-Estructura	-Elasticidad, cohesión, adhesión
-Textura	-Texturización, agregación viscosidad, gelatinización
-Estabilidad al pH	-Precipitación isoelectrica
-Estabilidad al calor	-Habilidad para retener su funcionalidad através de procesos a altas temperaturas

Fuente: Hui, Y.H. (1992) Encyclopedia of Food Science and Technology Ed. John Wiley and Sons Inc., N.Y., Vol. 1, Pág. 316

(14)

1.2.2.1 Propiedades Espumantes de las Caseínas. Las caseínas son buenos agentes de batido que pueden utilizarse como sustitutos de albúmina de huevo en la formación de espumas y merengues más estables y con menor decaimiento por la presencia de grasas (1,9).

### 1.2.3 Proteínas de Gluten.

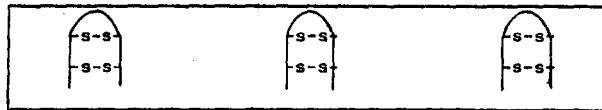
El gluten es un complejo proteico compuesto por dos fracciones, una glutelina, llamada glutenina y una prolamina llamada gliadina que se pueden separar por una precipitación selectiva de alcohol y ácido.

Estas proteínas constituidas por diferentes especies moleculares, poseen especiales propiedades para la formación de una masa elástica y compacta (1,9).

Como se muestra en la figura 4 la gliadina consta de unidades relativamente pequeñas y uniformes, con estructura de pliegue estabilizada por dos enlaces disulfuro intramoleculares. La fracción de esta proteína tiene un peso molecular bajo de aproximadamente 40 000 daltones (9).

**Fig. 4**

**Puentes de disulfuro intramoleculares de gliadina de trigo**

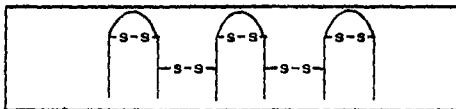


Fuente: Fennema, O.R. (1982) Introducción a la ciencia de los alimentos. Ed. Reverté S.A., España, primera edición, Pág. 287 (9)

Como se muestra en la figura 5 la glutenina es una asociación lineal de cadenas de polipéptidos con un peso molecular comprendido entre 20 000 y 100 000 daltons, estas subunidades se hallan unidas entre sí mediante puentes de disulfuro, de lo cual resultan polímeros de peso molecular comprendido entre 50 000 y varios millones de daltons. En estas moléculas también hay puentes de disulfuro intramoleculares (9).

**Fig. 5**

**Puentes de disulfuro intra e intermoleculares de la glutenina de trigo**



Fuente: Fennema, O.R. (1982) Introducción a la ciencia de los alimentos. Ed. Reverté S.A., España, primera edición, Pág. 287 (9)

La estructura de las proteínas de gluten depende, en gran medida de la existencia de puentes disulfuro, teniendo sus cadenas de proteína unidas en forma transversal (9).

Las propiedades de los componentes de estas proteínas dependen de su estructura molecular y sus interacciones intramoleculares (9). En el caso de la BSA (Albúmina de suero de bovino), con un tratamiento alcalino, el cual involucra rompimiento de enlaces

disulfuro (s-s) y atracciones hidrofóbicas, refleja la alteración de la estructura terciaria cuando los enlaces disulfuro fueron rotos. Esto nos deja ver la importancia de un cierto grado de estabilidad en la estructura (estructura terciaria) para la formación óptima de una emulsión. La reducción de los enlaces disulfuro (s-s) permiten el desenrollamiento de la BSA, dando una conformación más extendida (36). Este ejemplo nos permite tener una referencia del comportamiento de las proteínas de gluten.

El Hyfoama 88 es un agente de batido o agente de aereación basado en proteínas hidrolizadas de gluten. Se usa para aerear artículos de confitería y otros productos en los que crea una estructura de celdas de aire microscópicas que aumentan el volumen y mejoran su consistencia. Los resultados obtenidos son uniformes, de alto rendimiento y es de fácil utilización y buena conservación (16).

Hyfoama 88 se presenta como un polvo fino ligeramente amarillo, que se disuelve fácilmente en agua fría, agua caliente y soluciones de azúcar, es soluble en un amplio rango de pH (16). Rápidamente forma espumas con excelente estabilidad y es compatible con otros ingredientes (16).

El Hyfoama 88 reemplaza a la albúmina de huevo y ayuda a mejorar la aereación y el control de la textura en productos como: nougats, malvaviscos, merengues, barras de chocolate, etc (10).

### 1.3 Aplicación de Polisacáridos como Estabilizantes de Espumas

#### 1.3.1 Carrageninas

Las carrageninas son polisacáridos aniónicos definidos como el producto obtenido por extracción con agua o

alcalí acuoso de la clase Rodoficeas (algas marinas rojas). Son hidrocoloides conteniendo principalmente potasio, sodio, magnesio, calcio, y ésteres de sulfato de amonio de galactosa y copolímeros 3,6 anhidrogactosa (11).

Los copolímeros predominantes son designados kappa, iota y lambda. La carragenina kappa esta compuesta por unidades alternadas de D-galactosa 4 sulfato y 3,6-anhidrogactosa; la iota es similar, excepto que el 3,6-anhidrogactosa está sulfatado en el carbón 2. En la carragenina lambda las unidades monoméricas alternadas son D-galactosa-2-6-disulfato (11).

Todas las carrageninas son solubles en agua caliente, típicamente a temperatura arriba de 70 °C. En agua fría únicamente la carragenina lambda y sales de sodio de carragenina kappa y iota son solubles. Las sales de potasio y calcio muestran varios grados de hinchamiento en la hidratación (11).

Una propiedad muy importante de la carragenina es su reactividad con proteínas, principalmente con las de leche. Se ha visto que la carragenina  $\kappa$  tiene la capacidad de estabilizar las caseínas  $\alpha$  y  $\beta$  contra su precipitación por iones calcio, tal como la caseína  $\kappa$  (10).

Debido a que sus grupos sulfato están orientados hacia el exterior de la cadena de galactosa, la carragenina tiene la capacidad de reaccionar con proteínas. Pueden existir interacciones de los iones sulfato de la carragenina en los grupos cargados de las proteínas, ya sea en forma directa o a través de iones divalentes como el calcio. La reacción depende de la carga neta del complejo y por lo tanto es una función del

punto isoeléctrico de la proteína. El grado de reactividad dependerá de la concentración, pH, y fuerza iónica. Este tipo de reacción puede ser extensivo a otro tipo de proteínas (1).

Los usos de la carragenina son muy amplios, siendo los más importantes en la manufactura de leches infantiles y evaporadas a una concentración de 300 ppm, en las bebidas a base de chocolate (250 ppm), en helados para estabilizar el suero (150 ppm) y en budines y flanes (3000 ppm). Se usa también en la elaboración de productos dietéticos, como emulsiones y otros (1).

**Genuvisco Carragenina Tipo J** (iota carragenina), es una carragenina estandarizada con azúcar para una viscosidad constante en agua destilada (10).

Ha sido desarrollada con el propósito de espesar o ligar agua y o gelatinizar en aquellos productos en los cuales la textura del gel es elástica y de cohesividad débil (10).

**Genuvisco Carragenina Tipo CSW-2** (kappa carragenina), es una carragenina estandarizada con azúcar para un efecto de espesamiento constante en preparados fríos de dispersión instantánea en una solución salina estandar (10).

Genuvisco Tipo J y Genuvisco CSW-2, son solubles en agua, extraídas de algas marinas rojas (rhodophyta) del orden gigartinales, purificadas por un proceso de filtración y liberación de otras sustancias solubles en la extracción por precipitación de alcohol. (10)

### 1.3.2 Carboximetilcelulosa(11, 21)

La carboximetilcelulosa, es una goma aniónica modificada o semisintética derivada de la celulosa, cuya estructura básica consta de unidades de D-Glucosa unidas a través de enlaces B(1-4), la celulosa se obtiene naturalmente de la pulpa de madera y del algodón.

La carboximetilcelulosa se obtiene de la reacción del álcali de celulosa con ácido monocloroacético y/o monocloroacetato de sodio. En la reacción se sustituyen los hidrógenos del grupo hidroxílico con el grupo carboximetil sódico y es conocido que en cada anillo glucosídico hay tres hidroxilos en los cuales se puede hacer la sustitución con formación de carboximetil celulosa de sodio. Una característica básica de la CMC es el grado de sustitución. Este representa el número de grupos carboximéticos que se introdujeron en la unidad molecular glucosídica (17).

A la carboximetilcelulosa se le conoce también como goma de celulosa, es soluble en agua e insoluble en solventes orgánicos, pero es soluble en mezclas de agua y solventes miscibles en agua como el alcohol o acetona.

La goma de celulosa, es compatible con otros hidrocoloides, tiene propiedades típicas no-Newtonianas en solución. Este comportamiento es primariamente pseudoplástico, debido a las moléculas de cadena larga que tienden a orientar ellas mismas en dirección al flujo. Cuando el esfuerzo cortante es incrementado, la resistencia al flujo (viscosidad) es por consiguiente disminuida.

Las soluciones de baja viscosidad (peso molecular bajo) de goma de celulosa son menos pseudoplásticas que las soluciones de gomas de alta viscosidad (peso molecular alto). Y a muy bajo esfuerzo cortante, las soluciones de todas las gomas de carboximetilcelulosa se aproximan a un flujo newtoniano.

La viscosidad de las soluciones de goma de celulosa son dependientes de la temperatura. Cuando la temperatura aumenta, la viscosidad disminuye. El cambio de viscosidad con la temperatura es reversible; esto tiene un efecto no permanente en las características de viscosidad de la solución.

La viscosidad de las soluciones de carboximetilcelulosa es estable en un rango de pH 5-10, con estabilidad óptima a un pH 7-9. La acidificación abajo de pH 5 tiende a reducir y estabilizar la viscosidad de la solución. Por abajo de pH 3, la precipitación de la carboximetilcelulosa ácida libre puede ocurrir.

Comercialmente existen derivados de la celulosa que se pueden usar en la elaboración de alimentos en los que se requiere impartirles cuerpo, sin aumentar el poder calórico del producto.

Los usos de los derivados de la celulosa son muchos y muy variados, y se emplean para controlar la cristalización en helados y en productos congelados en general. En budines se utiliza para reducir la sinéresis, mientras que en otros postres dietéticos se usa como agente estructural para darle cuerpo al producto. Se usa en aderezos, carnes, lácteos y en repostería.



Macrocel 40 PAA es una CMC comercial con grado de sustitución de 0.65-0.8 del tipo purificado alimenticio, es un material sólido que se presenta en forma granular o de polvo fino en función del tipo de aplicación a la que se destina. Tiende a absorber y retener humedad dependiendo de esta propiedad uno de los principales usos; es compatible con otras gomas y polímeros solubles en agua lo que le da versatilidad y amplía su gama de aplicaciones. Se ha comprobado que puede ser ingerido ya que es fisiológicamente inerte habiéndose llegado a las mismas conclusiones a la exposición prolongada en la piel.

Desde su introducción comercial la CMC ha encontrado usos en gran número de aplicaciones. Las múltiples funciones importantes de este polímero lo hacen ser un excelente agente de espesamiento, suspensión estabilizante de espesamiento, suspensión estabilizador aglutinador y formador de película para gran variedad de usos.

## **METODOLOGIA**

## 2.0 METODOLOGIA

En este capítulo se describe la secuencia de actividades desarrolladas para cumplir con los siguientes objetivos:

### Objetivo 1

Evaluar el efecto de la concentración de estabilizante en las propiedades reológicas de la fase continua, como una medida del grado de interacción entre la proteína y el polisacárido.

### Objetivo 2

Determinar el efecto de las propiedades reológicas de la fase continua en el rendimiento y estabilidad de espumas utilizando los métodos de Burbujeo-Drenado y Batido-Drenado, para seleccionar el que de los resultados más confiables.

### Objetivo 3

Evaluar el efecto de las propiedades reológicas de la fase continua en las propiedades físicas de las espumas para determinar la relación entre estas propiedades.

Las formulaciones empleadas en el desarrollo experimental fueron las siguientes:

- a) Prolac-H - Genuvisco J - Azúcar (PH-GJ)
- b) Prolac-H - Macrocel - Azúcar (PH-MC)
- c) Hyfoama 88 - Genuvisco CSW<sub>2</sub> - Azúcar (H88-GC)
- d) Hyfoama 88 - Macrocel - Azúcar (H88-MC)
- e) Albúmina de Alta Espuma - Genuvisco J - Azúcar (AAE-GJ)

Estas formulaciones están compuestas de 2% de proteína, 38% de Azúcar y un estabilizante el cual varía de 0% a 0.5% de

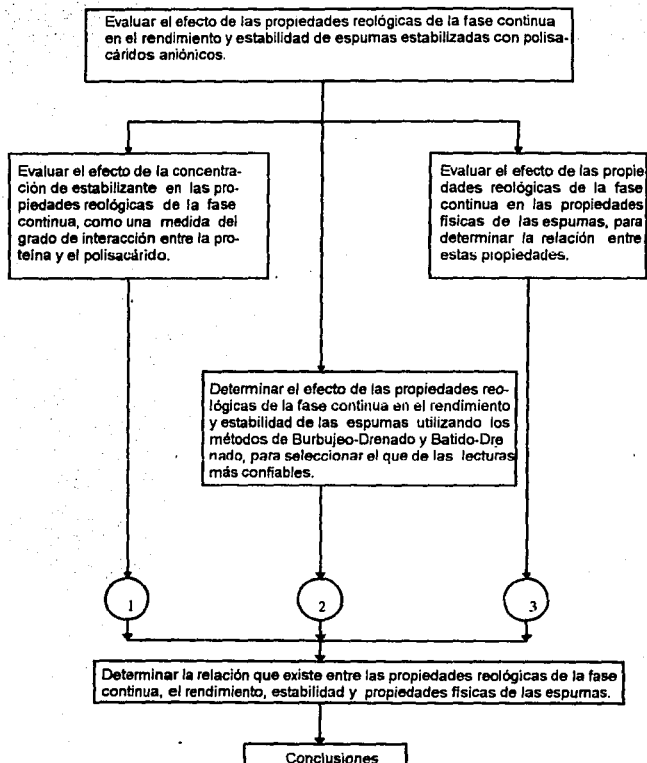
concentración.

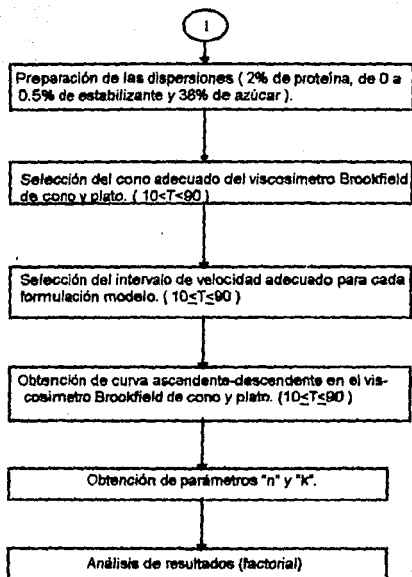
Las condiciones que se mantienen constantes son:

- 1) Concentración de proteína (2%)
- 2) Concentración de azúcar (38%)
- 3) El pH original de cada formulación
- 4) Temperatura (25°C)

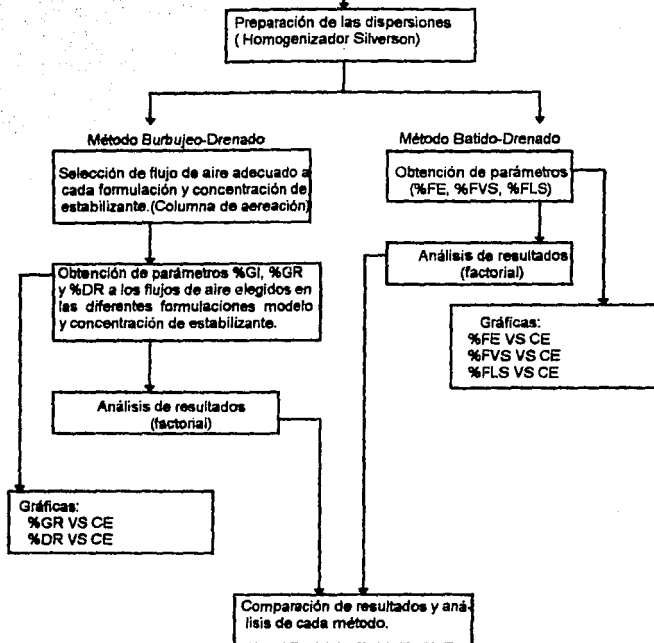
Para el análisis de resultados se manejaron los métodos estadísticos de correlación, varianza, factorial (3 factores) y prueba de Duncan (34).

## 2.1 CUADRO METODOLOGICO





2



%GI: porcentaje de gas inyectado inicialmente

%GR: porcentaje de gas retenido inicialmente en la espuma, equivalente al rendimiento

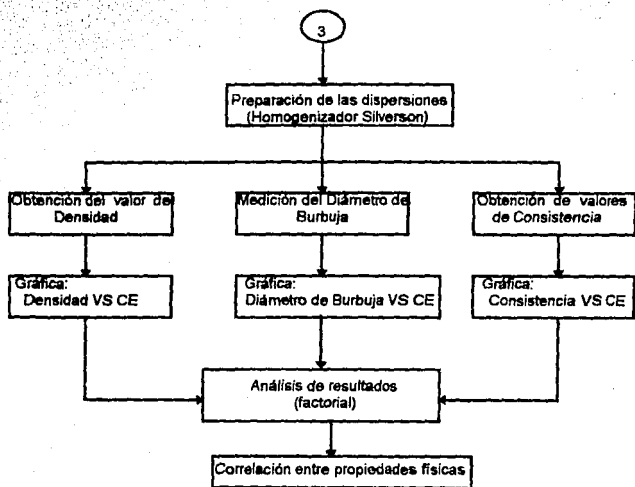
%DR: porcentaje de líquido drenado después de cinco minutos, equivalente a la estabilidad

%FE: porcentaje de expansión de la espuma

%FVS: porcentaje de estabilidad del volumen de la espuma

%FLS: porcentaje de estabilidad del líquido en la espuma

CE: concentración de estabilizante





## 2.2 Descripción del cuadro metodológico

A continuación se describe la metodología que se llevó a cabo para desarrollar cada uno de los objetivos planteados y haciendo mención de cada una de las técnicas empleadas.

En el caso de las carrageninas, la preparación de las dispersiones Proteína-Estabilizante-Azúcar de cada formulación fue de la siguiente manera: haciendo uso de un homogenizador "Silverson" a una velocidad de 3000 r.p.m. durante 10 a 15 minutos agregando primero la proteína (2%) al agua, seguida del estabilizante (0-0.5%) y por último se adicionó el azúcar (38%).

Para el estabilizante Macrocel se mezcló la proteína con el estabilizante, adicionando después el azúcar. Esto se realizó debido a que el Macrocel se dispersaba mejor y más rápidamente. Durante la dispersión las formulaciones se mantuvieron en hielo con el objeto de no incrementar la temperatura de éstas, ya que puede existir desnaturalización de la proteína.

### 2.2.1 Métodos empleados

#### 2.2.1.1 Caracterización reológica

Para evaluar el efecto de la concentración de estabilizante en las propiedades reológicas de la fase continua, se realizó una caracterización reológica en donde las variables de respuesta fueron:

- a) Índice de Consistencia de la Fase Continua (K) ( $\text{dina. seg / cm}^2$ )
- b) Índice del Comportamiento al Flujo de la Fase Continua (n)

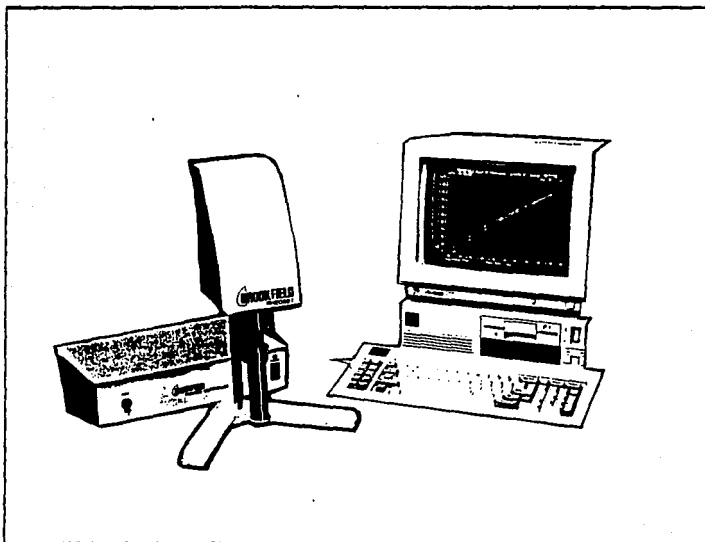
Esta evaluación se realizó por triplicado en las cinco

formulaciones y seis concentraciones de estabilizante, siendo un total de noventa ensayos.

Para llevar a cabo la caracterización reológica se utilizó un Viscosímetro Brookfield RVT modelo Rheoset con geometría de cono y plato (Fig.6) (4).

Fig. 6

Representación esquemática del viscosímetro Brookfield RVT modelo Rheoset con geometría de cono y plato



Fuente: The Brookfield Rheoset Viscometer. Operating instructions version 1.0, manual, No M/88-131-A, Brookfield engineering laboratories Inc. USA (4)

El viscosímetro consta de las siguientes partes para su funcionamiento:

- Baño a temperatura constante
- Controlador Rheoset (envía la señal a la computadora)
- Cono CP 40
- Computadora Printaform, modelo 5710-5 2F
- Impresora
- Software para control y programación del viscosímetro (VISCOSIM)

#### ETAPA EXPERIMENTAL

-Caracterización Reológica (4).

Previo al inicio de la caracterización se puso a funcionar el baño para controlar la temperatura y que el plato alcanzara la temperatura de medición (25°C). Se encendió la computadora y el controlador "rheoset", se cargó el programa " VISCOSIM " y se verificó el nivel de la burbuja en el cuerpo del viscosímetro; haciendo uso del programa se efectuaron las operaciones de autocero y la determinación de la distancia adecuada entre el cono y el plato. Enseguida se colocó la cantidad de muestra correspondiente al cono CP 40 ( 3 ml), se colocó el plato en el viscosímetro y se eligió el programa a seguir.

Previo a cada caracterización fué necesario determinar el cono y el intervalo de velocidad adecuados para cada muestra que proporcionaron lecturas de % de la escala total de torque mayores de 10 y menores de 100. Se inició con el cono CP 40, programando una operación ascendente-descendente en el intervalo de 10 en 10 hasta 250 r.p.m (%torque: 9-60%),

determinando al mismo tiempo si la muestra es dependiente del tiempo. Una vez seleccionado el cono y el intervalo de velocidades adecuado y en vista de que todas las muestras eran dependientes del tiempo, una muestra nueva se sometió a la máxima velocidad (250 rpm) y se tomaron lecturas cada 3 segundos hasta llegar al equilibrio (lectura de viscosidad estable) e inmediatamente se efectuó la operación ascendente-descendente en el intervalo de velocidades establecidas.

En la pantalla de la computadora se registraron los datos del porcentaje de torque, esfuerzo cortante (din/cm), rpm, velocidad de deformación ( $\text{seg}^{-1}$ ), viscosidad (cp) y temperatura ( $^{\circ}\text{F}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ). Este programa también proporciona las gráficas de  $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$ . Esto se repite dos veces más con muestra nueva para cada concentración de estabilizante y formulación.

Los datos obtenidos se trataron con un programa (Hoja de cálculo, Lotus), en el cual se aplicaban logaritmos obteniendo el valor de la pendiente (n) y el antilogaritmo de la ordenada al origen (K) (ver Apéndice 1).

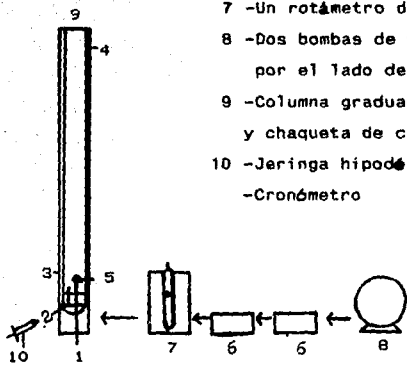
#### 2.2.1.2 BURBUJEO - DRENADO

En esta etapa se realizó la experimentación haciendo uso de una columna de aereación con chaqueta de circulación de agua construida en el taller de vidrio de la FES-C (basada en el método descrito por R.D.Waniska y J.E. Kinsella (Fig.7)(35)).

Fig. 7

Esquema de la columna de aereación

- 1 -Una entrada de gas
- 2 -Una entrada de alimentación de muestra
- 3,4 -Entrada y salida de agua circulante
- 5 -Un disco difusor de vidrio poroso
- 6 -Juego de válvula
- 7 -Un rotámetro de aire
- 8 -Dos bombas de vacío (conectadas por el lado de presión positiva)
- 9 -Columna graduada con capacidad de 58ml y chaqueta de circulación de agua
- 10 -Jeringa hipodérmica
- Cronómetro



Fuente: Waniska, R.D., J.E. Kinsella. (1979) Journal of Food Science Vol.44, Pág. 1398 (35)

Las variables de respuesta son:

- % GI: porcentaje de gas inyectado inicialmente
- % GR: porcentaje de gas retenido inicialmente en la espuma equivalente al rendimiento
- % DR: porcentaje de líquido drenado después de cinco minutos equivalente a la estabilidad

Esta evaluación se realizó por seis veces en las cinco formulaciones y las seis concentraciones de estabilizante siendo un total de ciento ochenta ensayos.

#### ETAPA EXPERIMENTAL

En la Fig. 7 se muestra el funcionamiento de la columna de aereación: una vez preparadas las dispersiones, se puso a funcionar la bomba a la velocidad de aire previamente determinada para cada formulación y se dejó el tiempo suficiente para que la velocidad de aire se estabilice. Con la jeringa hipodérmica se inyectó la cantidad de muestra necesaria para mantener el disco difusor cubierto y así poder dar inicio al ascenso de la espuma, inyectando continuamente la dispersión hasta que la espuma llenó la columna (58ml) tomando el tiempo de llenado ( $t_f$ ) y el volumen de líquido inyectado ( $v_i$ ); después de cinco minutos de que se llenó la columna se obtuvo el volumen de líquido drenado leyendo en la columna y se obtuvieron los parámetros de % GI, % GR y % DR. (Apéndice 3).

Se realizó un experimento previo con todas las formulaciones y concentraciones de estabilizante, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, variando el flujo de aire (110, 375,

462, 710, 950 y 1212.5 ml/min), y con apoyo de un análisis de varianza se obtuvo el flujo de aire más adecuado para cada formulación; tomando como criterio la formación de la espuma, homogeneidad de la espuma, mayor % GR y menor % DR. Posteriormente se obtuvieron los resultados finales a los flujos elegidos, determinándoles el valor promedio y la desviación estandar.

### 2.2.1.3 BATIDO - DRENADO

En la etapa de Batido-Drenado se utilizó el método descrito por P.D. Patel, A.M. Stripp y J.F. Fry (1988)(25), en el cual las variables de respuesta son:

- %FE: Porcentaje de expansión de la espuma
- %FVS: Porcentaje de estabilidad del volumen de la espuma
- %FLS: Porcentaje de estabilidad del líquido en la espuma

Esta evaluación se realizó por triplicado en las cinco formulaciones y las seis concentraciones siendo un total de noventa ensayos.

Este experimento se llevó a cabo haciendo uso de:

- Batidora con dos aspas y doce velocidades modelo Mix-Master marca "Oster"
- Recipientes graduados de 1500 ml
- Pipetas, probetas y espátulas

### ETAPA EXPERIMENTAL

Las dispersiones se sometieron a batido, a la máxima velocidad durante diez minutos, se vierte la espuma en los recipientes con ayuda de espátulas y teniendo cuidado de no dejar huecos, se

midió el volumen inicial de espuma y se dejó reposar durante treinta minutos, al término de este tiempo, se tomó el volumen de líquido drenado y el volumen final de la espuma. En caso de que la espuma dure más de treinta minutos sin drenar se toma el tiempo en que la espuma comienza a drenar. Con los datos obtenidos se calculó el %FE, %FVS y %FLS (Apéndice 4).

#### 2.2.1.4 Propiedades físicas

En esta fase experimental las variables de respuesta fueron las siguientes:

- Densidad de la espuma
- Diámetro de burbuja de la espuma
- Consistencia de la espuma

Las pruebas se realizaron por triplicado en las cinco formulaciones por las seis concentraciones de estabilizante, siendo un total de noventa ensayos.

#### 2.2.1.4.1 DENSIDAD

En esta fase se hizo uso del siguiente equipo:

- Estufa
- Cajas de petri con diámetro de 1.950 - 2.275 in y altura de 0.425-0.725 in
- Balanza analítica
- Batidora de dos aspas con doce velocidades modelo Mix-Master marca Oster

#### ETAPA EXPERIMENTAL

Las cajas de petri posterior a la determinación de su volumen a 25<sup>o</sup>C se colocaron en la estufa 24 horas antes a temperatura de



25°C, para ponerlas a peso constante y después de este tiempo se pesaron las cajas vacías.

Una vez obtenida la espuma y con la ayuda de una espátula se llenaron las cajas de petri, de manera que el volumen de ésta sea exactamente el de la caja, pesándolas enseguida en una balanza analítica, se calculó la Densidad con la fórmula :

$$D = \frac{M}{V}$$

#### 2.2.1.4.2 DIAMETRO DE BURBUJA

Esta etapa experimental se llevó a cabo con el siguiente equipo:

- Microscopio marca ZEISS de industrias Carl Zeiss de México S.A., con lente graduado en el ocular (objetivo de 10 X)
- Porta objetos
- Batidora con dos aspas y doce velocidades modelo Mix-Master marca Oster

#### ETAPA EXPERIMENTAL

Se colocó la muestra de espuma en el porta objeto y se observaron las burbujas con el objetivo de 10 X. Se eligieron las burbujas al azar, tomando el diámetro de ellas, con la escala del ocular. Con los datos obtenidos y el factor de conversión de la escala (1 división = 0.01 mm), se tomaron las lecturas del diámetro de burbuja en milímetros.

#### 2.2.1.4.3 CONSISTENCIA DE LA ESPUMA

En esta fase se hizo uso del siguiente equipo:

- Viscosímetro Brookfield LVT con adaptador Helipath, y husos para adaptador de la A a la F (Apéndice 5) (3).
- Batidora con dos aspas y doce velocidades modelo Mix-Master marca Oster
- Cronómetro

#### ETAPA EXPERIMENTAL

Se colocó la espuma en un recipiente. Se eligió una de las agujas y velocidad de giro que den lectura de % de torque mayor de 10 y menor de 100. Se tomaron las lecturas a la mitad del recorrido ascendente-descendente de la aguja. La velocidad que se manejó es de 6 rpm para evitar huecos en la espuma. Con los datos obtenidos y el factor de conversión de la aguja seleccionada se obtiene el valor de la consistencia, en unidades Brookfield (V.B.)

$$\text{Consistencia} = \frac{L \times F}{N}$$

Donde:

F= Factor del modelo del viscosímetro con cada aguja

N= Velocidad de giro del viscosímetro

L= Porcentaje de torque

## RESULTADOS Y DISCUSION

### 3 RESULTADOS Y DISCUSION

#### 3.1 Propiedades Reológicas de la Fase Continua

Todas las dispersiones de proteína-estabilizante-azúcar obedecen a la ley de la potencia, (Apéndice 2) ya que las correlaciones del  $\log \tau$  vs  $\log \dot{\gamma}$ , fueron mayores de 0.9, por lo que los parámetros reológicos que los definen son:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n$$

donde:

$\tau$  = esfuerzo cortante (Pa.s)

$\dot{\gamma}$  = velocidad de deformación ( $\text{seg}^{-1}$ )

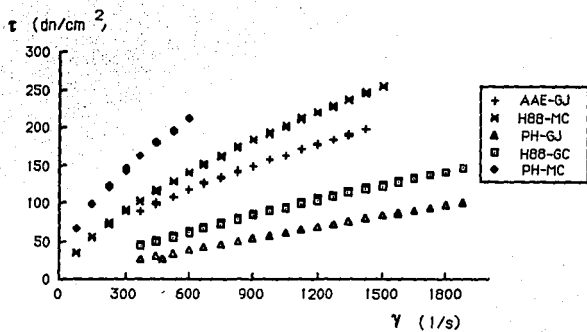
K = índice de consistencia ( $\text{Pa.s}^n$ )

n = índice de comportamiento al flujo (adimensional)

En la Gráfica 1 se muestran las curvas de flujo de cada una de las formulaciones, con 0.5% de estabilizante. Las dispersiones presentaron un comportamiento no lineal típico de los fluidos pseudoplásticos ( $n < 1$ ). El aumento de concentración de estabilizante en todos los casos aumentó el índice de consistencia y disminuyó el índice de comportamiento al flujo.

Gráfica 1

Comportamiento reológico de la fase continua de las diferentes formulaciones a 0.5% de concentración de estabilizante.



Este comportamiento es común en los sistemas donde hay gomas (cuadro 5), ya que es debido al tipo de estructura de la proteína así como de la interacción que se da entre la proteína y el polisacárido.

#### Cuadro 5

Efecto de la concentración de estabilizante con los parámetros reológicos de la fase continua en las diferentes formulaciones.

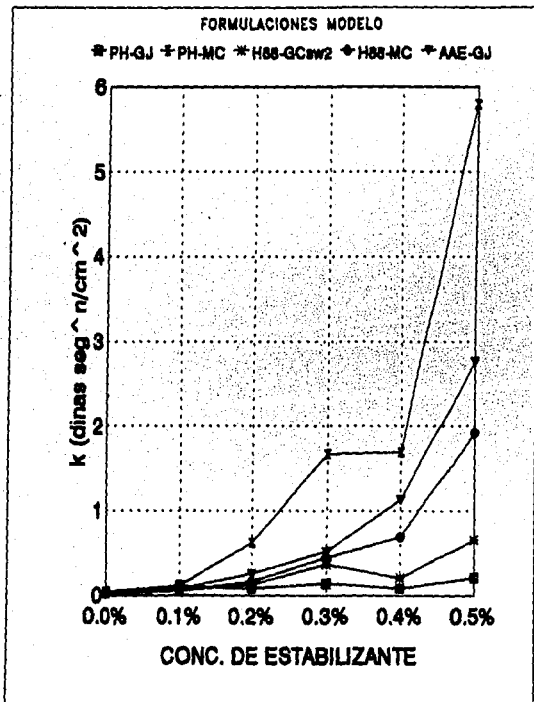
CONCENTRACION DE ESTABILIZANTE	FORMULACION				
	H88-GC	H88-MC	PH-GJ	PH-MC	AAE-GJ
0.0% n	0.9888	0.9888	0.9880	0.9880	0.9372
k	0.0220	0.0220	0.0363	0.0363	0.0354
r	0.9872	0.9872	0.9990	0.9990	0.9979
0.1% n	0.9101	0.9193	0.8584	0.8580	0.8822
k	0.0899	0.0826	0.1085	0.1118	0.0897
r	0.9973	0.9999	0.9993	0.9994	0.9983
0.2% n	0.8837	0.8298	0.8535	0.7338	0.7975
k	0.1229	0.1560	0.0802	0.6200	0.2546
r	0.9990	0.9997	0.9990	0.9996	0.9993
0.3% n	0.7637	0.7632	0.8080	0.6599	0.7074
k	0.2340	0.4432	0.1381	1.6705	0.5188
r	0.9922	0.9996	0.9993	0.9996	0.9997
0.4% n	0.7911	0.7246	0.8925	0.6906	0.6482
k	0.2933	0.6673	0.0763	1.6905	1.1311
r	0.9994	0.9996	0.9994	0.9992	0.9996
0.5% n	0.7282	0.6882	0.8368	0.5820	0.6036
k	0.6630	1.9203	0.2063	5.7942	2.7890
r	0.9979	0.9993	0.9996	0.9997	0.9996

valores promedio  
K:  $D \cdot \eta_{sp} / c \cdot \eta^2$

Como se puede observar en el Cuadro 5 la formulación de Prolac-H-GJ no sigue el comportamiento general de las formulaciones, mostrando pequeños saltos en los valores de  $K$  y  $n$ , esto se atribuye a que la sensibilidad del viscosímetro no puede detectar valores tan pequeños y que estos puedan ser confiables. En la Gráfica 2 se observa que el aumento de concentración de estabilizante ocasiona un aumento en el índice de consistencia ( $K$ ) de muy diferente magnitud en función del tipo de estabilizante y proteína. Para una misma proteína (Prolac-H) con dos estabilizantes diferentes (GJ y MC), el aumento de  $K$  al aumentar el estabilizante de 0 a 0.5% es muy diferente, de 0.03, con la proteína sola a 0.2 con GJ y 5.79 con MC. Para un mismo estabilizante con dos proteínas diferentes (Prolac-H con GJ y Albúmina de alta espuma con GJ), el aumento de  $K$  es de 0.03 con la proteína sola a 0.20 con Prolac-H y 2.76 con Albúmina de alta espuma (cuadro 5 y gráfica 2). Un comportamiento similar se observa en MC con dos proteínas diferentes (PH y H88). Cabe destacar que la viscosidad de las proteínas solas es muy pequeña y esto depende de la forma y de la concentración de la misma. En la Gráfica 3 observamos la disminución del índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), para una misma proteína con dos estabilizantes diferentes, como es el caso de Prolac-H es de 0.95 con la proteína sola a 0.83 con GJ y 0.56 con MC, mientras que con un mismo estabilizante con dos proteínas diferentes (Prolac-H-GJ y AAE-GJ) fué de 0.95-0.83 con Prolac-H y 0.93-0.59 con AAE como se puede observar en el cuadro 5 y gráfica 3. En general, las formulaciones con MC, se hacen más pseudoplásticas al aumentar la concentración de éste, que las formulaciones con genuvisco, para una misma proteína. Un mismo estabilizante, GJ, hace más pseudoplástica la formulación con AAE que con PH.

Gráfica 2

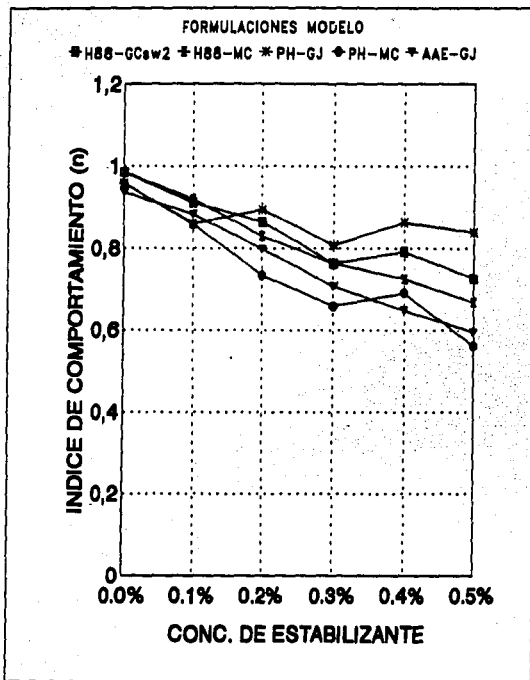
Efecto de la concentración de estabilizante en el índice de consistencia.





Gráfica 3

Efecto de la concentración de estabilizante en el índice de comportamiento al flujo.



El análisis estadístico se muestra en el cuadro 6 en el que tanto las formulaciones como las concentraciones tienen un comportamiento diferente.

**Cuadro 6**

**Resultados de pruebas estadísticas para n y K.**

Propiedad	Tipo de prueba	Nivel significativo	Inferencia	MCMD (5%) Significativo	MCMD (5%) No significativo
n Formulación	Factorial	1%	**	H88-GC, H88-MC, PH-GJ, PH-MC y AAE-GJ	
Conc. Estabilizante		1%	**	0%, 0.1%, 0.4% y 0.5%	0.2% y 0.3%
K Formulación	Factorial	1%	**	H88-GC, H88-MC, PH-GJ, PH-MC y AAE-GJ	
Conc. Estabilizante		1%	**	0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% y 0.5%	

MCMD=METODO DE COMPARACIONES MULTIPLES DE DUNCAN

Todo lo anterior indica que n y K no dependen solamente de la capacidad espesante del estabilizante sino de la interacción que existe entre cada estabilizante con cada proteína. Mitchell y Ledward reportan que esta interacción puede ser de tres formas (24):

- a) Un sistema líquido bifásico (emulsión agua en agua) en el cual ambos polímeros están en diferente fase, debido a incompatibilidad termodinámica en medio acuoso.

b) Un sistema bifásico en el cual ambos polímeros están en la misma fase concentrada. Este fenómeno (por ejemplo complejos coacervados) es atribuido a la formación de un complejo insoluble de proteína-polisacárido aniónico.

c) Una solución homogénea estable, en la cual los dos componentes macromoleculares no interactúan o existen alternativamente como complejos solubles.

Estos tres fenómenos influyen de manera importante en la propiedad funcional espumante de la proteína en las mezclas y por ello se deduce el tipo de sistema que presentan las formulaciones, tomando en cuenta el pH (Apéndice 7) en los sistemas en estudio, así como la estructura de sus componentes de cada uno de ellos.

Apoyándonos en lo reportado por Mitchell y Ledward (1986) se deduce que para Prolac-H-GJ y H88-GC, al encontrarnos muy por arriba del punto isoeléctrico de la proteína, existe cierta compatibilidad con polisacáridos sulfatados (carrageninas) formándose un complejo soluble que solo se puede separar a fuerza iónica alta, independientemente del pH, estos sistemas presentan valores de K bajos. También puede darse la formación de una solución homogénea estable de ambos componentes donde no interactúan o coexisten como complejos solubles, a lo cual se atribuye los valores bajos del índice de consistencia.

En el caso de Prolac-H-MC y H88-MC (la CMC es un polisacárido con grupos carboxilo), a valores de pH por arriba del punto isoeléctrico de la proteína hay poca compatibilidad con el MC formándose un sistema líquido bifásico el cual imparte al sistema propiedades reológicas particulares (K alta). También puede formarse un sistema de tipo solución homogénea de ambos componentes donde no interactúan.

Por último la AAE-GJ, (formulación con pH cercano al punto isoeléctrico) se presenta como un complejo soluble ya que es una solución homogénea y muy estable. La estructura de este complejo explica el notorio aumento del índice de consistencia al incrementar la concentración de estabilizante.

### 3.2 Formación de espuma por el Método de Burbujeo-Drenado

#### 3.2.1 Selección del Flujo de Aire para cada Formulación

Cada formulación tiene propiedades espumantes muy diferentes debidas tanto a las características propias de la proteína como al efecto del estabilizante, en función de su capacidad espesante y al tipo de interacción con la proteína. Como consecuencia de esto las condiciones de flujo de aire requeridas para formar espumas estables con cada formulación y a cada concentración de estabilizante serán diferentes.

Esta etapa fue realizada seleccionando el flujo de aire adecuado para cada formulación y a este flujo se determinó el efecto de la concentración de estabilizante en el %GI, %GR y %DR. Para el análisis de datos únicamente se utilizará el %GR y %DR, ya que el %GI es el inverso del %GR.

El flujo de aire a elegir para la formación de espuma, es aquel que proporcione el mayor porcentaje de gas retenido inicialmente (%GR), siempre y cuando su valor sea lo más cercano posible a 100%; y menor porcentaje de líquido drenado (%DR). Otro de los criterios para la selección de éste, fue el ascenso de la espuma por la columna y la homogeneidad de la espuma.

Para cada formulación y a cada concentración de estabilizante (0.0-0.5%) se hizo un análisis de varianza para las variables de respuesta %GR y %DR, teniendo como tratamiento los flujos de aire manejados. En base a los resultados de este análisis y a los criterios establecidos para la selección del flujo, en el Cuadro 6 se muestran los flujos de aire elegidos.

Como puede observarse en el cuadro 7 el aumento de concentración de estabilizante afecta de diferente manera en cada formulación en el flujo de aire requerido para formar la espuma; si el flujo de aire necesario, solo dependiera del aumento de viscosidad de la fase continua, sería de esperarse un flujo de aire mayor a mayor concentración de estabilizante, efecto que solo se observa en AAE-GJ al pasar de 0.3 a 0.4% de estabilizante y en H88-MC al pasar de 0.1 a 0.2% de estabilizante. En H88-MC, Prolac-H-GJ y Prolac-H-MC, el flujo de aire requerido disminuye a concentraciones de estabilizante altas a partir de 0.4%, lo cual indica que a esta relación proteína-polisacárido se tenía un sistema con mejores propiedades espumantes; H88-GC requirió el flujo de aire más bajo y constante para las diferentes concentraciones de estabilizante, lo cual confirma la formación de un complejo soluble con buena capacidad espumante. Para AAE a concentración de 0.5% de estabilizante y 462 ml/min no hubo formación de espuma, ya que la dispersión era tan viscosa que no permitía el paso del aire, en el H88-MC a la misma concentración de estabilizante hubo formación de espuma con burbujas muy grandes que ascendieron por la columna de forma no homogénea y se formaron huecos, por lo que no se pudieron tomar datos confiables.

**Cuadro 7****Flujos elegidos para las formulaciones modelo**

FORMULACION	CONC. DE ESTABILIZANTE					
	0%	0.1%	0.2%	0.3%	0.4%	0.5%
H08-GC	260	260	260	260	260	260
H08-MC	260	260	375	375	175	*
PH-GJ	375	375	375	375	175	175
PH-MC	375	375	375	375	260	175
AAE-GJ	375	375	375	375	402	*

valores promedio  
Flujo de aire (ml/min)  
\*No hubo datos

El flujo de aire requerido para la formación de la espuma es afectado tanto por el índice de consistencia de la fase continua como por el tipo de sistema formado por la combinación proteína-polisacárido.

**3.2.2. Formación de Espuma a Flujos Elegidos**

Con respecto al efecto de concentración de estabilizante en el %GR y %DR, que se muestran en el cuadro 7, podemos decir que el aumento de concentración de estabilizante afecta de diferente

manera en cada formulación siendo la AAE-GJ la que presenta los valores más bajos de %GR seguida de H88 y Prolac-H; esto es debido a que la AAE tiene bajo poder espumante. Con respecto al %DR, al ir aumentando la concentración de estabilizante el valor del %DR disminuye, siendo la AAE-GJ la de menor drenado, seguida del Prolac-H y H88. Esto es debido al comportamiento típico que presentan las proteínas como la Albúmina que es una proteína con estructura ordenada, presenta mayor estabilidad y menor rendimiento, mientras que el H88 y el Prolac-H son proteínas con estructura desordenada presentando mayor rendimiento y menor estabilidad.

Los valores de desviación estandar y coeficiente de variación para %GR y %DR para una misma formulación y concentración son altos lo cual indica que el método no es muy repetible (Apéndice 8).

De manera general puede observarse en el cuadro 8:

**%GR:** este parámetro que representa el rendimiento de la espuma, fue menor para la albúmina seguida de las formulaciones de H88 y Prolac-H. El aumento de concentración de estabilizante en cada formulación no mostró un efecto definido en el %GR. Aún cuando puede observarse (Cuadro 8) en AAE-GJ una marcada disminución del %GR después de 0.3% de concentración de estabilizante, lo que se atribuye al aumento del índice de consistencia de la fase continua y a la formación del complejo.

**Cuadro 8**

**Efecto de la concentración de estabilizante en el % GR y % DR a los flujos elegidos para cada formulación.**

CONCENTRACION DE ESTABILIZANTE		FORMULACION				
		H88-GC	H88-MC	PH-GJ	PH-MC	AAE-GJ
0%	%GR	71.13	71.13	86.75	86.75	55.24
	%DR	100	100	95	95	85.72
0.1%	%GR	71.74	76.13	88.93	72	69.44
	%DR	88.89	76.79	60	75	81.67
0.2%	%GR	52.59	66.24	101.01	66.24	66.03
	%DR	100	84	100	64.29	66.66
0.3%	%GR	50.06	67.77	57.49	78.51	69.45
	%DR	100	88.19	40.66	50	56
0.4%	%GR	66.23	81.84	71.51	80.57	32.25
	%DR	71.43	90	58	31.5	66.25
0.5%	%GR	58.55	*	73.21	90.87	*
	%DR	93.75	*	54	31.5	*

valores promedio

\*:no existen datos



%DR: En general, la Albúmina presentó menores valores de %DR, pero no se pudo observar claramente el efecto del aumento de concentración de estabilizante a excepción de la formulación de Prolac-H MC para la que se observa una disminución del drenado al aumentar la concentración de MC. En las proteínas Prolac-H-GJ y H88-GC presentaron un comportamiento irregular y esto se atribuye a que durante el ascenso de la espuma por la columna el tamaño de las burbujas era no homogénea, similar al de la proteína sola.

El análisis estadístico para las formulaciones nos muestra que existe diferencia significativa en el % GR y la prueba de Duncan nos dice que el Prolac-H con sus dos estabilizantes no muestra diferencia entre ellos y en las demás formulaciones se obtienen datos muy diferentes. Con respecto a la concentración de estabilizante a 0.1 y 0.2% se obtienen resultados parecidos mientras que las demás concentraciones son diferentes estadísticamente (Cuadro 9).

Para %DR las formulaciones PH-GJ y AAE-GJ tienen un comportamiento similar y todas las demás presentan diferencia significativa. En la concentración de estabilizante a 0.3 y 0.4% no existe diferencia y en las demás concentraciones si existe (Cuadro 9).

## Cuadro 9

### Resultados de pruebas estadísticas para % GR y % DR.

Propiedad	Tipo de prueba	Nivel significativo	Inferencia	MCMD (5%) Significativo	MCMD (5%) No significativo
Burbejeo-Drenado %GR Formulación	Factorial	1%	**	H88-MC, H88-GC y AAE-GJ	PH-GJ y PH-MC
Conc.Estabilizante		1%	**	0%, 0.3% y 0.4%	0.1% y 0.2%
%DR Formulación	Factorial	1%	**	H88-GC, H88-MC y PH-MC	AAE-GJ y PH-GJ
Conc.Estabilizante		1%	**	0%, 0.1% y 0.2%	0.3% y 0.4%

MCMD=METODO DE COMPARACIONES MULTIPLES DE DUNCAN

### 3.2.3 Formación de Espuma por el Método de Batido-Drenado

En el método de Batido-Drenado es importante considerar el rendimiento, estabilidad y drenado de la espuma.

#### 3.2.3.1 Expansión de la Espuma (%FE)

Como se puede observar en la gráfica 4, el H88 es la proteína con mayor rendimiento (1066.66 %) seguida de Prolac-H (840 %) y por último AAE (473%). El aumento de concentración de estabilizante afecta de diferente manera a los diversos sistemas.

En las formulaciones de Prolac-H-GJ y H88-GC donde se deduce que la formación de soluciones estables de ambos componentes (proteína y polisacárido) en la misma fase o un complejo soluble,

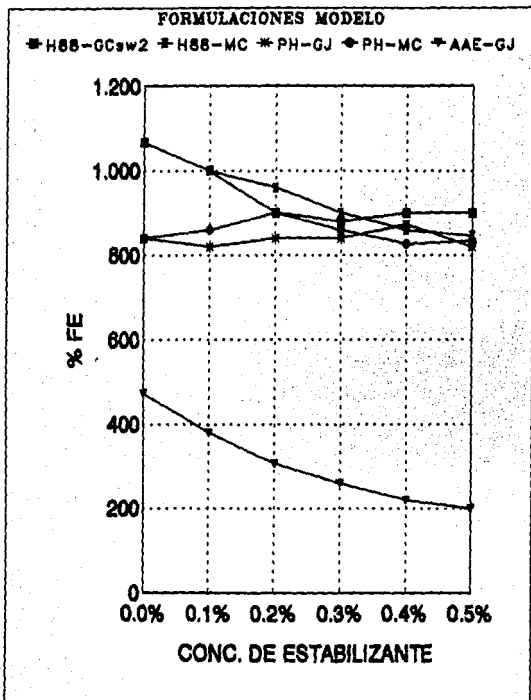
el aumento del índice de consistencia de la fase continua no fue muy alto. El sistema con Prolac-H mostró un %FE constante al aumentar la concentración de estabilizante. Esto se explica a que al no haber interacción (solución estable) o al formarse un complejo soluble no se deteriora la capacidad de desdoblamiento de la proteína y el bajo índice de consistencia de la fase continua no tuvo un efecto importante en el rendimiento. El Hyfoama 88, donde el índice de consistencia fue algo más alto, el %FE disminuyó ligeramente, al aumentar la concentración de estabilizante.

En las formulaciones de Prolac-H y Hyfoama 88 con Macrocel, el índice de consistencia de la fase continua sí aumentó de manera considerable, en especial para Prolac-H Macrocel. En estos sistemas donde se supone la formación de un sistema bifásico (no interacción) la capacidad de desdoblamiento de la proteína no se altera y el aumento del índice de consistencia tuvo un efecto de ligera disminución del rendimiento en Hyfoama 88-Macrocel.

Para AAE-GJ (complejo soluble), el índice de consistencia de la fase continua aumentó de manera importante al aumentar la concentración de GJ. La conjunción de estos dos efectos aunado al alto grado de ordenamiento de la Albúmina ocasionó una disminución del %FE en esta formulación al aumentar la concentración del estabilizante.

Gráfica 4

Efecto de la concentración de estabilizante en la expansión de la espuma (% FE).



El análisis estadístico para %FE nos muestra que todas las formulaciones y concentraciones muestran diferencia altamente significativa (Cuadro 10).

#### Cuadro 10

#### Resultados de pruebas estadísticas para % FE

Propiedad	Tipo de prueba	Nivel significativo	Inferencia	MCMD (5%) Significativo	MCMD (5%) No significativo
%FE Formulación	Factorial	1%	**	H88-GC, H88-MC, PH-GJ, PH-MC y AAE-GJ	
Conc. Estabilizante		1%	**	0%, 0.1%, 0.2%, 0.3% y 0.4%	

MCMD=METODO DE COMPARACIONES MULTIPLES DE DUNCAN

#### 3.2.3.2 Estabilidad del Volumen de Espuma (%FVS)

El 100% de estabilidad del volumen de la espuma (cuadro 11) se alcanzó a bajas concentraciones de estabilizante; la AAE y H88 la alcanzaron sin estabilizante; mientras que el Prolac-H con ambos estabilizantes la obtuvo hasta 0.2% de concentración. Es importante hacer notar que esta prueba se hace a los 30 minutos de haberse formado la espuma y el hecho de que a este tiempo se alcance 100% de estabilidad sin estabilizante no indica

que este no sea necesario, y se observó que después de los 30 minutos, a medida que se aumentaba la concentración de estabilizante, el volumen final de la espuma disminuía retardando el drenado del líquido (Cuadro 15, pág.88).

Como se muestra en el cuadro 11, la estabilidad del volumen de espuma (%FVS), es solo uno de los parámetros indicadores de la estabilidad y el hecho de que se tenga el 100% de FVS no garantiza una espuma estable, puesto que se pueden romper algunas burbujas o agrandar sin disminuir el volumen de la espuma. Este comportamiento es especialmente notorio en H88 que da burbujas grandes que crecen rápidamente con el tiempo, sobre todo a bajas concentraciones de estabilizante o sin este. Esta prueba no es la más indicada sino se complementa con las de líquido drenado y diámetro de burbuja.

**Cuadro 11**

**Efecto de la concentración de estabilizante en la estabilidad del volumen de la espuma (% FVS)**

FORMULACION	CONCENTRACION DE ESTABILIZANTE					
	0%	0.1%	0.2%	0.3%	0.4%	0.5%
H88-GC	100	100	100	100	100	100
H88-MC	100	100	100	100	100	100
PH-GJ	97.87	97.82	100	100	100	100
PH-MC	97.87	97.91	100	100	100	100
AAE-GJ	100	100	100	100	100	100

valores promedio

El análisis estadístico nos muestra que no existe diferencia significativa para las concentraciones de estabilizante, pero sí entre las formulaciones. La prueba de Duncan presenta que para el Prolac-H con los dos estabilizantes no hay diferencia, pero si la hay con respecto a H88 y AAE (Cuadro 12).

### Cuadro 12

#### Resultados de pruebas estadísticas para % FVS

Propiedad	Tipo de prueba	Nivel significativo	Inferencia	MCMD (5%) Significativo	MCMD (5%) No significativo
%FVS Formulación	Factorial	1%	**	PH-GJ y PH-MC	H88-MC, H88-GC y AAE-GJ
Conc. Estabilizante		1%	NS		

MCMD=METODO DE COMPARACIONES MULTIPLES DE DUNCAN

#### 3.2.3.3 Estabilidad del Líquido en la Espuma (%FLS)

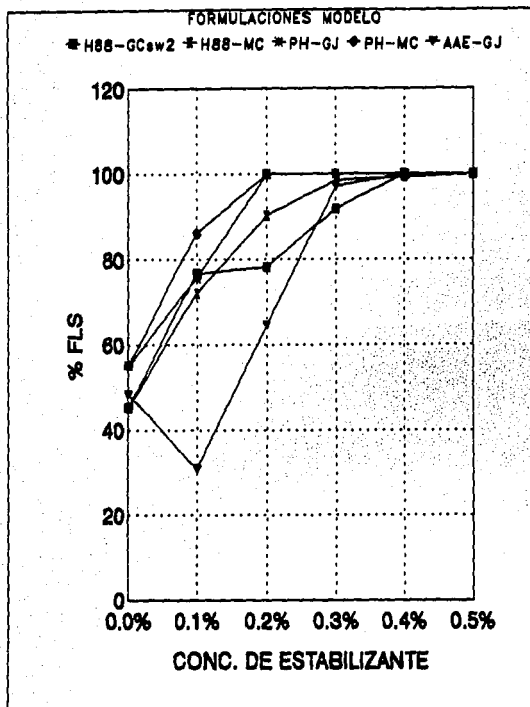
La estabilidad del líquido en la espuma fue más determinante en la estabilidad de la espuma y el comportamiento de las

formulaciones fué muy diferente. En la gráfica 5 se observa que a concentración de estabilizante a la que las formulaciones alcanzaron el 100% de % FLS varió de 0.2 a 0.5%.



Gráfica 5

Efecto de la concentración de estabilizante en la estabilidad del líquido en la espuma (% FLS)



El comportamiento que presentan las diferentes formulaciones a bajas concentraciones de estabilizante, se debe a que estas no han alcanzado el 100% de estabilidad del líquido en la espuma, además de que influye el tipo de sistema formado en cada formulación.

Apartir de 0.3 y 0.4% de concentración de estabilizante todas las formulaciones alcanzan el 100% de estabilidad de líquido en la espuma y ya no se observan cambios importantes.

El análisis estadístico nos muestra que existe diferencia altamente significativa (Cuadro 13).

### Cuadro 13

#### Resultados de pruebas estadísticas para % FLS

Propiedad	Tipo de prueba	Nivel significativo	Inferencia	MCMD (5%) Significativo	MCMD (5%) No significativo
%FLS Formulación	Factorial	1%	**	H88-GC, H88-MC, PH-GJ, PH-MC y 0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%	
Conc. Estabilizante		1%			

MCMD=METODO DE COMPARACIONES MULTIPLES DE DUNCAN

Para poder explicar mejor los resultados se retoman a continuación los factores de los que depende el drenado del líquido (cuadro 14).

El drenado del líquido es afectado tanto por las propiedades reológicas de la fase continua como por el comportamiento de la proteína en la interfase. Las películas elásticas y con alta viscosidad superficial, contribuyen a disminuir el drenado, ayudando a mantener uniforme el espesor de la película haciendo la más resistente al corte ocasionado por el propio drenado. La alta viscosidad de la fase continua disminuye la velocidad de drenado (6).

Para las formulaciones de PH-GJ y H88-GC se requirió de muy poco aumento del índice de consistencia (PH-GJ 0.08 y H88-GC 0.29) de la fase continua, para alcanzar el 100% de estabilidad del volumen del líquido de la espuma, lo cual puede explicarse considerando la estructura de estos estabilizantes que son polisacáridos sulfatados con gran capacidad de interaccionar con las proteínas para formar complejos solubles que mejoran las propiedades superficiales de la proteína (elasticidad) haciendo sus espumas más estables. H88 requirió mayor concentración de estabilizante y mayor valor de K de la fase continua para alcanzar 100% de FLS, lo cual puede indicar que: a) para mejorar las propiedades superficiales de la interfase de la proteína se requiere más estabilizante con H88; b) la estabilidad está dada por una mezcla de dos efectos: formación de complejos y aumento de K de la fase continua debido al polisacárido.

En el caso de PH-MC y H88-MC se trata de estabilizantes con grupos carboxilo con poca compatibilidad con la proteína al pH

del sistema formando un sistema bifásico que aumenta notablemente el índice de consistencia de la fase continua, siendo éste el principal mecanismo para disminuir el drenado, nuevamente se observa que la formulación de H88 requirió mayor concentración de estabilizante y por lo tanto mayor K de la fase continua, lo que indica que sus espumas, son básicamente más inestables. También puede deducirse que en H88-MC predomine el sistema de solución homogénea de ambos componentes en la misma fase y por lo tanto se requerirá una mayor concentración de macrocel para aumentar el índice de consistencia (K) y con esto aumentar la estabilidad. Si se revisa el porcentaje de FLS de las proteínas solas puede observarse que H88 es la que tiene la menor estabilidad, lo cual también ayuda a explicar que con ambos tipos de estabilizante requirió mayor concentración. Finalmente para AAE-GJ se forma un posiblemente un sistema de complejo soluble donde influye tanto la interacción proteína-polisacárido, como el aumento del índice de consistencia de la fase continua, en la estabilidad (24).

Cuadro 14

Concentración e índice de consistencia de la fase continua a las que cada formulación alcanzó el 100% de FLS

FORMULACION	VALOR DE K AL QUE EL %FLS ALCANZO 100%	CONC. A LA QUE EL %FLS ALCANZO 100%
PH-MC	0.062	0.2%
PH-GJ	0.08	0.2%
H88-GC	0.29	0.4%
AAE-GJ	1.13	0.4%
H88-MC	1.92	0.5%

valores promedio  
 $K(\text{Din. seg} \wedge n / \text{cm} \wedge 2)$

Como puede observarse en el cuadro 14 las concentraciones de estabilizante y su correspondiente índice de consistencia de la fase continua, a los que cada formulación alcanzó el 100% de FLS fueron diferentes lo cual confirma los diferentes tipos de sistemas formados. El que en algunas formulaciones se alcance el 100% de FLS a concentraciones bajas, no implica que ésta sea la concentración ideal, pues esta prueba se hace a los 30 minutos, y mayor concentración de estabilizante puede darle a la espuma mucha mayor duración así como mejores propiedades físicas (densidad, diámetro de burbuja, consistencia de la espuma). En el cuadro 15 se muestra el tiempo en que cada formulación a cada concentración de estabilizante empezó a drenar. Como puede

notarse, sin estabilizante o a bajas concentraciones de éste, AAE dreña más rápido, pero a concentraciones altas, la duración aumenta notablemente, pero con decremento de rendimiento, debido al aumento del índice de consistencia de la fase continua.

**Cuadro 15**

**Efecto de la concentración de estabilizante en la duración total de espumas**

CONCENTRACION DE ESTABILIZANTE	FORMULACION				
	H88-GC	H88-MC	PH-GJ	PH-MC	AAE-GJ
<b>0.0%</b>					
VE (ml)	3000	3000	2850	2850	1400
TD (min)	20	20	20	20	10
<b>0.1%</b>					
VE (ml)	2750	2750	2800	2400	1200
TD (min)	20	20	20	20	10
<b>0.2%</b>					
VE (ml)	2500	2500	2850	2500	1000
TD (min)	20	20	40	60	10
<b>0.3%</b>					
VE (ml)	2450	2450	2850	2400	900
TD (min)	30	30	60	80	20
<b>0.4%</b>					
VE (ml)	2500	2500	2800	2350	800
TD (min)	40	40	70	120	*
<b>0.5%</b>					
VE (ml)	2300	2300	2800	2350	750
TD (min)	50	50	180	170	*

VE: Volumen final de espuma

TD: Tiempo en el que comenzó a drenar

\* No hubo drenado de la espuma

Como se muestra en el cuadro 15 a partir de 0.2% de estabilizante, las formulaciones con Prolac-H, duran más tiempo antes de empezar a drenar que las de H88. Comparando todas las formulaciones a 0.5% de estabilizante donde el índice de consistencia es alto, se observa que H88-MC fue la que más pronto drenó. PH-MC y AAE-GJ fueron las espumas en las que más tardó en iniciarse el drenado, pero PH-MC drenó antes, a pesar de tener una K de la fase continua considerablemente más alta. Así mismo H88-MC fue la formulación con el drenado más rápido, a pesar de tener una K de la fase continua mayor que H88-GC y PH-GJ. Tanto para PH como H88, las formulaciones con macrocel necesitaron un mayor valor de K de la fase continua para tener una estabilidad de líquido similar (Cuadros 5, 14, 15).

Todo lo anterior muestra que si bien dentro de una formulación el aumento de K de la fase continua aumenta la estabilidad, no necesariamente la formulación con mayor valor de K de la fase continua presenta la mayor estabilidad y que una formulación con K bajo puede tener muy buena estabilidad (PH-GJ) si las condiciones del sistema favorecen la formación de algún complejo con buenas propiedades superficiales.

El análisis estadístico muestra que tanto las concentraciones como las formulaciones ocasionan diferencia significativa en el %FLS. La prueba de Duncan muestra que tanto las formulaciones como las concentraciones son diferentes (Cuadro 13, pág.84).

### 3.3 Comparación de Métodos (Burbujeo-Drenado y Batido-Drenado)

Para hacer la comparación de ambos métodos definiremos que parámetros se refieren a propiedades similares.

a) %GR %FE( %Rendimiento )

b) %DR %LD( %Drenado )

En general los dos métodos coinciden en que los valores más bajos de rendimiento los tiene la AAE-GJ, el cual se ve afectado por el estabilizante.

En el método de burbujeo-drenado el Prolac-H dió mayor rendimiento que el Hyfoama 88 sucediendo lo contrario en el batido-drenado. Con respecto al aumento de la concentración de estabilizante, en el rendimiento no mostró un comportamiento definido. En la retención del líquido de manera general, se observa que ambos métodos coinciden en indicar que las espumas de Prolac-H y AAE alcanzaron la estabilidad a bajas concentraciones de estabilizante y que a medida que aumenta la concentración aumenta la retención del líquido.

El método de burbujeo-drenado si bien permite observar los efectos más notorios cuando el efecto de lo que se estaba hablando no es muy grande, no muestra un comportamiento definido y esto se puede atribuir a los siguientes factores:

- a) Se está usando aire como gas en lugar de  $\text{CO}_2$  o  $\text{N}_2$  líquido.
- b) El aire se inyecta con una bomba de vacío, que con el tiempo se calienta variando la temperatura y la velocidad del aire.
- c) No se disponía de un baño de agua a temperatura constante para mantener constante la temperatura de la columna.
- d) El sistema de control de flujo de aire no era el adecuado.



### 3.4 Propiedades Físicas

Las propiedades físicas más importantes de las espumas son: consistencia de la espuma, diámetro de burbuja y densidad. Estas determinan el aspecto de la espuma e influyen en sus propiedades reológicas y su aplicación. Las propiedades físicas de una espuma pueden estar determinadas por el tipo de proteína y el estabilizante utilizado.

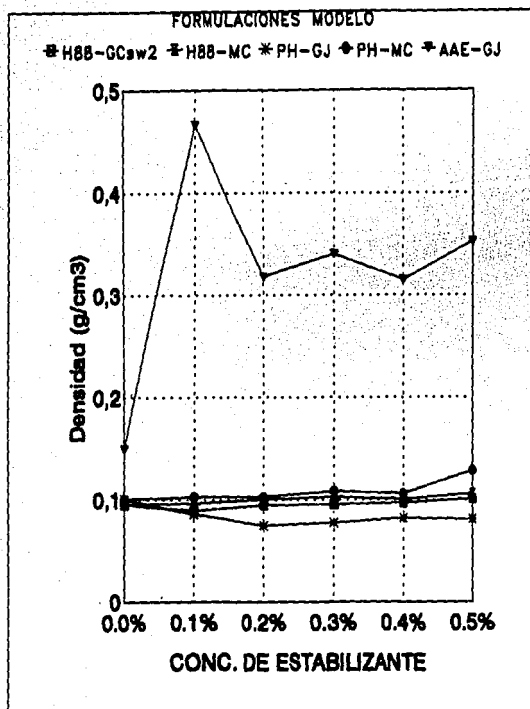
#### 3.4.1 Densidad

En la gráfica 6 observamos que la AAE-GJ en todas las concentraciones de estabilizante presenta una mayor densidad con respecto a las demás (0.14-0.35), mientras que las formulaciones de Prolac-H y Hyfoama 88 van de 0.09-0.128; esto está relacionado con el rendimiento ya que a mayor rendimiento menor densidad.

El aumento de concentración de estabilizante prácticamente no tiene efecto en las formulaciones de Prolac-H y Hyfoama 88 (gráfica 6) y aumenta considerablemente la densidad de la espuma de AAE-GJ, lo cual se explica por la disminución del rendimiento que ocasiona en esta espuma el aumento de concentración de estabilizante; ya que esta formulación es un complejo soluble donde también influye su estructura.

Gráfica 6

Efecto de la concentración de estabilizante en la densidad



El análisis estadístico nos muestra que existe diferencia altamente significativa (Cuadro 16).

**Cuadro 16**

**Resultados de pruebas estadísticas para densidad, diámetro de burbuja y consistencia de la espuma**

Propiedad	Tipo de prueba	Nivel significativo	Inferencia	MCMD (5%) Significativo	MCMD (5%) No significativo
Prop. Físicas Densidad Formulación	Factorial	1%	**	AAE-GJ	H88-GC, H88-MC PH-GJ y PH-MC 0%, 0.2%, 0.3%, 0.4% y 0.5%
Conc. Estabilizante		1%	**	0.1%	
Diám. de Burbuja Formulación	Factorial	1%	**	AAE-GJ, PH-MC y H88-MC	H88-GC y PH-GJ
Conc. Estabilizante		1%	**	0%, 0.1%, 0.2% y 0.3%	
Consistencia Formulación	Factorial	1%	**	H88-GC, H88-MC, PH-GJ, PH-MC y AAE-GJ	0.3%, 0.4% y 0.5%
Conc. Estabilizante		1%	**		

MCMD=METODO DE COMPARACIONES MULTIPLES DE DUNCAN

### 3.4.2 Diámetro de Burbuja

Como se puede observar en la gráfica 7 el diámetro de burbuja disminuye al aumentar la concentración de estabilizante. El PH-MC presenta los valores más altos de diámetro de burbuja, seguido de PH-GJ, H88-GC y AAE-GJ que presenta los más bajos, mientras que

sin estabilizante la AAE mostró el menor diámetro de burbuja.

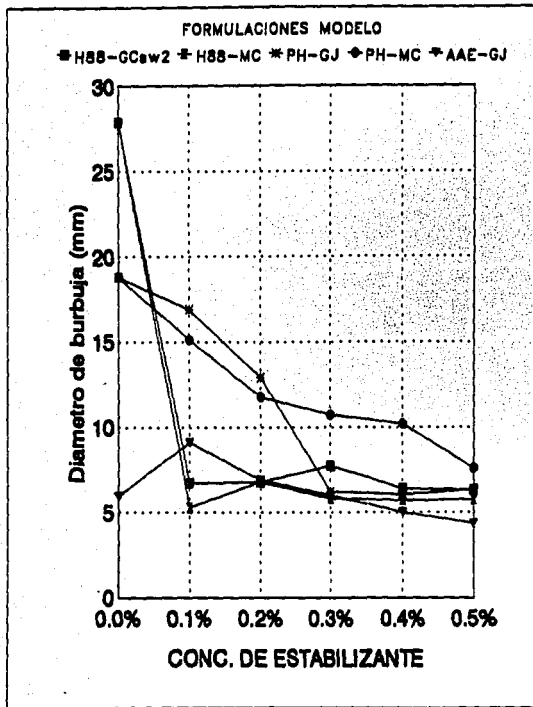
Prolac-H y H88 son proteínas que se desdoblán fácilmente por lo que la formación de la espuma es rápida y por lo tanto el diámetro de burbuja es mayor y en la AAE la formación de la espuma es muy lenta debido a su estructura globular y por consiguiente el diámetro de burbuja es menor.

A concentraciones altas de estabilizante los diámetros de burbuja de Prolac-H y Hyfoama 88 se aproximan a los de la AAE debido a que los sistemas formados le imparten mejores propiedades, como homogeneidad en la espuma, estabilidad y menor diámetro de burbuja.

El análisis estadístico nos muestra que existe diferencia altamente significativa (Cuadro 16).

Gráfica 7

Efecto de la concentración de estabilizante en el diámetro de burbuja.



### 3.4.3 Consistencia de la Espuma

En la gráfica 8 se observa que las espumas de Prolac-H fueron las que presentaron mayor consistencia con ambos estabilizantes a pesar de que PH-GJ tuvo menores valores de índice de consistencia (K) de la fase continua.

En estas espumas contribuyó de manera importante en la consistencia de la espuma, el aumento de valor de  $\phi$  debido al alto rendimiento. En las espumas con macrocel contribuye además el aumento de K de la fase continua (Apéndice 6).

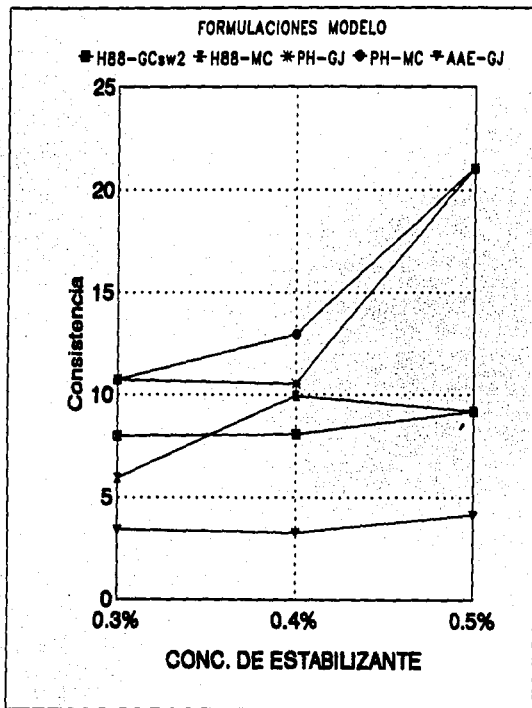
Hyfoama 88 presentó menor consistencia que Prolac-H pero mayor que Albúmina de alta espuma, a pesar de que las espumas de Hyfoama 88 tienen el mayor rendimiento (Gráfica 8). En estas espumas la mayor contribución a la consistencia se debió a la viscosidad de la fase continua para H88-MC y a las propiedades de interfase para H88-GC.

El aumento de concentración de estabilizante aumentó la consistencia de las espumas de Prolac-H, al aumentar la  $\mu$  de la fase continua y no afectar el rendimiento. En H88-MC la consistencia de la espuma solo aumentó ligeramente al aumentar la viscosidad de la fase continua, ya que esta, disminuyó el rendimiento. Para H88-GC, cuya consistencia de la espuma tuvo muy poco cambio al aumentar la concentración de estabilizante, hubo un balance entre el efecto de éste que disminuyó ligeramente el rendimiento y aumentó de manera moderada la viscosidad de la fase continua. Un efecto similar se presentó para la AAE-GJ.

Solo en el caso de AAE que tuvo menor diámetro de burbuja, el valor bajo de  $\phi$  (bajo rendimiento) contribuyó a que presentara una menor consistencia en comparación con las otras aún cuando la viscosidad de la fase continua no fue tan baja.

Gráfica 8

Efecto de la concentración de estabilizante en la consistencia de la espuma.



El análisis estadístico nos muestra que existe diferencia altamente significativa (Cuadro 16, pág 93).

#### 3.4.4 Relación entre Propiedades Físicas.

Las propiedades físicas consistencia y diámetro de burbuja se encuentran íntimamente ligados ya que al disminuir el diámetro de burbuja aumenta la consistencia, presentándose en todas las formulaciones excepto en AAE.

La densidad está relacionada con el rendimiento ya que en todas las formulaciones no se ven afectadas al incrementar la concentración de estabilizante, mientras que en la AAE presenta un aumento importante en la densidad y su rendimiento disminuye notablemente. Esto se debe al tipo de complejo que se forma en cada formulación y a la concentración de estabilizante.



## CONCLUSIONES

#### 4 CONCLUSIONES

Para todas las formulaciones la fase continua presentó un comportamiento reológico pseudoplástico. Conforme aumentó la concentración de estabilizante, aumentó el índice de consistencia (K) y disminuyó el índice de comportamiento al flujo (n), variando de manera importante la magnitud del aumento de K en función del tipo de proteína y estabilizante que al coexistir en un mismo medio forman diferentes sistemas.

Las proteínas Prolac-H (PH) y Hyfoama 88 (H88) con estructura desordenada en presencia de Macrocel (MC) que es un polisacárido con grupos COOH formó un sistema bifásico (no interacción) aumentando de manera considerable el valor de K, o una solución homogénea de ambos componentes sin interactuar entre sí. Estas mismas proteínas con polisacáridos sulfatados (GJ, GC) formaron posiblemente complejos solubles con mejores propiedades de superficie pero bajo valor de K. La Albúmina de Alta Espuma (AAE) con Genuvisco J (GJ) pudo formar un complejo soluble con buenas propiedades superficiales.

En el método de Burbujeo-Drenado, cada formulación, requirió de flujos de aire diferentes en función de la concentración de estabilizante y el tipo de sistema formado. Las espumas de AAE presentaron el menor valor de %GR debido a su bajo poder espumante (proteína ordenada) y el menor %DR (mayor estabilidad), y al aumentar K disminuyó el %DR en todas las formulaciones. Las formulaciones de AAE y PH dieron los menores valores de %DR y este disminuyó al aumentar la concentración de estabilizante. En el manejo de este método se presentaron problemas de control del flujo

de aire y la temperatura por lo que los datos no son muy confiables.

En el método de Batido-Drenado las formulaciones que presentaron el mayor rendimiento fue H88 seguida de PH. La AAE-GJ fue la que tuvo menor rendimiento con respecto a los demás. El aumento de concentración de estabilizante no afecta notablemente al rendimiento en PH y H88, pero sí en AAE-GJ que presentó valores muy bajos de %FE.

Las espumas de AAE-GJ y H88-GC alcanzaron el 100% de FLS a 0.4% de concentración de estabilizante, mientras que el H88-MC lo alcanzó a concentración de 0.5% de estabilizante, y el PH con los dos estabilizantes lo alcanzó a 0.2%. Al aumentar el índice de consistencia (K) se observó una disminución en el rendimiento de las espumas y se ve un aumento en el %FLS.

El método de Burbujeo-Drenado y Batido-Drenado, a pesar de que son métodos muy diferentes, se encuentra similitud en la evaluación del %FLS y %DR.

La consistencia y diámetro de burbuja están determinadas por el índice de consistencia (K) cuyo aumento mejora notablemente estas propiedades. Al aumentar K, aumenta la consistencia y disminuye el diámetro de burbuja. El ProIac-H presentó los valores más altos de consistencia y diámetro de burbuja seguido de H88 y AAE-GJ. La Densidad aumenta al incrementar la concentración de estabilizante, siendo la AAE-GJ la que presenta los más altos valores.

Todo lo anterior sugiere que si bien la viscosidad de la fase continua es determinante en la estabilidad y características físicas de las espumas, la interacción polisacárido aniónico-proteína juega un papel fundamental, pues además de influir en las propiedades reológicas de la fase continua, mejora las propiedades de la película interfacial favoreciendo notablemente las características de proteínas con alto poder espumante pero baja estabilidad como la caseína (PH) y la proteína de gluten de trigo (H88), pudiéndose obtener espumas de alta consistencia, baja densidad y diámetro de burbuja adecuado. Esta interacción puede mejorarse variando el pH y la fuerza iónica en el sistema.

Las formulaciones en estudio dan nuevas opciones para la sustitución de la Albúmina de huevo, tanto en costo como en rendimiento y estabilidad de sus espumas; teniendo su aplicación en la industria de los alimentos, dependiendo del tipo de producto que se desea obtener, como por ejemplo en una base de helado utilizaríamos al Hyfoama 88 o Prolac-H; ya que su rendimiento y estabilidad son altas en la concentración de 0.3% de concentración de estabilizante.

En el caso de confitería, panadería y repostería, también pueden utilizarse el Hyfoama 88 y Prolac-H con bajas concentraciones de estabilizante lo cual implica menor costo que la Albúmina de Alta Espuma.

## RECOMENDACIONES

## 5 RECOMENDACIONES

El pH y fuerza iónica influyen en el tipo de sistema formado cuando coexisten proteínas y polisacáridos aniónicos en el mismo medio.

En este estudio se trabajó al pH natural de cada sistema. Se recomienda para posteriores estudios evaluar el efecto del pH y fuerza iónica que son factores importantes en las propiedades reológicas de la fase continua y en el rendimiento, estabilidad y propiedades físicas de las espumas midiendo así mismo otros factores como solubilidad, tensión superficial y su cambio con el tiempo. También ayuda a la interpretación de los resultados, la medición de elasticidad de la película interfacial. Esta información es importante tanto desde el punto de vista del conocimiento básico como por su aplicación en el área de espumas en alimentos.

Otro aspecto importante a estudiar sería la caracterización reológica de las espumas por el método propuesto por Princen y Kiss (1981)(29) para emulsiones y espumas.

También se recomienda probar la aplicación de las formulaciones estudiadas en diferentes productos de repostería, confitería y panadería.

En la columna de aereación se recomienda utilizar  $N_2$  o  $CO_2$  en lugar de aire, tener un mejor control de temperatura y válvulas que controlen bien el flujo de aire. Una vez instrumentado tiene la ventaja de que se ocupa menos muestra y es más rápido.

## APENDICES

## APENDICE 1

### PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL VISCOSIMETRO (4).

El viscosímetro hace rotar un elemento sensor en un fluido y mide el torque necesario para vencer la resistencia o la viscosidad e inducir de esta forma el movimiento. El elemento inmerso es una aguja cónica la cual es manejada por un resorte de cobre-berilio. El grado de torsión que sufre el resorte se detecta por medio de un transductor rotacional y es proporcional a la viscosidad del fluido. La muestra del fluido se encuentra entre el cono y el plato estacionario por lo que está sujeto a una velocidad de deformación uniforme. La viscosidad es proporcional a la velocidad del cono y está relacionado con el diámetro y la forma del cono. Con el torque y la velocidad del cono se obtiene  $\tau$  (tensor de esfuerzos) y  $\dot{\gamma}$  (velocidad de deformación) respectivamente. Para el viscosímetro Brookfield geometría cono y plato, las relaciones matemáticas son:

$$\text{Esfuerzo cortante (dinas/cm)} = \frac{T}{2/3 \pi r^3}$$

$$\text{Velocidad de deformación (seg}^{-1}\text{)} = \frac{W}{\text{sen } \theta}$$

$$\delta \gamma = (\text{SRC})N$$



$$\text{Viscosidad (cp, mpa.s)} = \frac{\tau \times 100}{\dot{\gamma}}$$

$\delta$

$$\mu = \frac{(\text{torque}) (\text{SPK}) (10,000)}{\text{rpm}}$$

Donde:

T=% de la escala total del torque (dinas.cm)

r=radio del cono (cm)

w=velocidad del cono (rad/seg)

$\theta$ =ángulo del cono (grados)

N=RPM

SRC=constante de velocidad de deformación que depende del tipo de cono

SPK=constante del tipo de cono

## APENDICE 2

### DETERMINACION DEL COMPORTAMIENTO Y CALCULO DE LOS PARAMETROS REOLOGICOS (4).

Por referencia bibliográfica, las dispersiones de los estabilizantes empleados obedecen a la ley de la potencia, presentando un comportamiento pseudoplástico.

$$\tau = K \gamma^n$$

LEY DE LA POTENCIA

K= índice de consistencia

n= índice de comportamiento al flujo

$\tau$ = esfuerzo cortante

$\gamma$ = velocidad de deformación

Aplicando logaritmos se obtiene la ecuación de una recta del tipo  $Y = mx + b$

$$\log \tau = \log K + n \log \gamma$$

Donde:

$Y = \log \tau$

$X = \log \gamma$

$b = \log K$

$m = n$

De los datos que se imprimieron de la caracterización reológica de cada formulación se obtuvo la regresión de  $\log \tau$  vs  $\log \gamma$  y se calcularon los valores de  $n$  (índice de comportamiento) y  $K$  (índice de consistencia), tomando  $n$  como la pendiente y  $K$  como el antilogaritmo de la ordenada al origen. Se checó en las gráficas  $\tau$  vs  $\gamma$  que no hubiera esfuerzo inicial y con los valores de la correlación se confirmó que corresponden a la ley de la potencia.

APENDICE 3

FORMULAS PARA LA OBTENCION DE %GI, %GR Y %DR DEL METODO DE BURBUJEO-DRENADO (35).

$$\% \text{ GI} = \frac{100 (Fr) (tf)}{58 - vi}$$

$$\% \text{ Gr} = \frac{(58 - vi) (100)}{(Fr) (tf)}$$

$$\% \text{ Dr} = \frac{100 (vd)}{vi}$$

Donde:

Fr = velocidad de flujo de aire (ml/min)

tf = tiempo de llenado de la columna con espuma (min)

vi = volumen de líquido inyectado (ml)

vd = volumen de líquido drenado (ml)

APENDICE 4

FORMULAS PARA EL CALCULO DEL %FE, %FVS Y %FLS, DEL METODO BATIDO-DRENADO (25).

$$\%FE = \frac{(VI) - 250}{250} \times 100$$

$$\%FVS = \frac{VE}{VI} \times 100$$

$$\%LD = \frac{VD}{250} \times 100$$

$$\%FLS = 100 - LD$$

Donde:

VI = volumen inicial de espuma incluyendo el volumen de líquido (ml), si es que no se incorporo todo a la espuma

VE = volumen de espuma después de 30 minutos

VD = volumen de líquido drenado después de 30 minutos

%FE = porcentaje de expansión de la espuma

%FVS = porcentaje de estabilidad del volumen de espuma

%LD = porcentaje de líquido drenado

%FLS = porcentaje de estabilidad del líquido en la espuma

250 = volumen de dispersión proteína-estabilizante-azúcar antes de  
batir

## APENDICE 5

### PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL ADAPTADOR HELIPATH (3).

Para la medición de viscosidad de muestras como pastas, cremas, geles suaves y espumas se presentan problemas especiales con el viscosímetro convencional, debido a la geometría de los husos (cilindros o discos) que al girar en la muestra la destruyen o hacen huecos, dando lecturas erróneas, el adaptador Helipath es un accesorio que elimina estos problemas.

El adaptador Helipath es un motor que sube y baja la cabeza del viscosímetro Brookfield sobre una cremallera a una velocidad de 7/8 in por minuto. Los husos con agujas en forma de barra-T invertida, giran mientras el viscosímetro se desplaza verticalmente, describen un movimiento helicoidal sobre la muestra, sin destruir su estructura ni hacer huecos. Como no se han desarrollado los métodos matemáticos para calcular  $\tau$  y  $\gamma$  a partir de las lecturas, los datos se reportan como consistencia en unidades Brookfield (VB).

## APENDICE 6

### CONSISTENCIA DE LA ESPUMA (29).

Las espumas presentan propiedades reológicas peculiares cuando la fracción del volumen de la fase dispersa ( $\phi$ ), sobrepasa la configuración de esfera compacta ( $\phi_0$ ). Para sistemas polidispersos  $\phi_0$  es aproximadamente 0.72.

H.M. Princen y A.D. Kiss (29) proponen la siguiente ecuación para describir el efecto de las propiedades físicas de la espuma en su consistencia.

$$\mu_e = \tau_0/\gamma + 32 (\phi - 0.73) \mu (\mu R 32 \gamma/\sigma)^{-1/2}$$

donde:

$\mu_e$ : viscosidad de la espuma

$\tau_0$ : esfuerzo inicial

$\mu$ : viscosidad de la fase continua newtoniana

$\gamma$ : velocidad de corte

$\sigma$ : tensión interfacial

R32: radio de la burbuja

Cuando  $\phi > \phi_0$ , las burbujas o gotas se juntan unas con otras. Estas permanecen separadas por una película delgada de la fase continua, que es estabilizada contra la ruptura por adsorción de capas de surfactante o polímero. Conforme  $\phi$  tiende a la unidad, las burbujas adquieren una forma poliédrica. Debido a su agrupamiento, cuando tal sistema está sujeto a la deformación de corte a una velocidad



pequeña, ésta se comporta como un sólido elástico puro hasta un esfuerzo inicial  $\tau_0$ , sobre del cual el flujo es iniciado y el sistema llega a ser pseudoplástico.

Esta ecuación nos permite observar el efecto que muestra el diámetro de burbuja, tensión interfacial; % de aire incorporado (fracción volumen de la fase dispersa) y  $\mu$  de la fase continua sobre la consistencia de la espuma. Es decir que si aumenta la tensión interfacial, la consistencia disminuye, mientras que al aumentar el radio de las burbujas y al disminuir la fracción volumen de la fase dispersa la consistencia disminuye.

APENDICE 7

pH de formulaciones modelo.

CONCENTRACION DE ESTABILIZANTE	FORMULACION				
	H88-GC	H88-MC	PH-GJ	PH-MC	AAE-GJ
0.0%	10.4	10.4	10.0	10.3	6.4
0.1%	10.8	10.4	10.0	10.3	6.6
0.2%	10.8	10.5	10.0	10.3	6.5
0.3%	10.8	10.4	10.1	10.2	6.5
0.4%	10.4	10.4	10.1	10.2	6.4
0.5%	10.7	10.4	10.2	10.2	6.4

Apéndice 8: Valores de desviación estandar y coeficiente de variación en el %GR y %DR

F	CE					
	0.0%	0.1%	0.2%	0.3%	0.4%	0.5%
PH-GJ						
%GR						
S	7.58	0	9.24	2.68	5.76	2.58
CV	8.86	0	9.15	4.68	8.06	2.53
%DR						
S	0	0	0	5.96	5.16	6.94
CV	0	0	0	14.65	9.11	15.56
PH-MC						
%GR						
S	7.58	0	0.83	0	1.41	3.7
CV	8.73	0	0.96	0	1.75	4.07
%DR						
S	0	0	8.14	0	3.35	0
CV	0	0	12.08	0	10.64	0
H88-GC						
%GR						
S	3.92	4.28	3	6.66	9.81	4.53
CV	5.52	5.97	5.71	13.71	13.44	7.72
%DR						
S	0	0	0	0	0	0
CV	0	0	0	0	0	0
H88-MC						
%GR						
S	3.92	2.71	2.1	1.88	7.12	*
CV	5.52	3.56	3.07	2.74	8.7	*
%DR						
S	0	9.5	6.94	9.12	9.12	*
CV	0	12.38	10.64	10.13	10.13	*
AAE-GJ						
%GR						
S	2.37	14.62	0	1.37	1.82	*
CV	4.3	21.06	0	1.98	5.95	*
%DR						
S	11.14	7.82	13.6	5.47	3.35	*
CV	12.81	9.31	18.83	9.78	4.89	*

F=FORMULACION

CE=CONCENTRACION DE ESTABILIZANTE

S=DESVIACION ESTANDAR

CV=COEFICIENTE DE VARIACION

## BIBLIOGRAFIA

## 7 BIBLIOGRAFIA

- 1) Badu, D.S. (1986) QUIMICA DE LOS ALIMENTOS. Ed. Alhambra Mexicana, México, 4<sup>a</sup> edición, pág.: 76-349
- 2) Belitz, Hans-Dieter. (1988) QUIMICA DE LOS ALIMENTOS. Acribia Zaragoza, España, 2<sup>a</sup> edición, cap. 11, pág.: 433-446
- 3) BROOKFIELD ACCESSORIES. BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES, INC. U.S.A.
- 4) BROOKFIELD RHEOSET VISCOMETER. Operating Instructions Version 1.0, Manual No.M/88-131-A. Brookfield Engineering Laboratories, Inc. U.S.A
- 5) Cherry, J.P. (1982) PROTEIN DETERIORATION: MECHANISMS AND FUNCTIONALITY. Ed. ACS, SYMP, Ser.206, pág.: 301-326
- 6) Duncan J., S. (1977) INTRODUCCION A LA QUIMICA DE SUPERFICIES Y COLOIDES. Ed Alhambra Mexicana, México, 2<sup>a</sup> edición, Cap. 4 y 10
- 7) Duncan J. Shaw. (1980) INTRODUCTION TO COLLOID AND SURFACE CHEMISTRY. Ed. Butter Worths, Londres, 3<sup>a</sup> edición, pág.: 232-244
- 8) Fennema, O. R. (1985) FOOD CHEMISTRY. FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY. Marcel Dekker, Inc., N.Y., 2<sup>a</sup> edición, cap.14
- 9) Fennema, O. R. (1982) INTRODUCCION A LA CIENCIA DE LOS ALIMENTOS. Ed. Reverté S.A., España, 1<sup>a</sup> edición, cap. 12, pág.: 629-670

- 10)GENUVISCOS. (1986) Química Hércules.
- 11)Gliksman, M. (1976) GUM TECHNOLOGY IN THE FOOD INDUSTRY. Academic Press Inc, N.Y., 1<sup>a</sup> edición, pág.: 214-233
- 12)Halling, J. P. (1981) PROTEIN-STABILIZED FOAMS AND EMULSIONS. CRC, Critical Reviews in Food Science and Nutrition. October. Pág.:158
- 13)Harper, Harold Antony. (1982) BIOQUIMICA DE HARPER. Ed. El Manual Moderno S.A. deC.V., México, 18<sup>ava</sup>, pág.: 31-40
- 14)Hui, Y.H. (1992) ENCYCLOPEDIA OF FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY. Ed. John Wiley and Sons INC, N.Y., Vol. 1, pág.: 316-317
- 15)Hui, Y.H. (1992) ENCYCLOPEDIA OF FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY. Ed. John Wiley and Sons INC, N.Y., Vol. 3, pág.:2198-2199
- 16)HYFOAMA SERIES. Quest International
- 17)Información Básica sobre CMC-AMTEX. Química AMTEX S.A. de C.V.
- 18)Kim, S. H.,J.E. Kinsella. (1987)SURFACE ACTIVE PROPERTIES OF FOODS PROTEINS: EFECTS OF REDUCTION OF DISULFIDE BONDS ON FILM PROPERTIES AND FOAM STABILITY OF GLYCININ. Journal of Food Science, vol.52, No.1, N.Y., pág.: 128-131
- 19)Kirk-Othmer, Wiley-Interscience. (1982) FOAMS. Encyclopedia of Chemical Technology, Vol. 11, N.Y., 4<sup>a</sup> edición, pág.: 127-145

20)Krumel K.L., N. Sarkar. (1975) FLOW PROPERTIES OF GUMS USEFUL TO THE FOOD INDUSTRY. Food Technology. Abril

21)MACROCEL. Celanese MexicanaS.A.

22)Marine Colloids. Application Bulletin FMC Corporation, Marine Colloids Division Litex A/S, 1985

23)Mitchell J. R.O, D.A. Ledward. (1986) FUNCTIONAL PROPERTIES OF FOOD MACROMOLECULES. Ed. Elsevier Applied Science Publishers, Londres, 1<sup>a</sup> edición, cap.7, pág.: 315-353

24)Mitchell J.R., D.A. Ledward. (1986) FUNCTIONAL PROPERTIES OF FOOD MACROMOLECULES. Ed. Elsevier Applied Science Publishers, Londres, 1<sup>a</sup> edición, cap.9, pág.: 385-415

25)Patel P.D., A.M. Stripp, J.F. Fry. (1988) WHIPPING TEST FOR THE DETERMINATION OF FOAMING CAPACITY OF PROTEIN: A COLABORATIVE STUDY. International Journal of Food Science and Technology, Amsterdam, vol.23, pág.: 67-73

26)Paul and Palmer. (1972) FOOD THEORY AND APPLICATIONS. Ed. John Wiley and Sons, INC., N.Y. 1<sup>a</sup> edición, cap. 2 y 9

27)Phillips, L.G., Z. Haque, J.E. Kinsella. (1987) JOURNAL OF FOOD SCIENCE. A method for the measurement of foam formation and stability. Vol.52 ,No.4, N.Y., Pág.: 1074-1077

28)Phillips, M.C. (1981) FOOD TECHNOLOGY. Protein Conformation at liquid interfaces and its role in stabilizing emulsions and foams. Enero, volumen 35, No. 1, pág.: 50-57

29)Princen H.M., A.D. Kiss. (1989) RHEOLOGY OF FOAMS AND HTGLY CONCENTRATED EMULSIONS. Journal of Colloid and Interface Science. vol 128, No.1, Marzo, pág.: 176-187

30)PROLAC-H. Arancia. División de productos especiales.

31)Rha, Ch., P. Pradipasena. (1986) FUNCTIONAL PROPERTIES OF FOOD MACROMOLECULES. Viscosity of proteins. Cap.2. Ed. Elsevier Applied Science Publishers, Londres, 1<sup>a</sup> edición, pág.: 79-120

32)Stadelman, W. J, O.J. Cotterill. (1977) EGG SCIENCE AND TECHNOLOGY. Ed. Avi Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut, 2<sup>a</sup> edición, cap.6, pág.: 65-91

33)Voyutsky, S. (1978) COLLOID CHEMISTRY. Ed. Mir Publisher, Moscow, 2<sup>a</sup> edición, pág.: 422-430

34)Walpole, R.E., R.H. Myers. (1983)PROBABILIDAD Y ESTADISTICA PARA INGENIEROS. Ed. Interamericana S.A. de C.V., México, 2<sup>a</sup> edición, cap. 10 y 11

35)Waniska R. D., J.E. Kinsella. (1979) FOAMING PROPERTIES OF PROTEINS: EVALUATION OF A COLUMN AEREATION APPARATUS USING OVALBUMIN. Journal of Food Science, Vol.44, pág.: 1398-1402



36)Waniska, R.D., J.K. Shetty and J.E. Kinsella. (1981)  
PROTEIN-STABILIZED EMULSIONS: EFFECTS OF MODIFICATION ON THE  
EMULSIFYING ACTIVITY OF BOVINE SERUM ALBUMIN IN A MODEL SYSTEM. J.  
Agric. Food Chem., vol.29, No.4, pág.: 826-831