



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EFECTO DE MEZCLAS DE PROTEÍNAS Y POLISACÁRIDOS SOBRE LA
ESTABILIDAD Y LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE ESPUMAS”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICA DE ALIMENTOS**

PRESENTA

EVA MARÍA GARCÍA GARCÍA



MÉXICO, D.F.

AÑO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Josefina Esperanza Viades Trejo

VOCAL: Hermilo Leal Lara

SECRETARIO: Alberto Tecante Coronel

1er. SUPLENTE: Sandra Pérez Munguía

2° SUPLENTE: Mariana Ramírez Gilly

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO 313, CONJUNTO E, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Alberto Tecante Coronel

SUPERVISOR TÉCNICO:

I. A. Mariana Ramírez Gilly

SUSTENTANTE:

Eva María García García

Parte de los resultados de este trabajo están publicados en:

Eva M. García-García, Mariana Ramírez-Gilly, Alberto Tecante (2014). Formation, stability, flow and viscoelastic properties of foams prepared with whey protein isolate and its individual mixtures with xanthan, guar and refined sugar. En Wyatt, M. ed., *Whey Proteins: Functional Properties, Production and Health Benefits*. New York: NOVA SCIENCE PUBLISHERS INC. pp. 117-148. **ISBN:** 978-1-63463-116-7 (hardcover), **ISBN:** 978-1-63463-147-1 (eBook).

ÍNDICE

LISTA DE NOMENCLATURA	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVOS	10
HIPÓTESIS	11
CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES	12
I.I ESPUMAS	12
I.II PROTEÍNAS	13
I.II.I AISLADO DE PROTEÍNA DE SUERO DE LECHE	13
I.III AZÚCAR REFINADA	14
I. IV POLISACÁRIDOS	15
I. IV. I GUAR.....	15
I. IV. II XANTANA	16
I.V INTERACCIÓN PROTEÍNA-POLISACÁRIDO.....	17
I.VI PROPIEDADES REOLÓGICAS	18
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	20
II.I DIAGRAMA GENERAL.....	20
II. II MATERIALES.....	21
II .III MÉTODOS	21
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
III.I DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN	24
III.II ADICIÓN DE POLISACÁRIDOS A LA FORMULACIÓN	26
III. III ADICIÓN DE AZÚCAR A LA FORMULACIÓN	28
III. IV ADICIÓN DE AZÚCAR CON POLISACÁRIDOS.....	30
III. V OVERRUN Y ESTABILIDAD	31
III. VI PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS.....	40
CONCLUSIONES.....	50
REFERENCIAS	51
ANEXO 1	54

IV. I BARRIDO DE DEFORMACIÓN DE LAS DISOLUCIONES DE XANTANA, GUAR, AZÚCAR, Az-XAN Y Az-GG.	54
IV. II TANGENTE δ OBTENIDA DEL BARRIDO DE FRECUENCIA DE LAS DISOLUCIONES DE XANTANA, GUAR, AZÚCAR, Az-XAN Y Az-GG.	56
IV. III BARRIDO DE DEFORMACIÓN DE LAS DISOLUCIONES PRECURSORAS DE WPI CON GUAR, AZÚCAR, Az-XAN Y Az-GG.	58
IV. IV TANGENTE δ OBTENIDA DEL BARRIDO DE FRECUENCIA DE LAS DISOLUCIONES PRECURSORAS DE WPI CON XANTANA, GUAR, AZÚCAR, Az-XAN Y Az-GG.	60
IV. V BARRIDO DE DEFORMACIÓN DE LAS ESPUMAS DE WPI CON GUAR, AZÚCAR, Az-XAN Y Az-GG.	62
IV. VI TANGENTE δ OBTENIDA DEL BARRIDO DE FRECUENCIA DE LAS ESPUMAS DE WPI CON XANTANA, GUAR, AZÚCAR, Az-XAN Y Az-GG.	64

LISTA DE NOMENCLATURA

γ	Deformación bajo condiciones de cizalla	-
γ_0	Amplitud de deformación de cizalla	-
$\dot{\gamma}$	Velocidad de deformación	s^{-1}
δ	Ángulo de desfase entre el esfuerzo y la deformación de cizalla oscilatoria	$^{\circ}$
η	Viscosidad	$Pa \cdot s$
σ	Esfuerzo de cizalla	Pa
σ_0	Amplitud del esfuerzo de cizalla	Pa
ω	Frecuencia de oscilación angular	rad/s
G'	Módulo de almacenamiento de energía	Pa
G''	Módulo de pérdida de energía	Pa
K	Coefficiente de consistencia	$Pa \cdot s^n$
n	Índice de comportamiento de flujo	-

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto funcional combinado de un aislado de proteínas de suero lácteo y polisacáridos sobre la formación, estabilidad y las propiedades reológicas en las espumas, para identificar los principales factores que intervienen en la preparación de estos sistemas estructurados. La estabilidad se midió a partir del volumen de líquido drenado; el rendimiento se calculó a partir del volumen de espuma obtenido y el volumen de líquido inicial; las propiedades de flujo y viscoelásticas se evaluaron mediante barridos de deformación, barridos de frecuencia y curvas de flujo. Primero se establecieron las condiciones de operación para la formación de espumas mediante un dispersor del tipo rotor-estator en las que se obtiene mayor sobre-rendimiento (overrun) y estabilidad; las condiciones seleccionadas fueron 10% m/m de aislado de proteína de suero de leche (WPI), a 2700 rpm por 20 minutos. El aumento en la concentración de proteína, aumentó el overrun y la estabilidad; el incremento en la velocidad de agitación produce mayor overrun y el aumento del tiempo de agitación disminuye la estabilidad. Definidas las condiciones de formación se comparó la estabilidad, rendimiento y propiedades de flujo y viscoelásticas de la mezcla de WPI-xantana, WPI-guar, WPI-azúcar refinada, WPI-azúcar refinada-xantana y WPI-azúcar refinada-guar.

Se encontró una relación de proporcionalidad inversa entre la viscosidad de las disoluciones precursoras y el overrun de las espumas resultantes, el overrun disminuyó en el orden de WPI-xantana > WPI-guar > WPI-azúcar. No existe diferencia significativa entre el overrun producido por WPI-xantana y WPI-azúcar-xantana, tampoco entre el overrun producido por WPI-guar y WPI-azúcar-guar. La estabilidad fue mayor en las espumas de WPI-xantana el tiempo de vida media con 0.05% m/m de xantana aumenta 6.8 veces en relación con la espuma formada con solo proteína; las formulaciones con concentraciones de azúcar menor de 30% m/m, 0.15% m/m de guar y las mezclas WPI-azúcar refinada-xantana y WPI-azúcar refinada-guar no presentan diferencia significativa con la espuma formada solo con 10% m/m de WPI. Los barridos de deformación de las disoluciones precursoras mostraron el comportamiento de disoluciones diluidas, $G'' > G'$, predominio del carácter viscoso, en las espumas $G' > G''$, predominio del carácter elástico. La incorporación de aire al sistema provoca un reacomodo de los componentes de las disoluciones, la película formada por las proteínas y las interacciones proteína-polisacárido le confiere propiedades del tipo sólido. Las disoluciones precursoras mostraron mayor dependencia de los módulos con respecto a la frecuencia angular, en las espumas se observó menor dependencia de los módulos, además no se cruzan, excepto en las espumas con más de 0.10% m/m de xantana. Las curvas de flujo de las espumas mostraron un comportamiento reofluidificante; las espumas con guar y azúcar fueron más viscosas que las que contenían xantana, pero estas últimas fueron más estables al adelgazamiento por cizalla, es decir, las interacciones WPI-xantana son más fuertes. La relación proteína-polisacárido tiene una fuerte influencia sobre la estabilidad y las propiedades reológicas de las espumas, el impacto en dichas propiedades dependerá de la fuerza de estas interacciones.

ABSTRACT

The aim of this work was to determine the functional effect of whey protein isolate (WPI) and polysaccharides on the formation, stability and rheological properties of foams to identify the main factors that participate in the development of these structured systems. Stability was measured by the volume of fluid drained, yield was calculated from the foam volume and the initial liquid volume, flow and viscoelastic properties were evaluated by flow curves, strain and frequency sweeps, respectively. First, operating conditions were selected in order to prepare foams with the higher overrun and stability using a disperser; conditions were 10% (w/w) whey protein isolate (WPI) at 27000 rpm for 20 min. Increase in protein concentration increased overrun and stability, increase in stirring speed resulted in more overrun and finally increase in stirring time decreased stability. Once conditions were determined stability, yield, flow and viscoelastic properties were compared in different admixtures of WPI-xanthan gum, WPI-guar gum, WPI-sucrose, WPI-sucrose-xanthan gum and WPI-sucrose-guar gum.

A relationship of inverse proportionality was observed between precursor solutions viscosity and foam overrun, decreasing in the order WPI-xanthan > WPI-guar > WPI-sucrose. There is not significant difference between the overrun produced by WPI-xanthan and WPI-sucrose-xanthan and in the overrun of WPI-guar and WPI-sucrose-guar. Stability was higher for WPI-xanthan foams, half life for 0.05% (w/w) xanthan increased 6.8 times in comparison to foam produced just with protein. No significant difference was found between mixtures with less than 30% (w/w) and 0.15 % (w/w) guar, WPI-sucrose-xanthan and WPI-sucrose-guar. Strain sweeps showed precursor solutions to behave as diluted solutions with $G'' > G'$ in which the viscous character was predominant while for foams $G' > G''$; the elastic behavior was predominant. Introduction of air into the system leads to rearrangement of solution components, the film formed by proteins and protein-polysaccharide interactions confer solid-type characteristics. The dynamic moduli of precursor solutions exhibited a stronger dependence on angular frequency than foams, besides they did not over-crossed except in foams with more than 0.10 % (w/w) xanthan. The flow curves of foams showed shear-thinning behavior, guar- and sucrose-containing foams were more viscous than foams containing xanthan, but the latter were more stable against shear, which means that WPI-xanthan interactions are stronger. Protein-polysaccharide interactions have a strong influence on foam stability and rheological properties; the impact of such properties depends on the strength of these interactions.

INTRODUCCIÓN

La preparación de alimentos, tales como “mousse”, “soufflés”, merengues, crema batida, helados, bizcochos, entre otros, implica obtener un sistema llamado espuma. Actualmente las espumas alimentarias han cobrado auge debido a la gran variedad de texturas que se pueden obtener al incorporar aire en una matriz, además de la ventaja que implica incluir un ingrediente sin costo. Las espumas son dispersiones de burbujas de gas, generalmente aire, en una fase continua que puede ser líquida o semisólida, estabilizada por la presencia de un agente con actividad superficial (Walstra, 2002). La fase gas en forma de pequeñas burbujas, modifica no sólo la microestructura, sino también las propiedades sensoriales de la matriz en la que está dispersa. La aireación contribuye a obtener texturas específicas, e.g. fragilidad en confitería, ligereza en la crema batida, o posibilidad de manipular con una cuchara (“scoopability”) en los “mousse” (Nicorescu *et al.*, 2010). Hoy en día, la estabilidad de las espumas es tema de investigación, y el interés en su estudio es impulsado principalmente por el placer sensorial que estos productos pueden generar (Green *et al.*, 2013).

Las espumas son generalmente formadas y estabilizadas por proteínas, las cuales son capaces de formar membranas cohesivas y viscoelásticas en la interfase aire-agua que impiden la coalescencia de las burbujas. Tradicionalmente se ha utilizado proteína de clara de huevo como agente espumante; estudios actuales muestran que las proteínas del suero lácteo poseen una capacidad de formación de espuma comparable y con potencial para reemplazar a la proteína de huevo (Pernell *et al.*, 2002; Davis & Foegeding, 2007). Sin embargo, las espumas formadas con proteína de suero de leche son menos estables (Yang & Foegeding, 2011). Para producir espumas estables es necesario usar agentes estabilizantes; los más comunes son los polisacáridos (Hemar *et al.*, 2001). La textura y la estabilidad general de las espumas no sólo dependen de las propiedades intrínsecas de las proteínas y los polisacáridos, sino también de la naturaleza y la fuerza de las interacciones proteína-polisacárido. Los efectos sinérgicos resultantes de la mezcla de estos biopolímeros son de gran importancia aplicada a la mejora de muchos alimentos, e.g. para reducir su costo y también para obtener diferentes texturas.

OBJETIVOS

General

- Determinar el efecto funcional combinado de un aislado de proteínas de suero lácteo y polisacáridos sobre la formación, estabilidad y las propiedades reológicas en las espumas, para identificar los principales factores que intervienen en la preparación de estos sistemas.

Particulares

- Establecer las condiciones de operación (concentración de proteína, velocidad y tiempo) con las que se obtiene mayor cantidad de sobre-rendimiento (overrun) y estabilidad, para usarlas en la preparación de espumas de aislado de proteína de suero de leche.
- Comparar el efecto de la adición individual de guar y xantana a diferentes concentraciones sobre la estabilidad, overrun y propiedades viscoelásticas y de flujo en las espumas de aislado de proteína de suero de leche, para conocer la acción de un polisacárido neutro y uno iónico.
- Determinar el comportamiento de la estabilidad, el overrun, las propiedades viscoelásticas y de flujo de espumas de aislado de proteína de suero de leche con diferentes concentraciones de azúcar, para conocer la acción de este cosoluto sobre dichas características.
- Comparar el efecto de la adición individual de guar y xantana con azúcar sobre la estabilidad, overrun y propiedades viscoelásticas y de flujo en las espumas de aislado de proteína de suero de leche, para conocer la acción de la combinación de azúcar con un polisacárido neutro y uno iónico.

HIPÓTESIS

La adición de xantana y guar a espumas preparadas con proteínas asiladas de suero lácteo aumentará su estabilidad. La combinación de xantana y goma con azúcar refinada como estabilizantes producirá espumas más estables de aquellas producidas solo con proteínas de suero-xantana o proteínas de suero-guar. Las espumas formadas por xantana, guar y azúcar con proteínas de suero mostrarán comportamientos de flujo y propiedades viscoelásticas diferentes que dependerán de las interacciones proteína-polisacárido en el sistema.

CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES

I.I ESPUMAS

Las espumas son dispersiones coloidales de un gas o mezcla de gases suspendidos en una fase dispersante; el líquido rodea a las burbujas de aire y las separa a una de otra, esta barrera o pared recibe el nombre de lamela. Las burbujas formadas por el gas, en su mayoría tienen formas poliédricas y tienen usualmente diámetros entre 10 a 100 μm . Las burbujas de una espuma se organizan en poliedros a lo largo del borde de la lamela, tres lamelas se unen en ángulos de 120° , llamado ángulo de Steiner, la frontera donde se encuentran se denomina borde de Plateau; en los bordes de Plateau la presión es diferente que en el resto de la lamela promoviendo fenómenos que desestabilizan a la espuma (Schramm, 2005).

Las tres causas principales de la inestabilidad de las espumas son: 1) la difusión de gas desde las burbujas más pequeñas hacia las mayores, debido a que la presión es mayor en las burbujas pequeñas que en las grandes; 2) el drenaje de líquido de y a través de la capa de espuma, debido a la acción de la gravedad, y 3) la coalescencia de las burbujas debida a la inestabilidad de la película que las separa.

Una espuma se puede caracterizar por sus propiedades macroscópicas: reológicas, de textura, estabilidad, contenido de aire y espumabilidad (la facilidad con la que se forma la espuma). El contenido de aire puede calcularse a partir de la densidad o volumen específico, pero esto requiere conocer la densidad del gas libre, el cual puede ser difícil de determinar, por lo tanto, se reportan otros parámetros como densidad, volumen específico y el sobre-rendimiento “overrun”. El “overrun” es utilizado para caracterizar espumas alimenticias líquidas con un alto contenido de aire como: crema batida, helado, “mousse”, entre otros (Campbell & Mougeot, 1999).

Todas estas variables son importantes con el fin de predecir y controlar las propiedades de los productos elaborados, la operación de formación de espuma tiene como propósito preparar productos más ligeros, así como modificar la apariencia y la textura de los productos alimenticios por conferir cohesión y flexibilidad con un aspecto homogéneo y una distribución más uniforme del sabor. Por lo tanto, la operación de formación de espuma ha sido aplicada para desarrollar nuevos productos adaptados a la elección y las necesidades de los consumidores, utilizando aire como un ingrediente sin costo (Narchi *et al.*, 2009).

I.II PROTEÍNAS

Además de su importancia nutricional las proteínas son ingredientes importantes en productos alimenticios por sus propiedades funcionales. Las propiedades funcionales se definen como “cualquier propiedad fisicoquímica de los polímeros que afecta y modifica algunas características de un alimento y que contribuye a la calidad del producto” (Badui, 2006). Las proteínas pueden estabilizar espumas y emulsiones ya que son moléculas anfifílicas que migran espontáneamente hacia la interfase aire-agua. A diferencia de los agentes surfactantes de bajo peso molecular, las proteínas forman una película viscoelástica la cual resiste los choques mecánicos durante el almacenamiento y la manipulación. Las distintas proteínas difieren mucho en sus propiedades de superficie; se ha demostrado que las proteínas con una actividad apropiada para fines tecnológicos poseen tres atributos: 1) adsorberse rápidamente en la interfase; 2) desplegarse y reorientarse rápidamente en la interfase; y 3) interactuar con las moléculas vecinas y formar una película viscoelástica fuerte que soporte los movimientos mecánicos y térmicos. La rapidez con la que puede adsorberse una proteína en la interfase aire-agua depende de la distribución de zonas hidrófilas e hidrófobas en su superficie, a medida que aumenta el número de zonas hidrófobas en la superficie, va siendo más probable su adsorción espontánea en la interfase. La tenacidad con la que la molécula proteínica permanece en la interfase depende en gran parte de la flexibilidad de su estructura (Damodaran, 2008).

Después de la adsorción, las proteínas se despliegan y establecen interacciones intermoleculares con otras proteínas en la interfase o cerca de la interfaz que conduce a la formación de una película proteínica, estas interacciones pueden ser electrostáticas, puentes de hidrógeno e hidrofóbicas (Carp *et al.*, 2001); se requiere de un balance adecuado de las fuerzas de atracción, repulsión e hidratación para formar películas viscoelásticas estables.

I.II.I AISLADO DE PROTEÍNA DE SUERO DE LECHE

Las proteínas de la leche se clasifican en caseínas y proteínas del suero, la caseína supone el 80% y el resto son las proteínas del suero o seroproteínas. Cuando las caseínas se coagulan para la producción de queso, el suero restante contiene aproximadamente 0.6% de proteína y 93% agua (Foegeding *et al.*, 2002). La producción de concentrados (25-80%) de proteína de suero de leche y los aislados de proteína (> 90%) requiere la eliminación del agua libre y otros compuestos no proteínicos como lípidos, minerales y lactosa. La filtración por membrana y la cromatografía de intercambio iónico, son los métodos más usados para la separación de la proteína del suero.

Las proteínas del suero constan de por lo menos ocho fracciones, entre las cuales destacan la β -lactoglobulina (45%), la α -lactalbúmina (20%), las inmunoglobulinas (10%), la seroalbúmina (5%) y las proteosas-peptonas (20%); contienen la mayoría de los aminoácidos y presentan un mejor balance de éstos que las propias caseínas, por lo que su valor nutritivo es superior. La α -lactalbúmina está formada por una sola cadena de 123 aminoácidos, tiene un peso molecular de 14.2 kDa, es una proteína globular muy compacta, su estructura se mantiene estabilizada por cuatro puentes disulfuro. La β -lactoglobulina tiene un peso molecular de 18.4 kDa, es una proteína globular compuesta por 162 aminoácidos, sus aminoácidos hidrófilos se encuentran distribuidos de manera homogénea lo que permite la asociación de los aminoácidos apolares en el interior de la molécula, esta característica genera alta solubilidad y actividad superficial. Su estructura se encuentra estabilizada por dos uniones disulfuro y posee un grupo sulfhidrilo libre; la presencia de estos grupos da como resultado una estructura rígida.

El resto de las proteínas como las inmunoglobulinas son glicoproteínas con alto contenido de grupos azufrados; las proteosa peptonas están compuestas por un grupo heterogéneo de fosfoglicoproteínas y la seroalbúmina es una proteína globular de 66.5 kDa contiene aproximadamente 850 residuos entrecruzados por 17 puentes disulfuro (Phillips & Williams, 2009).

I.III AZÚCAR REFINADA

El azúcar refinada es sacarosa de muy alta pureza (> 99,9%) que se produce industrialmente a partir de remolacha o caña de azúcar. Es de uso común para hornear, cocinar y endulzar productos alimenticios en casa o para preparar otros alimentos y bebidas procesados. La sacarosa está compuesta por una unidad α -D-glucopiranosilo y otra β -D-fructofuranosilo, unidas por los extremos reductores (Fig. 1), que impide a este disacárido ser reductor, por no poseer grupos aldehído o cetona libres. El peso molecular de la sacarosa es 342 g/mol, la solubilidad máxima a 25° C es de 211.4 g por cada 100 g de agua, tiene alta capacidad de hidratación y es menos higroscópica que la fructosa estas características hacen que se emplee en la elaboración de diversos alimentos.

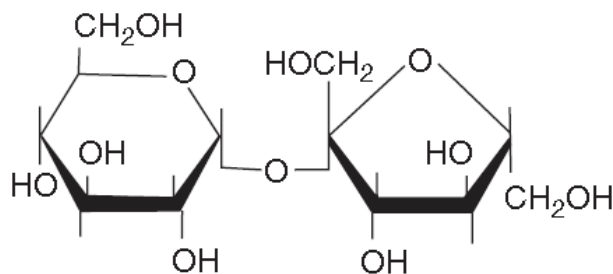


Figura 1. Estructura de la sacarosa.

I. IV POLISACÁRIDOS

Los polisacáridos son biopolímeros de alto peso molecular utilizados como ingredientes funcionales en la industria de alimentos para el control de la microestructura, la textura, el sabor y la vida útil. Por su gran capacidad de retener agua, producen partículas coloidales muy hidratadas, razón por la cual se les da el nombre de hidrocoloide, que incluye a muchos de los polisacáridos que se extraen de plantas, algas marinas y fuentes microbianas, así como gomas derivadas de exudados de plantas, y polímeros naturales modificados elaborados por tratamiento químico o enzimático de almidón o celulosa (Dickinson, 2003). Los hidrocoloides realizan al menos tres funciones en el procesamiento de alimentos: emulsionantes, estabilizantes y espesantes; además algunos también son agentes gelantes. Un estabilizante es cualquier material que reduce la tasa en la cual suceden algunos cambios dentro de un producto durante su almacenamiento, transporte y manipulación; los estabilizantes retardan o evitan cualquiera de los siguientes procesos: sedimentación de partículas en suspensión debida a la gravedad, encuentro entre partículas, gotas o burbujas en un medio fluido, floculación, coagulación o coalescencia de fracciones dispersas, desagregación de agregados, descremado, entre otros. La principal acción estabilizante de polisacáridos de alimentos es a través de la modificación de la viscosidad o gelación en la fase continua acuosa.

Las propiedades gelantes y espesantes están determinadas por el comportamiento de las macromoléculas en medio acuoso especialmente por su conformación y su volumen hidrodinámico. El volumen hidrodinámico depende de la naturaleza de las uniones osídicas, del peso molecular y las interacciones polímero-disolvente. El poder espesante es una propiedad relacionada con la viscosidad intrínseca $[\eta]$, es una medida de la habilidad de una molécula para aumentar la viscosidad de un disolvente en ausencia de interacciones intermoleculares; también depende de la estructura del compuesto, las características del solvente y la temperatura (Stephen *et al.*, 2006).

I. IV. I GUAR

La goma guar es extraída del endospermo de la semilla de *Cyamopsis tetragonolopus*, es un galactomamano compuesto por unidades de β -D-manosa y α -D-galactosa. La cadena principal está compuesta por restos de β -D-manosa unidos por enlaces β (1-4), con cadenas laterales de α -D-galactosa unidas por enlaces α (1-6) (Fig. 2). Su peso molecular es de aproximadamente 220 kDa y su viscosidad intrínseca de 675mL/g. Carece de grupos ionizables, lo cual la hace prácticamente inalterable a cambios de pH, su máxima capacidad de hidratación se alcanza a pH de 7.5 - 9.0. Se disuelve completamente en agua fría, produciendo alta viscosidad, sin embargo, no forma geles y su principal uso es como formador de cuerpo, estabilizante y ligante de agua.

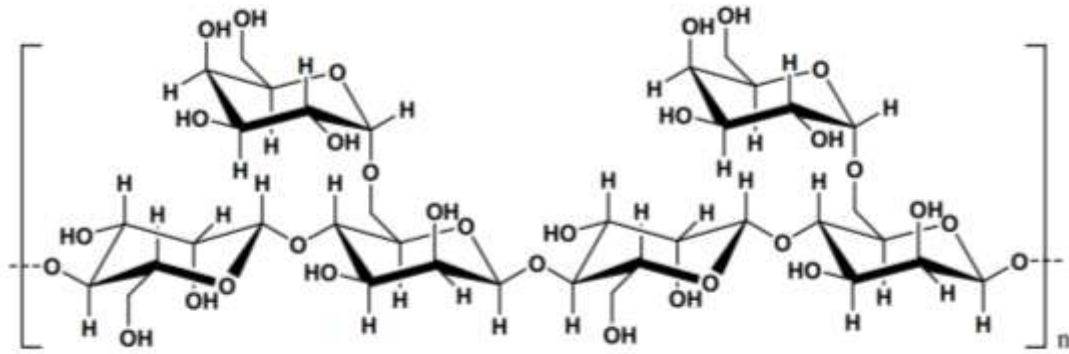


Figura 2. Estructura primaria de la goma guar.

I. IV. II XANTANA

La xantana, es un heteropolisacárido obtenido de la fermentación de hidratos de carbono por diferentes especies de bacterias *Xanthomonas*, principalmente *X. campestris*, está formada por residuos de D-glucosa unidos por enlaces β (1-4) y una cadena de dos D-manosas, con un ácido D-glucurónico entre ellas, que se une a la cadena principal por un enlace α (1-3) a una de cada dos glucosas (Fig. 3), en medio acuoso forma una estructura helicoidal. También contiene aproximadamente 4.7% de grupos acetilo y 3.5% de ácido pirúvico; su peso molecular es 2 000 kDa; es soluble en agua fría y su viscosidad intrínseca es de 5000 – 7000 mL/g (Phillips & Williams, 2009).

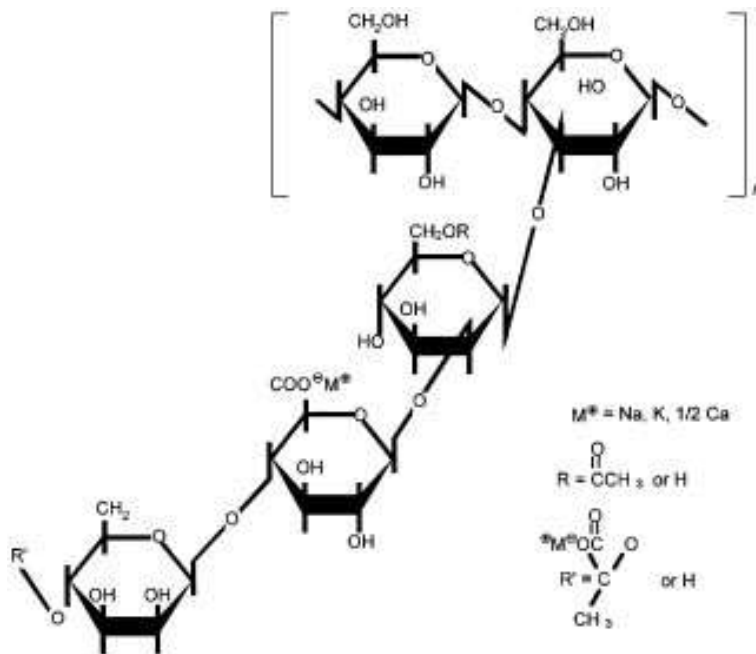


Figura 3. Estructura primaria de la goma xantana.

I.V INTERACCIÓN PROTEÍNA-POLISACÁRIDO

Al mezclar proteínas con polisacáridos, puede haber interacciones sinérgicas o antagonistas que causan grandes cambios en sus propiedades funcionales; se pueden presentar tres comportamientos: 1) miscible en disoluciones diluidas, 2) incompatibilidad termodinámica, los biopolímeros se repelen formando dos fases acuosas diferentes, una rica en proteína y la otra rica en polisacáridos, 3) complejación, los biopolímeros se atraen entre sí (de Kruif, 2001). El conocimiento del origen y la naturaleza de estas interacciones, puede ser usado para crear nuevas estructuras y propiedades físico-químicas en los sistemas alimentarios. Las principales interacciones no covalentes entre proteínas y polisacáridos son:

- **Electrostáticas.** Estas interacciones son importantes para biopolímeros que tienen carga eléctrica en las condiciones en que se utilizan. Pueden ser atractivas o repulsivas en función de si los grupos con carga implicados tienen signos diferentes o similares. La fuerza y la gama de estas interacciones disminuye con el aumento de la fuerza iónica.
- **Impedimento estérico.** Muchos biopolímeros en disolución ocupan un gran volumen, por lo que los efectos de impedimento estérico son importantes, es decir, hay una reducción en el volumen disponible para las moléculas de biopolímero en disolución.
- **Hidrófobas.** Esta interacción es importante para biopolímeros en disoluciones acuosas que tienen grupos no polares, y se manifiesta como una tendencia de los grupos no polares para asociarse entre sí.
- **Puentes de hidrógeno.** Esta interacción es importante para biopolímeros que tienen fragmentos a lo largo de su cadena que pueden formar puentes de hidrógeno relativamente fuertes con segmentos de otras moléculas, e.g., a través de estructuras helicoidales o laminares.

La importancia de estas interacciones en un sistema particular depende del tipo de moléculas implicadas (peso molecular, densidad de carga, pH, flexibilidad, hidrofobicidad) y la composición de la solución (pH y fuerza iónica). Mediante la modulación de estos parámetros es posible controlar las interacciones entre los biopolímeros y por lo tanto crear diferentes propiedades funcionales (McClements, 2006).

Las principales razones para el uso de mezclas proteína-polisacárido como estabilizadores de espumas son su alta actividad superficial, su capacidad para aumentar la viscosidad del medio de dispersión y para formar capas adsorbidas cargadas y gruesas tipo gel. La difusión de gas, el drenaje de líquido y la coalescencia en una espuma dependen de las interacciones entre las capas de estabilización, la naturaleza y fuerza de las interacciones proteína-polisacárido. La conformación de las películas formadas por los complejos proteína-polisacárido en la interfase depende de la carga electrostática de dichos complejos

y el orden de adsorción en la interfase (simultánea o secuencial). Las capas formadas no suelen ser de espesor homogéneo, se puede formar una monocapa de proteína, seguida de una capa de polisacárido que siempre es menos densa, en adsorción secuencial, o por un complejo proteína-polisacárido, en la adsorción simultánea (Rodríguez & Pilsof, 2001).

I.VI PROPIEDADES REOLÓGICAS

La Reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de un cuerpo sometido a esfuerzos externos. La caracterización y la comprensión del comportamiento reológico de los alimentos es esencial para numerosos aspectos de la ciencia y tecnología de los mismos, tales como la caracterización estandarizada de materias primas y el desarrollo de productos innovadores, o para la optimización del procesamiento industrial (Fischer & Windhab, 2011).

La teoría clásica de la elasticidad considera las propiedades mecánicas de los sólidos elásticos de acuerdo con la ley de Hooke, es decir, la deformación conseguida es directamente proporcional al esfuerzo aplicado. Por otra parte, la teoría hidrodinámica trata las propiedades de los líquidos viscosos para los que, de acuerdo con la ley de Newton, el esfuerzo aplicado es directamente proporcional a la velocidad de deformación, pero independiente de la deformación misma. Si se aplica un esfuerzo sobre un sólido elástico éste se deforma y permanece así mientras existe el esfuerzo; cuando cesa el esfuerzo la deformación desaparece. Por otra parte, si se aplica un esfuerzo a un fluido viscoso éste se deforma continuamente, es decir fluye, y cuando cesa el esfuerzo no recupera su estado inicial. Un comportamiento intermedio es el viscoelástico, en el que el cuerpo sobre el que se aplica el esfuerzo recupera parte de su condición inicial.

Las medidas mecánicas dinámicas u oscilatorias permiten caracterizar las propiedades viscosas y elásticas del material. En este tipo de experimentos la deformación aplicada varía sinusoidalmente con el tiempo de acuerdo con la expresión:

$$\gamma = \gamma^{\circ} \text{sen} \omega t \quad (1)$$

el esfuerzo varía con la frecuencia ω , pero está desfasado una cantidad δ con respecto a la deformación:

$$\sigma = \sigma^{\circ} \text{sen} (\omega t + \delta) \quad (2)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones que describen el comportamiento de la deformación y el esfuerzo de cizalla, es posible desarrollar la ecuación constitutiva hasta llegar a la expresión:

$$\sigma = \gamma^{\circ} (G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t) \quad (3)$$

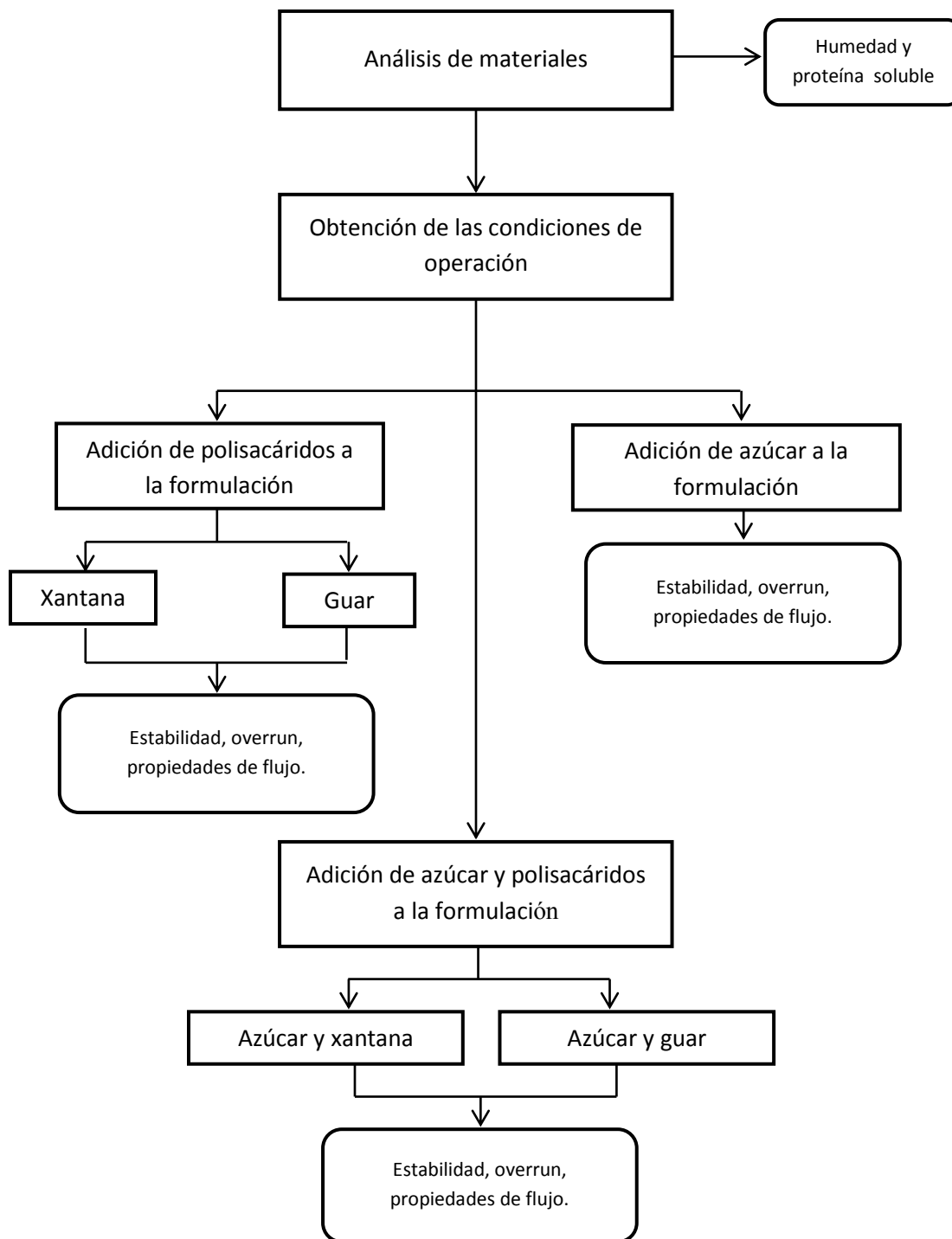
la cual define el módulo de almacenamiento $G'(\omega)$ y el módulo de pérdida $G''(\omega)$. El primero está asociado con la energía almacenada en el material mientras que el segundo, está asociado con la energía disipada por el material. Con las ecuaciones anteriores se puede definir la tangente del ángulo de desfase, $\tan \delta$:

$$\tan \delta = G''/G' \quad (4)$$

donde δ representa el desfase existente entre el esfuerzo y la deformación, y es un parámetro que indica la relación entre la energía disipada y la almacenada por el material y de la viscoelasticidad del mismo (Ramírez, 2006) .

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

II.1 DIAGRAMA GENERAL



II. II MATERIALES

Aislado de proteína de suero de leche, WPI por sus siglas en inglés (Nutrical, Lactoprot, México), xantana grado alimenticio (Keltrol, Kelco, USA), guar grado alimenticio (Gomas Naturales, México) y azúcar refinada (Alcoholes y melazas de México, México).

II .III MÉTODOS

- Humedad: La humedad se determinó utilizando termobalanza (MB45-2A, OHAUS, USA) a 100 °C por 10 minutos. Para el azúcar la humedad se determinó de acuerdo con el método descrito en NMX-F-294-SCFI-2011.
- Contenido de proteína soluble: El contenido de proteína se determinó por el método de Lowry (Lowry *et al.*, 1951). Se construyó una curva de referencia con albúmina sérica bovina hasta una concentración máxima de 0.8 mg/mL. Se leyó la absorbancia en un espectrofotómetro (Thermo, Genesys 10 series) a 500 nm y la concentración de proteína fue determinada por referencia a dicha curva. Las soluciones fueron preparadas con una concentración de 0.4 mg/mL de proteína y 100 mM de NaCl, se hidrataron por 2 h a temperatura ambiente con agitación continua. Se utilizó NaOH 0.1 M para ajustar el pH a 7 y se mantuvo a 4 °C toda la noche.

Análisis de WPI, azúcar, guar y xantana

Tabla 1. Contenido promedio de humedad y proteína soluble de los materiales empleados para la preparación de las soluciones precursoras.

Determinación	WPI	Azúcar	Guar	Xantana
Humedad (g/100 g)	8.5 ± 0.24	0.057 ± 0.006	10.2 ± 0.02	11.1 ± 0.02
Proteína soluble (g/100 g)	87.5 ± 0.05	n. a.	n. a.	n. a.

n.a.= no aplicable

Preparación de disoluciones precursoras

Se pesó la cantidad de WPI y se disolvió en una disolución de NaCl 100 mM a temperatura ambiente (20 °C) con agitación mecánica por dos horas. Se agregó el polisacárido o el azúcar a esta disolución, se dispersó con agitación mecánica, y se ajustó el pH a 7 con NaOH 2.5 M. Se mantuvo la disolución a 4 °C durante toda la noche.

Formación de espumas

Dependiendo del volumen de trabajo se usaron dos equipos. Se tomaron 500 mL de la disolución de WPI en un vaso de precipitados de 1 L y se agitaron con un rotor-estator (Turbotest 37/750P, Rayneri, Francia); se introdujo la propela del rotor en el centro del vaso de manera que la propela lograra girar libremente y que el líquido de la disolución la cubriera por completo. También se utilizó un rotor-estator (ULTRA-TURRAX, T25 D51, Alemania) se tomaron 100 mL de disolución en un vaso de precipitados de 600 mL e igualmente se introdujo la propela en el centro del vaso cubierta totalmente por el líquido sosteniendo el vaso de forma manual.

Parámetros evaluados en espumas

- Overrun: Se calculó la capacidad espumante o rendimiento mediante la ecuación 5:

$$\text{overrun} = \left[\frac{\text{volumen de espuma} - \text{volumen inicial de líquido}}{\text{volumen inicial de líquido}} \right] 100 \quad (5)$$

- Estabilidad: Una vez formada la espuma ésta se transfirió cuidadosamente a una probeta graduada y se registró el volumen de líquido drenado cada 10 minutos.

Pruebas reológicas

Las pruebas reológicas se llevaron a cabo en un reómetro ARES-RFS III (TA Instruments, USA) con una geometría de cilindros concéntricos, con un diámetro interior de la copa de 27.94 mm, diámetro interior del cilindro interno de 29.5 mm, diámetro exterior del cilindro externo de 32.0 mm y diámetro exterior de la copa de 34 mm, para caracterizar las soluciones y una geometría de paleta para las espumas; todas las pruebas se realizaron a 25 °C. Las pruebas realizadas fueron: A) Barrido de deformación, a una frecuencia de 6.28 rad/s para determinar la zona de viscoelasticidad lineal (ZVL) en la cual los módulos no dependen de la deformación y del esfuerzo, B) Barridos de frecuencia a una deformación fija dentro de la ZVL, para examinar su comportamiento viscoelástico. Los resultados son expresados por medio del módulo de almacenamiento, G' , y el módulo de pérdida, G'' , C). Curva de flujo, para caracterizar la variación de la viscosidad con respecto a la velocidad de deformación.

Análisis estadístico

Los resultados se expresan como el promedio de las repeticiones realizadas y se incluye la desviación estándar. Para determinar si existió diferencia estadística se hizo un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de diferencia mínima significativa de Fisher, ambas con $\alpha = 0.05$.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III.I DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Para formar una espuma debe aplicarse una intensidad de agitación tal que permita el despliegue de la estructura proteínica y su correspondiente adsorción en la interfase. Se dispuso de una concentración inicial de 4.0% m/m de WPI, se formó espuma a diferentes velocidades desde 900 hasta 2700 rpm, durante 10, 20 y 30 minutos (ver Tabla 2). Entonces se midió el overrun y la estabilidad.

El overrun se define como el volumen de gas incorporado, expresado como el porcentaje relativo al volumen inicial del líquido. Como se muestra en la Tabla 2 el porcentaje de overrun aumentó con el incremento de concentración de WPI, e.g. a 1800 rpm por 30 minutos con 10.0% m/m de proteína se produjo 25.92% más overrun que a 4.0% m/m en estas mismas condiciones; a 1800 rpm por 20 minutos con 10.0% m/m de WPI aumentó 12.7% más que con solo 4.0 o 6.0% m/m de WPI. Esto se debe a que el aumento de concentración de proteína suele aumentar su capacidad espumante. El overrun también aumentó con la velocidad de agitación, ya que una mayor velocidad permitió incorporar más aire (Fennema, 2010). Por ejemplo, con 4.0 y 6.0% m/m de WPI el aumento del overrun de 900 a 2700 rpm, a 10 minutos, fue de 72.8%. En la mayoría de los casos el overrun no aumenta conforme al aumentar el tiempo de agitación para una velocidad de agitación constante; esto podría deberse a que existe un límite más allá del cual no se incorpora más aire. Este límite podría estar determinado por el volumen inicial de disolución precursora.

Por otra parte la estabilidad, también aumentó con la concentración de WPI y disminuyó con el aumento de la velocidad. Cuando las velocidades fueron mayores de 2100 rpm la estabilidad disminuyó con el aumento del tiempo de agitación. Como se observa en la Tabla 2 con 10.0% m/m de WPI a 2400 rpm de 10 a 20 minutos de agitación el volumen del líquido drenado aumentó 2.5 veces y de 10 a 30 minutos 3.5 veces. La estabilidad mejora aumentando la concentración de proteína, porque esto aumenta la viscosidad y facilita la formación de una película cohesiva formada por varias capas de moléculas proteínicas en la interface (Fennema, 2010). Sin embargo, una agitación excesiva, como sucede a velocidades mayores de 2100 rpm, produce en la película formada un alto estiramiento y la ruptura ocurre casi inmediatamente (Bello, 1998); de ahí que con el aumento del tiempo de agitación disminuya la estabilidad. A partir de los resultados obtenidos se seleccionaron las condiciones en las que obtuvo un mayor porcentaje de overrun y mayor estabilidad, es decir, con disoluciones de 10% m/m de WPI, a 2700 rpm por 20 minutos.

Tabla 2. Estabilidad y overrun obtenidos a diferentes concentraciones de proteína, velocidad y tiempo de agitación.

Tiempo (min)	Velocidad (rpm)	Concentración de WPI (% m/m)							
		4		6		8		10	
		Overrun	Estabilidad ¹	Overrun	Estabilidad	Overrun	Estabilidad	Overrun	Estabilidad
10	900	57.1	77.1	57.1	87.5	100.0	83.3	100	83.3
	1200	100.0	66.7	100.0	65.0	116.7	66.7	116.66	60.0
	1500	114.3	71.4	114.3	63.3	160.0	60.0	140	57.1
	1800	160.0	60.0	160.0	50.0	130.0	66.0	133.33	50.0
	2100	170.0	50.0	170.0	70.0	150.0	46.0	150	30.0
	2400	210.0	50.0	210.0	50.0	150.0	40.0	170	20.0
	2700	210.0	54.0	210.0	34.0	210.0	10.0	210	36.4
20	900	57.1	77.1	57.1	87.5	100.0	83.3	100.0	83.3
	1200	100.0	66.7	100.0	60.0	116.7	66.7	133.3	60.0
	1500	114.3	71.4	114.3	63.3	160.0	60.0	160.0	57.1
	1800	160.0	60.0	160.0	50.0	170.0	70.0	183.3	50.0
	2100	210.0	60.0	210.0	70.0	170.0	80.0	170.0	30.0
	2400	250.0	70.0	250.0	70.0	170.0	60.0	210.0	50.0
	2700	210.0	70.0	210.0	70.0	250.0	70.0	250.0	63.6
30	900	57.1	77.1	57.1	87.5	100.0	83.3	100.0	83.3
	1200	100.0	66.7	100.0	60.0	116.7	66.7	150.0	60.0
	1500	114.3	83.3	114.3	66.6	160.0	60.0	180.0	57.1
	1800	160.0	60.0	160.0	50.0	210.0	70.0	216.7	50.0
	2100	210.0	70.0	210.0	70.0	170.0	80.0	170.0	50.0
	2400	250.0	70.0	250.0	70.0	210.0	80.0	210.0	70.0
	2700	210.0	74.0	210.0	80.0	250.0	70.0		

¹Porcentaje de líquido drenado 10 minutos después de la agitación.

III.II ADICIÓN DE POLISACÁRIDOS A LA FORMULACIÓN

Después de obtener las condiciones de operación adecuadas para la formación de espuma, se determinaron las propiedades reológicas de las espumas y las disoluciones precursoras. Posteriormente se agregó xantana (XAN) a la formulación en tres diferentes concentraciones para examinar su efecto sobre la estabilidad, el overrun, las propiedades de flujo y viscoelásticas. La Figura 4 muestra el comportamiento de flujo de las soluciones de xantana y goma de guar.

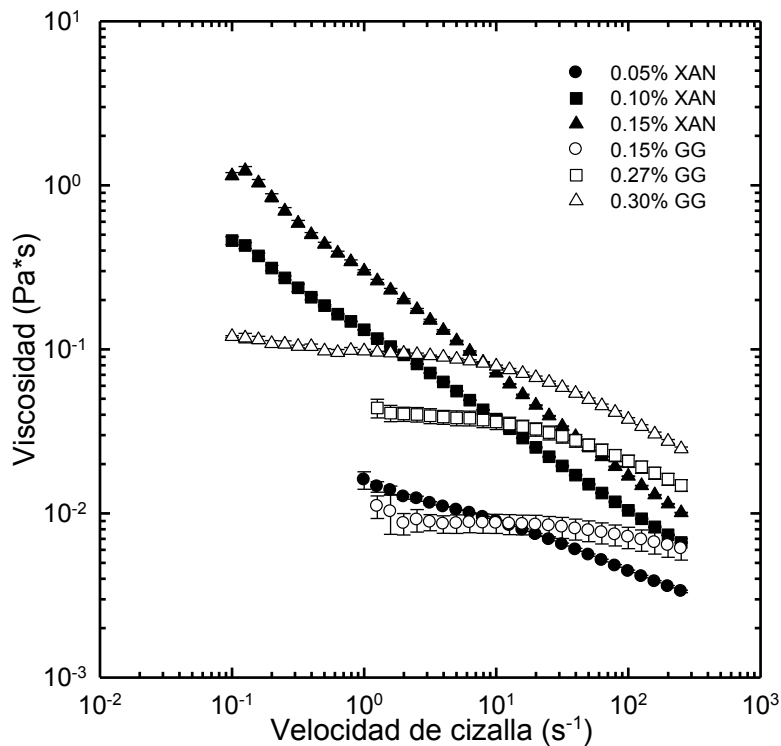


Figura 4. Curva de flujo de las disoluciones de xantana y guar.

Se fijaron las concentraciones de guar (GG) que permiten obtener la misma viscosidad en un punto intermedio de la curva de flujo observada por las concentraciones de XAN, para comparar los parámetros antes señalados. Como se observa en la Fig. 4 la viscosidad de 0.15% m/m de GG se superpone con 0.05% m/m de XAN entre 8 y 12.5 s⁻¹; 0.27% m/m de GG corresponde con 0.10% m/m de XAN entre 10 y 12.5 s⁻¹; y finalmente 0.30% m/m de GG con 0.15% m/m de XAN entre 7.9 y 10 s⁻¹. También se puede observar que el comportamiento refluidificante es más marcado en xantana que en guar.

También se realizaron barridos de deformación, que se muestran en el Anexo I, el barrido de deformación de guar, para todas las concentraciones muestra un predominio de G'' sobre G', en las disoluciones de XAN sólo para la concentración 0.05% m/m, se observa este comportamiento. Con 0.10 y 0.15% m/m de XAN G' predomina sobre G'' siendo más claro

este comportamiento en 0.15% m/m XAN. Este comportamiento muestra la diferente naturaleza de cada polisacárido; en GG el carácter viscoso predominó sobre el elástico y en XAN a concentraciones mayores a 0.15% ocurrió lo contrario.

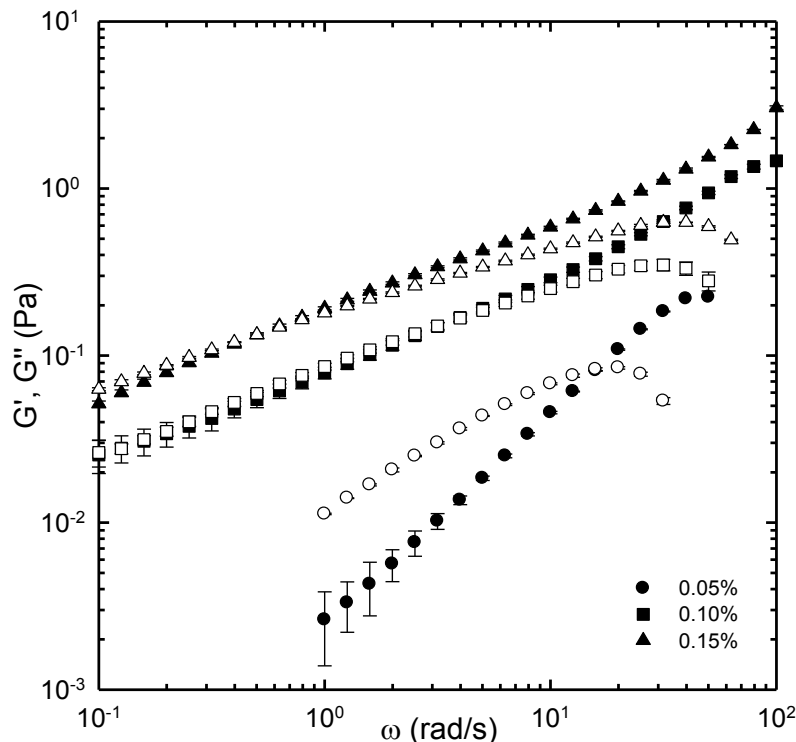


Figura 5. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia en las disoluciones de xantana a diferentes concentraciones; G' (símbolos negros), G'' (símbolos blancos).

El barrido de frecuencia de 0.05% m/m de XAN (Fig. 5) muestra el comportamiento de una disolución en la cual los módulos son dependientes de la frecuencia, con un punto de cruce en a 14.5 rad/s. Esta frecuencia separa la región de flujo, es decir, a partir de ese punto G' es mayor que G'' tal como lo muestra la $\tan \delta$, para frecuencias menores de 14.5 $\tan \delta > 1$, lo que implica que predomina el carácter viscoso y para frecuencias mayores de 14.5, $\tan \delta < 1$, con un predominio del carácter elástico. Para 0.10 y 0.15% m/m de XAN G' y G'' se sobreponen ($\tan \delta = 1$), para frecuencias menores de 1 rad/s para 0.15% m/m de XAN y para frecuencias menores de 10 rad/s para 0.10% de XAN. En estos intervalos no predomina ningún carácter, es por arriba de estas frecuencias donde predomina el carácter elástico. Por arriba de dichas frecuencias se puede distinguir $G' > G''$.

En el caso de las disoluciones de guar, éstas presentan un comportamiento típico al de una disolución concentrada, con módulos dependientes de la frecuencia, con carácter viscoso antes del punto de cruce y predominio del carácter elástico después del cruce (Fig. 6).

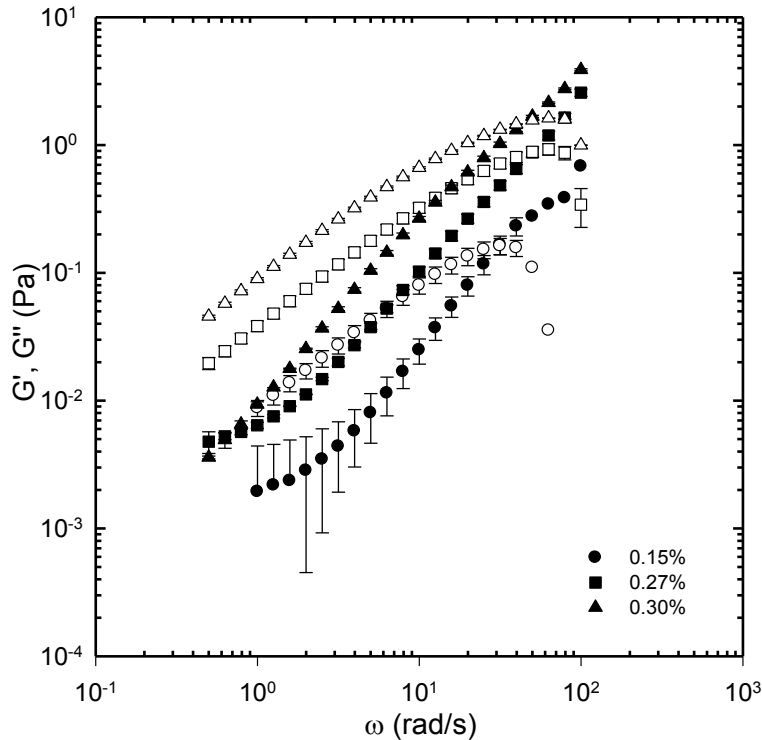


Figura 6. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia en las disoluciones de guar a diferentes concentraciones; G' (símbolos negros), G'' (símbolos blancos).

A diferencia de xantana, guar no es una macromolécula aniónica y no es un polisacárido ramificado. Esto hace a las cadenas de guar considerablemente más flexibles que las moléculas de xantana y explica sus diferentes propiedades viscoelásticas. Por lo tanto, se espera que la estabilización de espuma con goma de guar se deba principalmente a un aumento de la viscosidad y no a una contribución elástica al sistema.

III. III ADICIÓN DE AZÚCAR A LA FORMULACIÓN

Se agregó azúcar refinada (Az) en 10, 20, 30 y 50% m/m, la Fig. 7 muestra la viscosidad obtenida a estas concentraciones. Estas disoluciones muestran un comportamiento newtoniano; con el aumento de la concentración la zona newtoniana aumenta. En el barrido de deformación (Anexo 1) en todas las concentraciones muestra el comportamiento de una disolución diluida; el módulo de pérdida G'' , predominó por sobre el de almacenamiento G' .

Al igual que en el barrido de deformación, el módulo de pérdida predominó sobre el de almacenamiento con respecto a la frecuencia (Figura 8); la $\tan \delta$ mostró el predominio del carácter viscoso en las disoluciones hasta antes del punto de cruce. También se muestra que el aumento de la concentración desplazó el punto de cruce hacia mayores frecuencias.

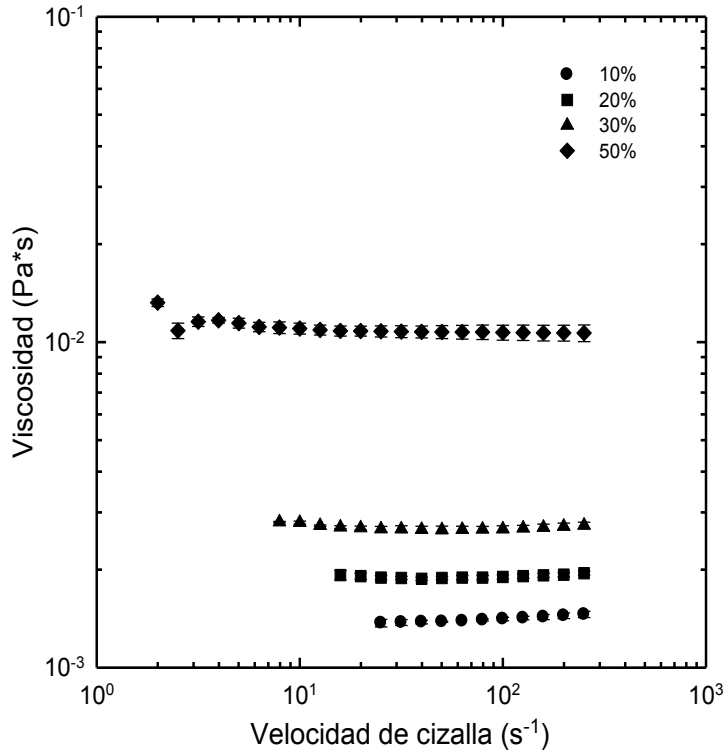


Figura 7 Viscosidad de las disoluciones de azúcar a diferentes concentraciones.

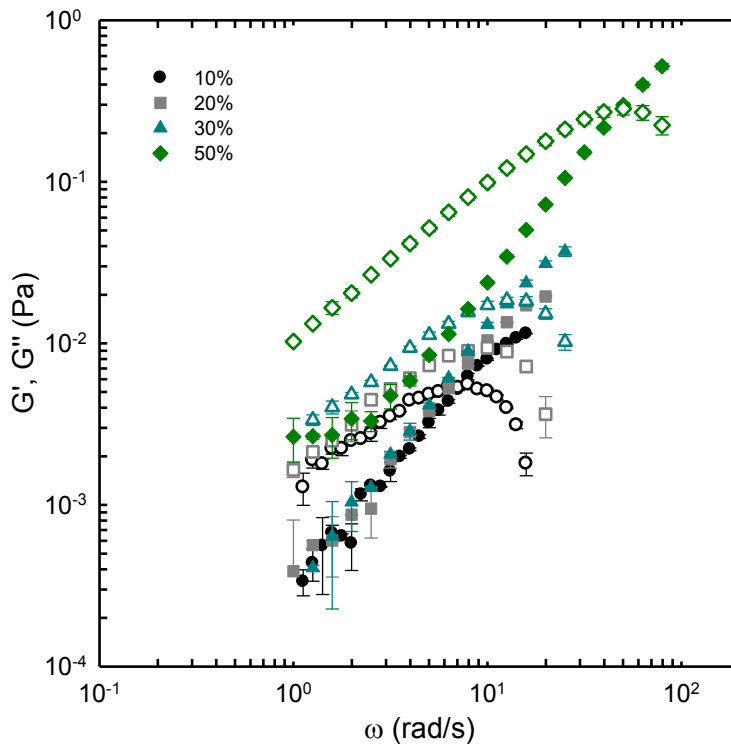


Figura 8. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia en las disoluciones de azúcar a diferentes concentraciones; G' (símbolos saturados), G'' (símbolos sin relleno).

El Az tiene un poder espesante considerablemente menor que xantana y guar, pero es interesante analizar las diferencias entre estos solutos como agentes estabilizadores de espuma, ya que tienen diferentes propiedades viscoelásticas y viscosas.

III. IV ADICIÓN DE AZÚCAR CON POLISACÁRIDOS

Además de comparar el efecto individual que el azúcar y los polisacáridos ejercen por separado en las espumas, también se combinó xantana y guar con azúcar al 20% m/m. En disolución acuosa, xantana es una molécula rígida, guar es flexible y el azúcar posee una baja viscosidad y comportamiento newtoniano; la combinación de estas moléculas puede producir un efecto sinérgico o antagónico en la estabilidad, overrun, propiedades de flujo y viscoelásticas.

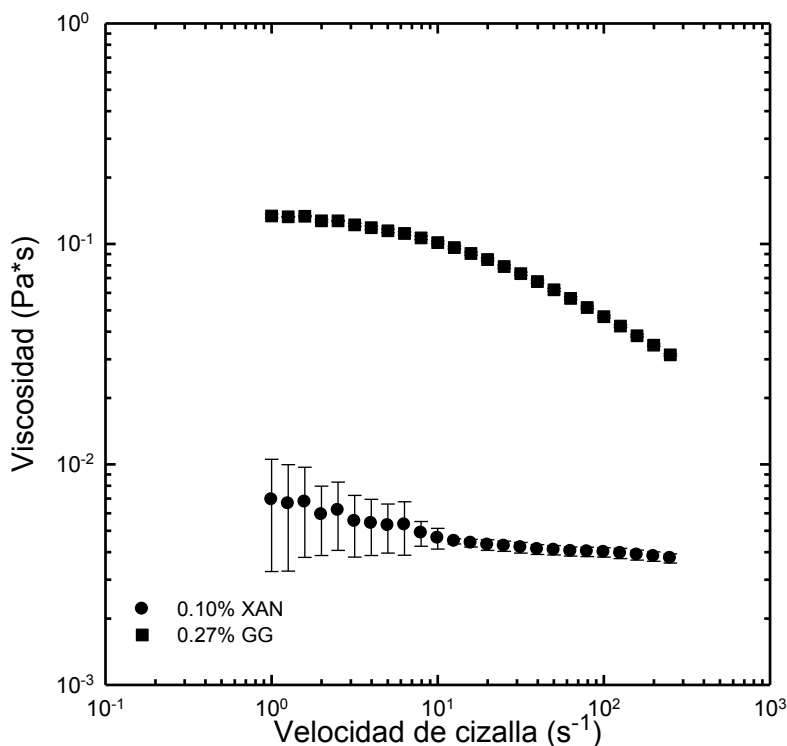


Figura 9. Viscosidad de las disoluciones con 20% m/m de azúcar con xantana y guar.

Como se observa en la Figura 9 la mezcla Az-GG produjo una mayor viscosidad, que la obtenida de forma individual y la mezcla Az-XAN tuvo una viscosidad mayor que la obtenida por 20% m/m de azúcar, pero menor que la producida por 0.10% m/m de xantana. Un comportamiento reofluídificante, es la traducción macroscópica de la existencia de entrecruzamientos macromoleculares, el cizallamiento produce un desenredo progresivo que se traduce en un adelgazamiento por cizalla (Multon, 1999); tanto la guar como la xantana lo presentan, sin embargo, solo la mezcla Az-GG siguió este comportamiento.

Es posible que en la mezcla Az- XAN los grupos hidroxilo presentes en la sacarosa del azúcar capten una gran cantidad de agua inmovilizándola, lo que indica una reducción en el tamaño hidrodinámico de la xantana, por lo que ésta no puede adoptar su conformación de hélice y disminuye las interacciones intermoleculares, por lo tanto el movimiento de las cadenas de pol *al.*, 2009).

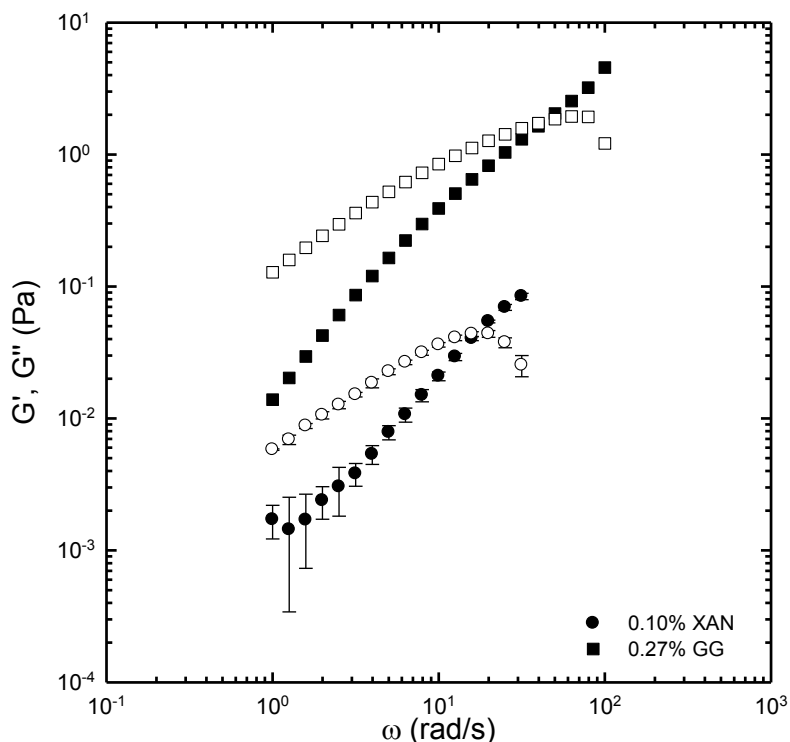


Figura 10. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia en las disoluciones con 20% m/m de azúcar con xantana y guar; G' (símbolos negros), G'' (símbolos blancos).

La variación de los módulos dinámicos de ambas disoluciones, muestra un predominio del carácter viscoso, y comportamiento de disoluciones concentradas, también es posible observar que en la mezcla Az-GG las cadenas son más flexibles que en Az-XAN. La diferencia en la viscosidad y las propiedades viscoelásticas, permite inferir que las espumas con Az-GG serán posiblemente más estables que las espumas con Az-XAN.

III. V OVERRUN Y ESTABILIDAD

La viscosidad de las disoluciones precursoras WPI-XAN, WPI-GG y WPI-Az aumentó con la concentración de polisacáridos y azúcar (Figs. 11, 12 y 13). Las disoluciones con polisacáridos presentaron un comportamiento de adelgazamiento por cizalla y las disoluciones con azúcar uno newtoniano.

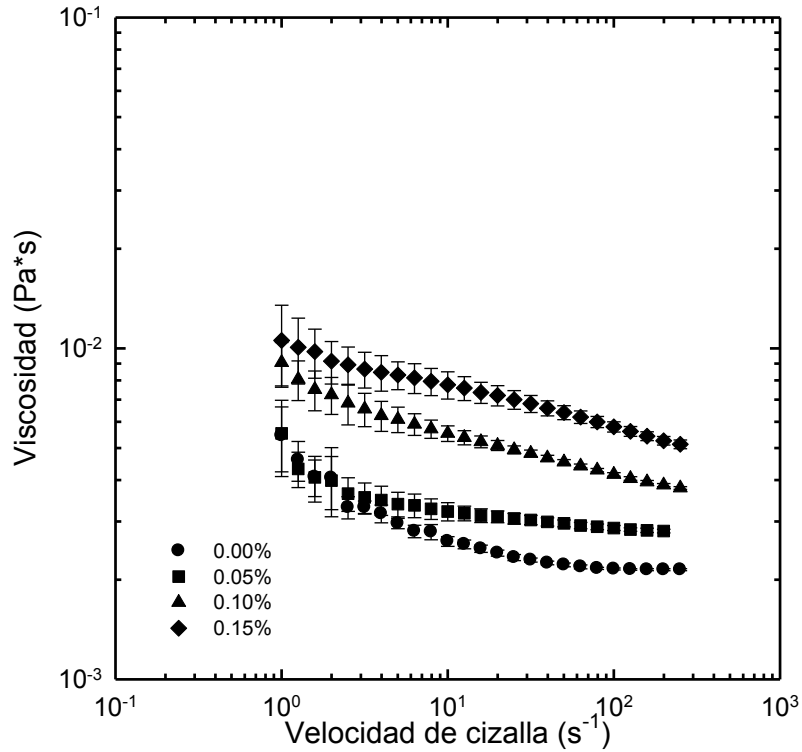


Figura 11. Viscosidad de disoluciones precursoras, con 10% m/m de WPI y diferentes

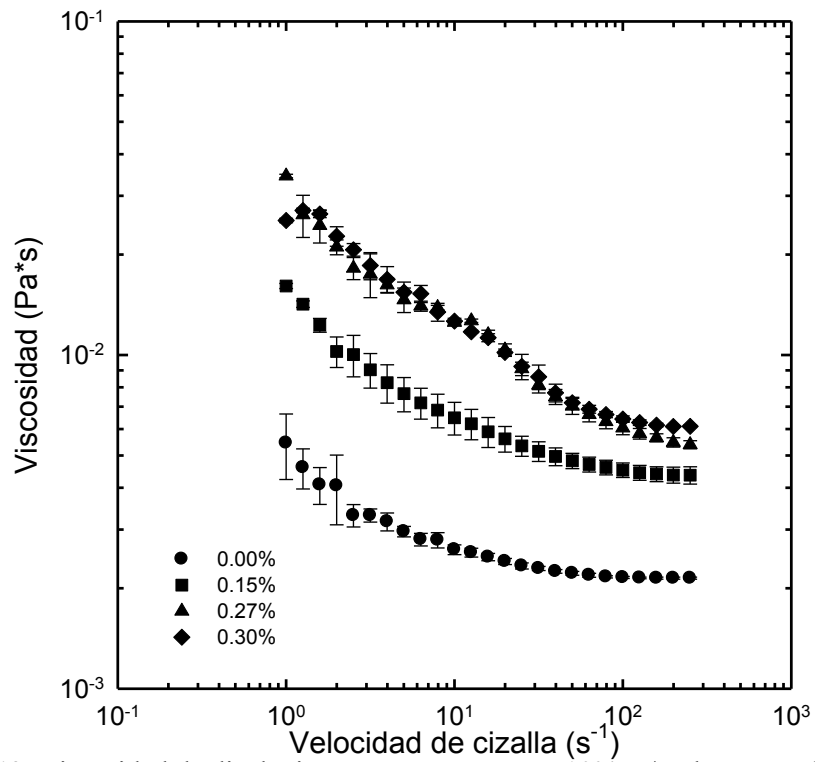


Figura 12. Viscosidad de disoluciones precursoras, con 10% m/m de WPI y diferentes concentraciones de guar.

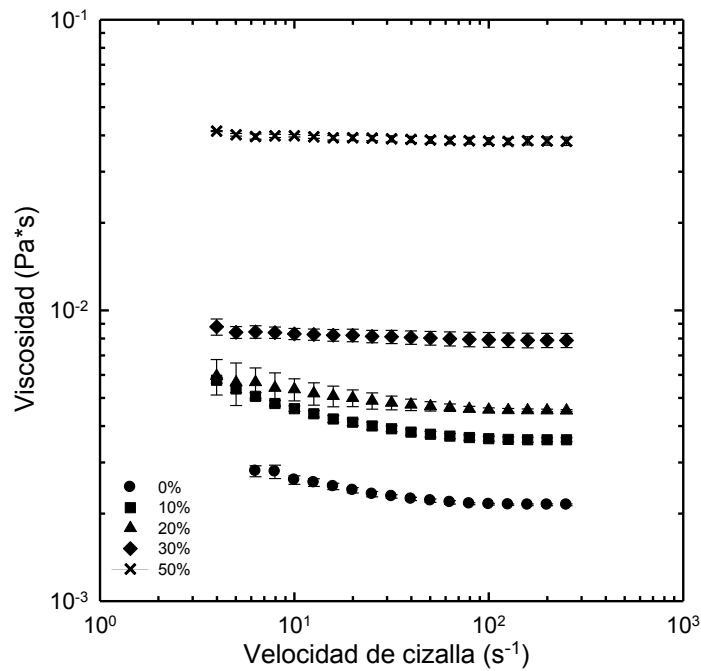


Figura 13. Viscosidad de disoluciones precursoras, con 10% m/m de WPI y diferentes concentraciones de azúcar.

El overrun es afectado por el aumento de la viscosidad del líquido en el que se dispersa aire, debido a que una mayor viscosidad impide la incorporación de gas (Carp *et al.*, 2001). Como lo muestran las Figuras 11 y 12, las mezclas de WPI con GG alcanzaron una mayor viscosidad que las de WPI-XAN; las espumas formadas con dichas disoluciones son las que tienen una mayor red

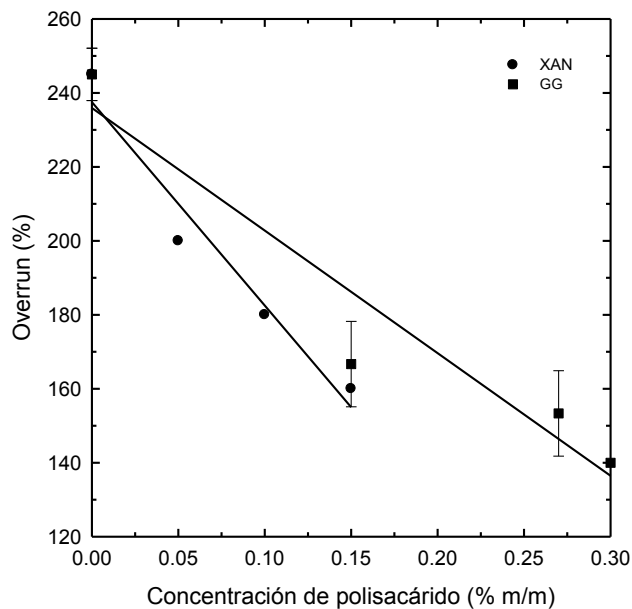


Figura 14. Efecto de la concentración de polisacáridos sobre el overrun con 10% m/m de WPI. Las líneas continuas representan la regresión lineal de dichos datos.

Para 0.15, 0.27 y 0.30% m/m de guar el overrun disminuyó 33, 39 y 44%, respectivamente, en comparación con la espuma que sólo contiene proteína. Para las disoluciones que contienen xantana, la disminución fue del 20, 28 y 36% para 0.05, 0.10 y 0.15% m/m de xantana, respectivamente. Por último las disoluciones que contienen azúcar, la disminución fue del 10% para 10% m/m, 16% para 20% m/m, 34% para 30% m/m y 30% para 50% m/m (Fig. 15).

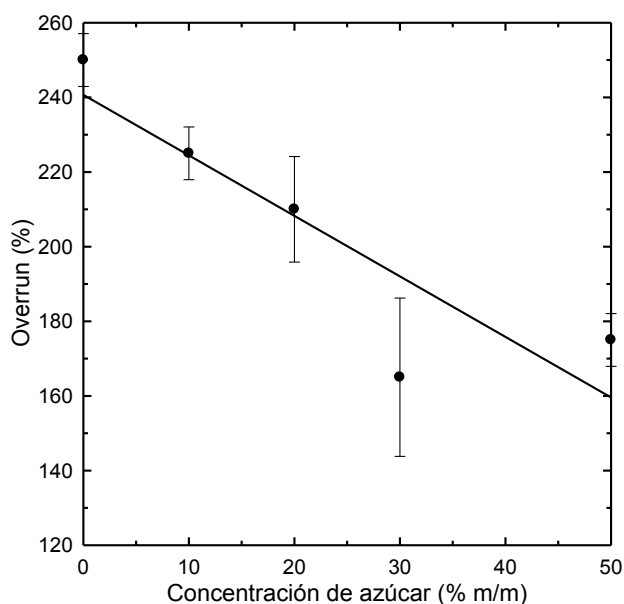


Figura 15. Efecto de la concentración de azúcar sobre el overrun con 10% m/m de WPI. La línea continua representa la regresión lineal de dichos datos.

La pendiente de la regresión lineal de overrun con respecto a la concentración de polisacárido y azúcar (Tabla 3) muestra que la pendiente disminuyó en el orden de WPI-XAN > WPI-GG > WPI-Az, es decir, la disminución del overrun fue mayor con el aumento de la concentración de xantana que con el aumento de concentración de guar. La disminución de overrun en relación con el aumento de azúcar fue 339 veces menor con respecto a xantana y 205 veces menor con respecto a guar. Esta correlación refleja el poder espesante de los polisacáridos con respecto al azúcar, ya que estos dos polisacáridos son macromoléculas que en medio acuoso forman puentes de hidrógeno además de formar una red tridimensional que atrapa el agua, en comparación con el azúcar refinada que es esencialmente sacarosa una molécula pequeña en comparación a xantana o guar.

La viscosidad intrínseca de xantana en medios acuosos es alta (5000-7000 ml / g), debido a su alto peso molecular, y su conformación rígida en disolución. La viscosidad intrínseca de guar en medios acuosos es considerablemente menor (675 ml / g), y esto puede explicar por qué la disminución de overrun fue mayor con concentraciones más altas de xantana.

Tabla 3. Correlación entre overrun y concentración de polisacáridos y azúcar

Disoluciones	Ordenada (%)	Pendiente	r
WPI con xantana	238	-550.00	0.9760
WPI con guar	236	-331.54	0.9598
WPI con azúcar	241	-1.62	0.8867

El overrun producido por la combinación de WPI-Az-GG fue mayor que el de WPI-GG a pesar de que la viscosidad de la disolución precursora WPI-Az-GG fue mayor (Fig. 17). La diferencia en overrun de estas espumas no es significativa. En el caso de WPI-XAN y WPI-Az-XAN, la viscosidad de las disoluciones precursoras fue mayor en WPI-Az-XAN, sin embargo, no existe una variación significativa en el overrun obtenido.

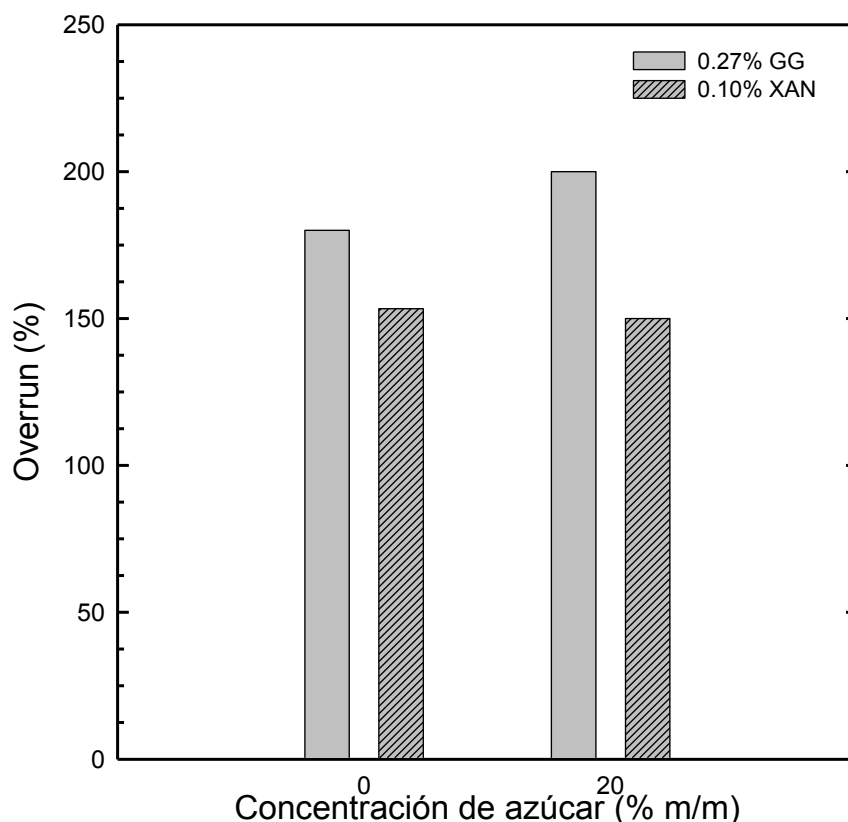


Figura 16. Efecto de la mezcla azúcar-polisacáridos sobre el overrun con 10% m/m de WPI.

La Figura 17 muestra que la viscosidad de la mezcla WPI-Az con xantana fue mayor, que con guar; es por ello que en la menos viscosa se logró atrapar más aire, obteniendo mayor overrun.

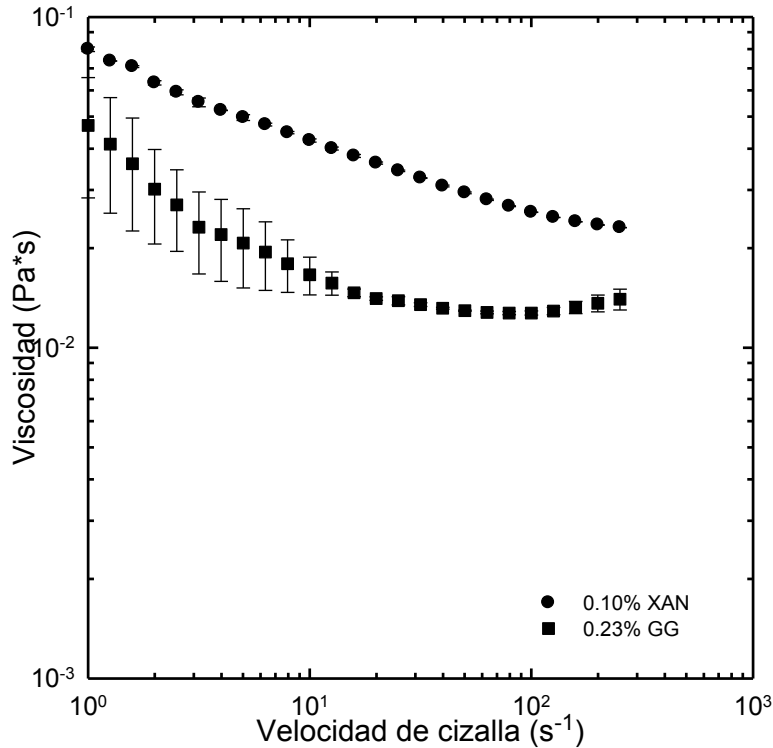


Figura 17. Viscosidad de disoluciones precursoras, con 10% m/m de WPI, 20% m/m de azúcar con xantana y guar.

Por otra parte la estabilidad se midió en función del líquido drenado, las espumas formadas con proteína - azúcar (con excepción de 10% m/m WPI, 50% m/m Az) y proteína – guar presentan un comportamiento descrito por la Ecuación 6:

$$\frac{V_{liq}}{V_f} = \frac{Kt}{t_{1/2} + t} \quad (6)$$

donde V_{liq} es el volumen de líquido drenado (mL), V_f el volumen final de líquido drenado una vez colapsada toda la espuma en (mL); $t_{1/2}$ la vida media, es decir, el tiempo en que se obtiene la mitad del volumen final de líquido drenado (min); t representa el tiempo (min) y K es una constante adimensional. El resto de las espumas siguen un comportamiento lineal descrito por la Ecuación 7:

$$\frac{V_{liq}}{V_f} = mt + b \quad (7)$$

donde V_{liq} , V_f y t tienen el mismo significado que en la ecuación (6), m es la pendiente (min⁻¹) y b la ordenada al origen de la línea recta, adimensional (Figuras 18 y 20).

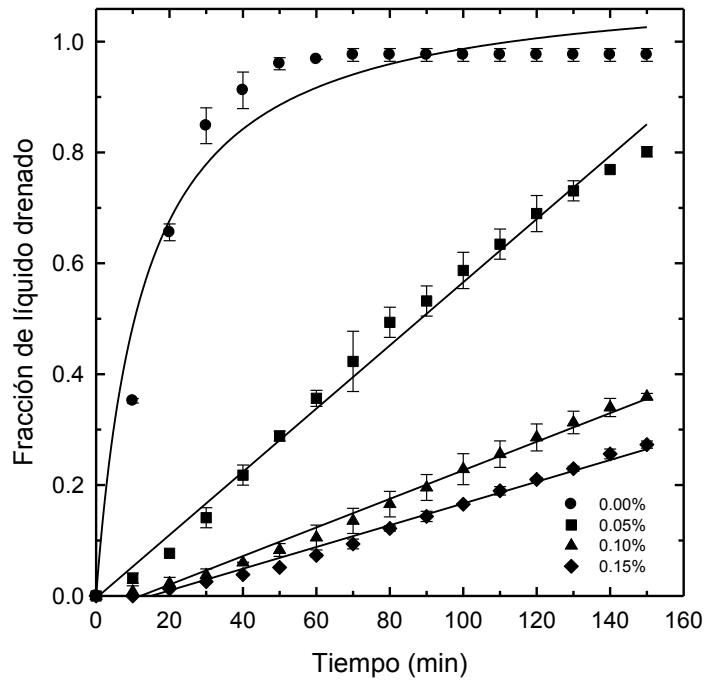


Figura 18. Cinética de estabilidad de espuma con 10% m/m de WPI con diferentes concentraciones de xantana.

Los valores obtenidos con las ecuaciones 6 y 7 se presentan en la Tabla 4. En la Figura 18 se observa una mayor estabilidad en aquellas espumas que fueron preparadas con disoluciones de WPI-XAN. el tiempo de vida media con 0.05% m/m de xantana aumenta 6.8 veces en relac

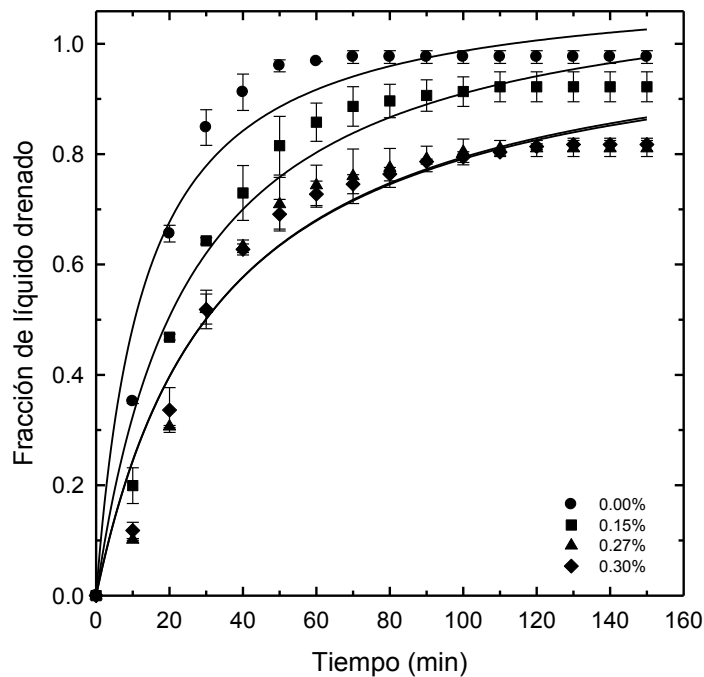


Figura 19. Cinética de estabilidad de espuma con 10% m/m de WPI con diferentes concentraciones de guar

La estabilidad en las formulaciones con concentraciones de azúcar menor de 30% m/m, 0.15% m/m de guar y las mezclas WPI-Az-XAN y WPI-Az-GG no presentan diferencia significativa con la espuma formada solo con 10% m/m de WPI (Figs 19, 20 y 21)

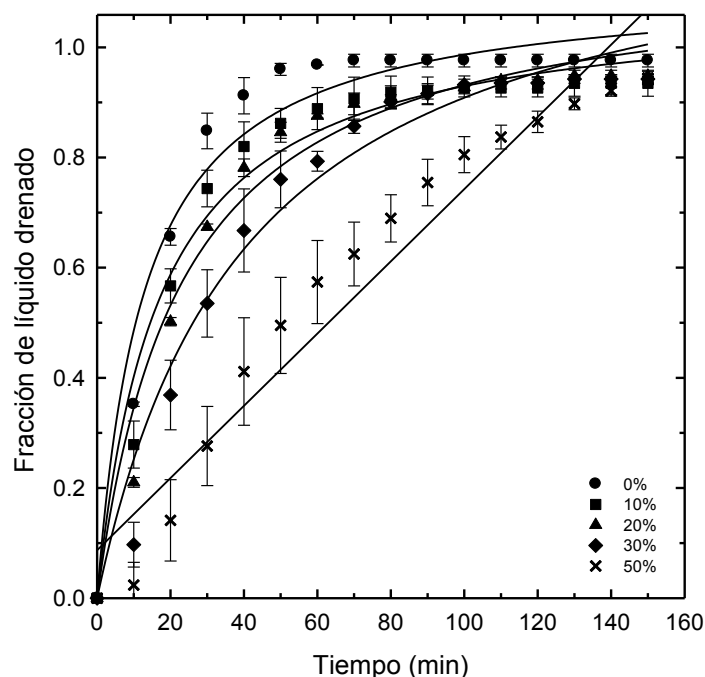


Figura 20. Cinética de estabilidad de espuma con 10% m/m de WPI con diferentes concentraciones

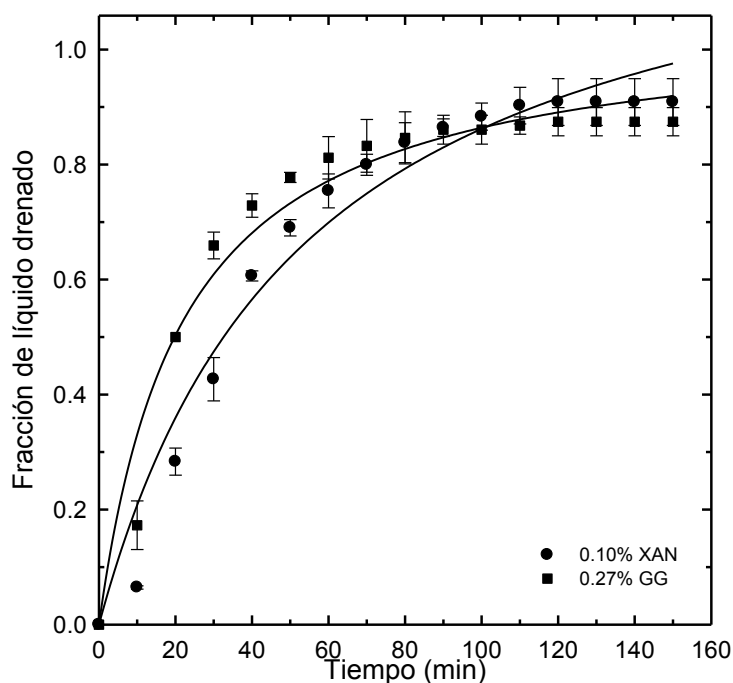


Figura 21. Cinética de estabilidad de espuma con 10% m/m de WPI, 20% m/m de azúcar con xantana y guar.

Tabla 4. Parámetros de estabilidad de espumas.

Formulación (% m/m)	t _{1/2} (min)	r
10 WPI	12.92 ^a	0.9807
10 WPI + 10 Az	17.04 ^{ab}	0.9856
10 WPI + 20 Az	23.17 ^{abc}	0.9856
10 WPI + 0.15 GG	24.97 ^{abc}	0.9857
10 WPI + 30 Az	32.70 ^{abc}	0.9838
10 WPI + 20 Az + 0.27 GG	21.85 ^{abc}	0.9815
10 WPI + 20 Az + 0.10 XAN	35.77 ^{abc}	0.9825
10 WPI + 0.27 GG	33.44 ^{bc}	0.9758
10 WPI + 0.30 GG	32.97 ^{bc}	0.9834
10 WPI + 50 Az	62.96 ^{cd}	0.9683
10 WPI + 0.05 XAN	88.44 ^d	0.9957
10 WPI + 0.10 XAN	205.95 ^e	0.9955
10 WPI + 0.15 XAN	269.88 ^e	0.9920

Letras diferentes representan diferencia significativa, $\alpha=0.05$

La estabilidad de las espumas mejora si se aumenta la viscosidad del líquido dispersante (Badui, 2006), en este caso como se observa en la curva de flujo (Figs. 11 y 12) las disoluciones WPI-GG y 50% de azúcar tienen mayor viscosidad que WPI-XAN, por lo que parece que el efecto de la viscosidad no es predominante en la estabilidad de las espumas formadas. La estructura molecular de los hidrocoloides y sus interacciones con las proteínas puede ser una causa de dicho comportamiento. A diferencia de guar, la xantana tiene grupos carboxilo, que en medio acuoso tiene una carga negativa, y por lo tanto puede establecer interacciones electrostáticas con las proteínas. Una vez formada la película de proteína alrededor de las burbujas de aire, las moléculas de xantana pueden interactuar con las proteínas formando capas múltiples que como resultado mejoran la estabilidad de la espuma. Además como ya se mencionó antes, la xantana tiene un peso molecular más grande que la guar, llega a ser cuatro veces mayor, y como reporta Istarova *et al.* (2005) la estabilidad de la espuma puede ser aumentada o disminuida dependiendo del peso molecular y el tamaño de los complejos proteína-polisacárido formados.

La combinación WPI-Az-XAN de formulaciones con xantana, fue la única cuya estabilidad no presentó diferencia significativa con respecto a la espuma formada por solo proteína, como ya se había mencionado antes, la presencia de sacarosa no permite a la xantana interactuar de la misma manera en que lo haría sin ésta; posiblemente la xantana no despliegue por completo su estructura, lo que le impide formar agregados estables con la proteína, de ahí que la estabilidad de esta mezcla sea menor.

III. VI PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS

La Figura 22 muestra el barrido de deformación de las disoluciones precursoras con WPI y xantana, estas presentan el comportamiento de soluciones diluidas, G'' es mayor que G' , en todas las formulaciones predomina el carácter viscoso, también se observa que la separación entre los módulos fue mayor con el aumento de la concentración de polisacárido.

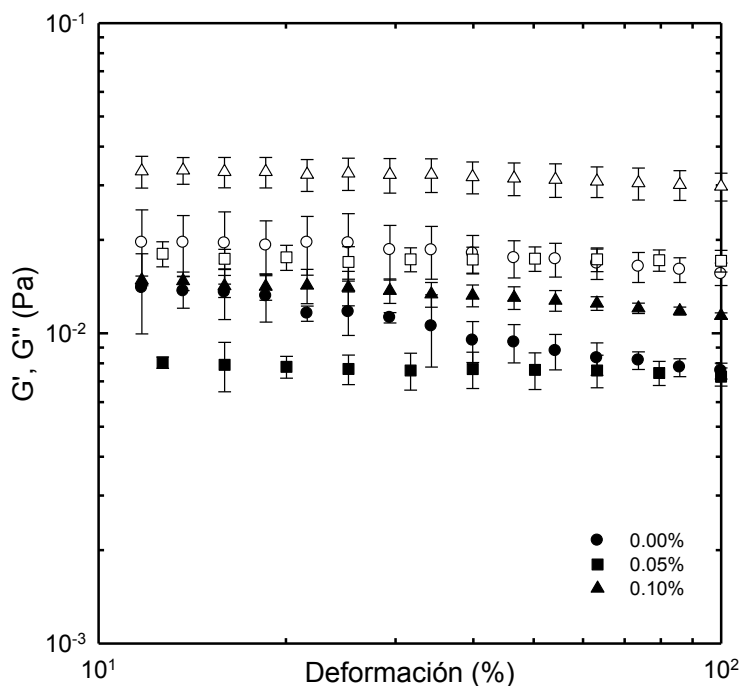


Figura 22. Variación de los módulos dinámicos con la deformación en las disoluciones precursoras con 10% m/m de WPI y xantana a diferentes concentraciones; G' (símbolos negros), G'' (símbolos blancos).

Al formar la espuma (Fig. 23) G' se encuentra por encima de G'' , esto indica un predominio del carácter elástico. La incorporación de aire al sistema provoca un reacomodo de los componentes de las disoluciones, el predominio de G' puede ser el resultado de la interacción de las proteínas en la interfase aire-agua provocado por el despliegue y orientación que adoptan en ella; la película formada por las proteínas y las interacciones proteína-polisacárido le confiere propiedades del tipo sólido. La ZVL para las espumas se encuentra en porcentajes de deformación menores que los de las disoluciones precursoras 0.1-1% y 1-100%, respectivamente, lo que muestra que las espumas son más sensibles a la deformación, es decir, las propiedades tipo sólido adquiridas son débiles. Este comportamiento se repite continuamente en todas las espumas y disoluciones, con pequeñas variaciones por lo que el resto de los barridos de deformación se encuentran en el Anexo 1.

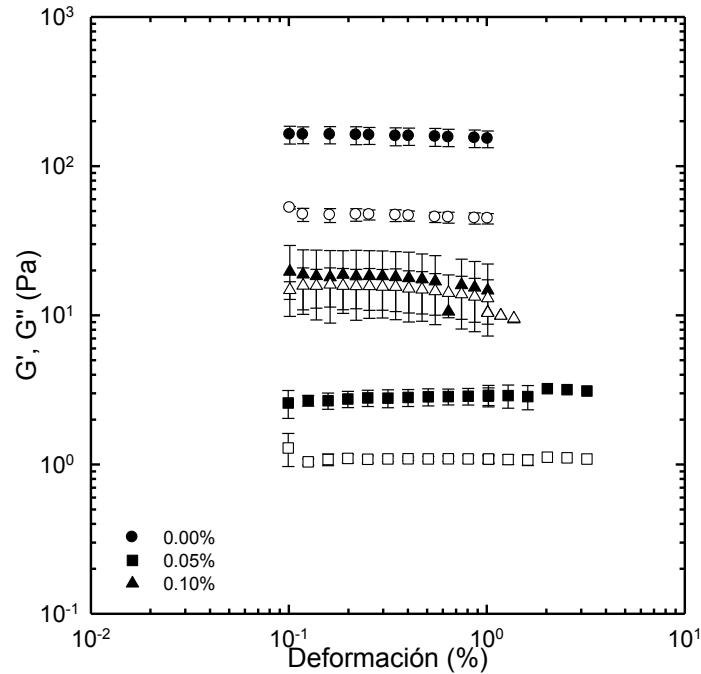


Figura 23. Variación de los módulos dinámicos con la deformación en las espumas con 10% m/m de WPI y xantana a diferentes concentraciones; G' (símbolos negros), G'' (símbolos blancos).

Las Figuras 24, 25 y 26 muestran la variación de los módulos dinámicos con la frecuencia de las disoluciones.

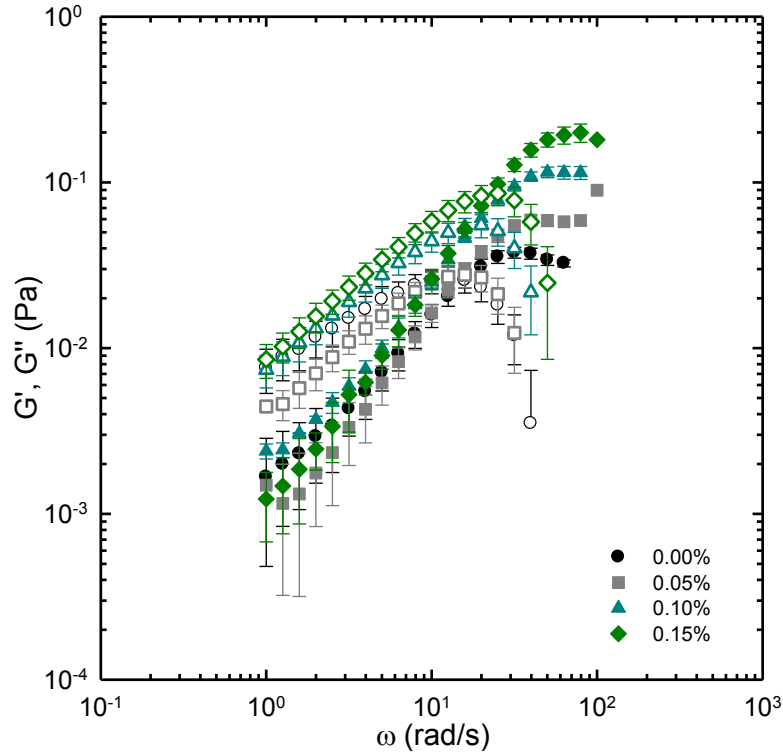


Figura 24. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia en las disoluciones precursoras con 10% m/m de WPI y xantana a diferentes concentraciones; G' (símbolos saturados), G'' (símbolos sin relleno).

Las disoluciones precursoras muestran el comportamiento de disoluciones concentradas, ya que hay una mayor dependencia de la frecuencia. Los módulos aumentaron con el aumento del contenido de polisacáridos y azúcar, con respecto a la disolución con 10% m/m de WPI y el punto de cruce se produjo a frecuencias más altas. Aunque el aumento de los módulos con la concentración fue mayor en azúcar, seguida de guar y por último en xantana; es evidente que la naturaleza elástica de las disoluciones precursoras depende del tipo de cosoluto añadido.

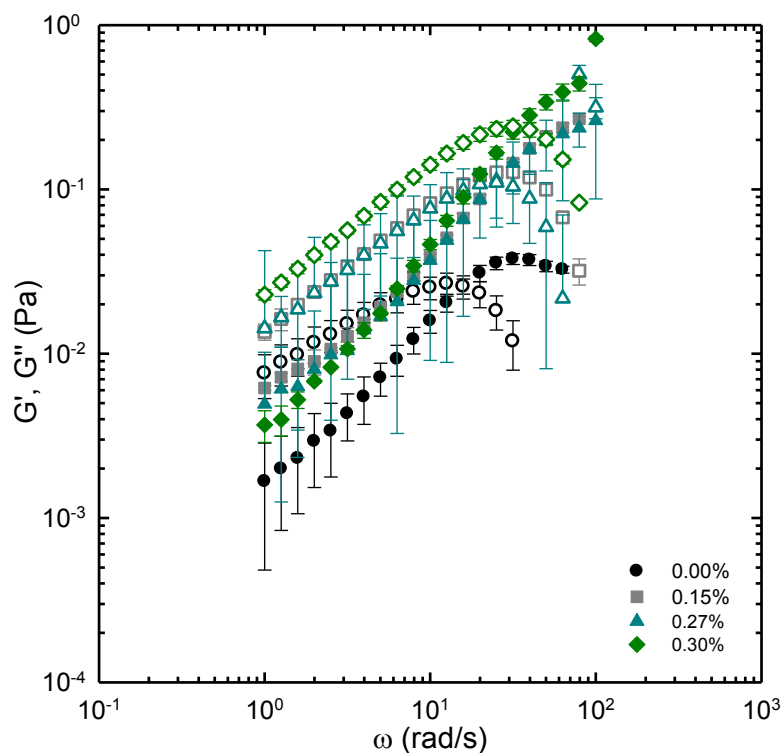


Figura 25. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia en las disoluciones precursoras con 10% m/m de WPI y guar a diferentes concentraciones; G' (símbolos saturados), G'' (símbolos sin relleno).

En cuanto a la mezcla proteína-azúcar-polisacáridos, la Figura 27 muestra que la variación de los módulos es dependiente de la frecuencia como en las disoluciones concentradas, además son mayores que los obtenidos en la mezcla proteína-azúcar y proteína-polisacáridos. También se observa un comportamiento más flexible en la combinación WPI-Az con guar que con xantana.

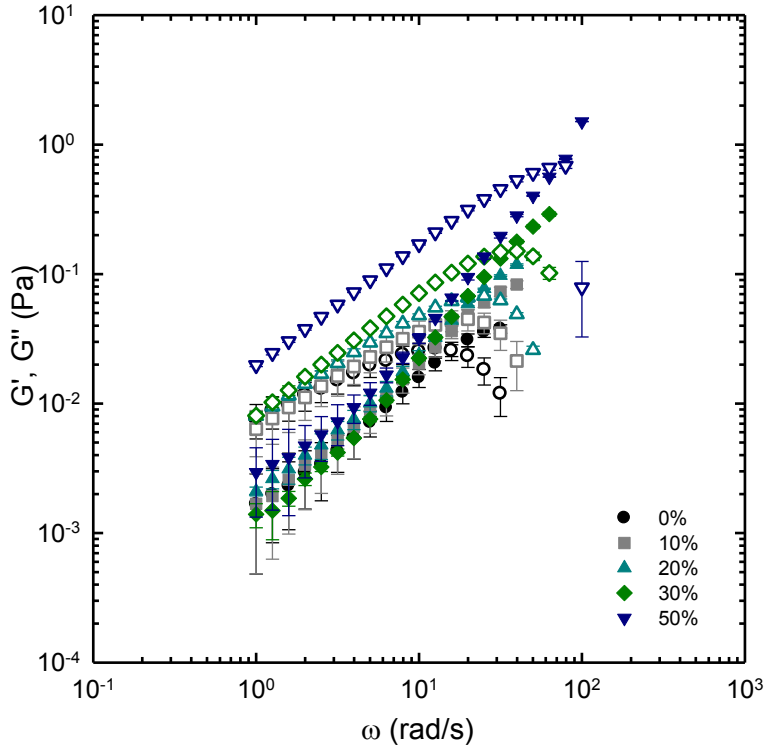


Figura 26. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia en las disoluciones precursoras con 10% m/r de WPI, 20% m/m de Az con xantana y guar; G' (símbolos blancos), G'' (símbolos

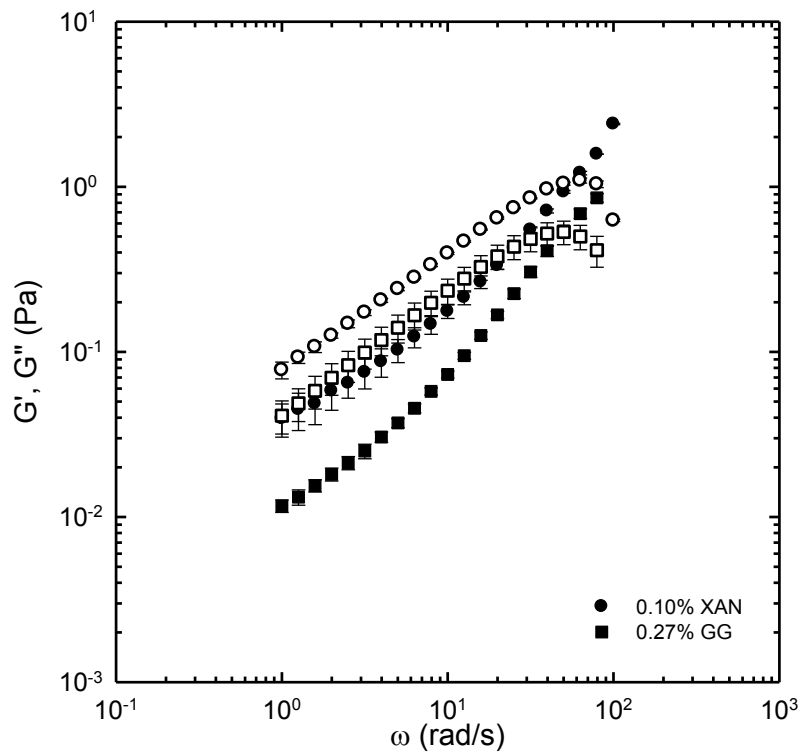


Figura 27. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia en las disoluciones precursoras con 10% m/m de WPI, 20% m/m de Az con xantana y guar; G' (símbolos negros), G'' (símbolos blancos).

En el caso de las espumas, Figs. 28 a 31, el comportamiento reológico cambió notablemente con respecto a las disoluciones precursoras. Se observó menor dependencia de los módulos con la frecuencia que en las disoluciones, además en el caso de las espumas los módulos no se cruzan, excepto en las espumas con xantana a más de 0.10% m/m. La tangente de delta de las espumas WPI-XAN no parece tener una tendencia y se encuentra en el intervalo 0.9-1; comportamiento característico de un gel o de un sistema estructurado. La variación de los módulos con respecto a la frecuencia en las espumas con WPI, fue más sensible a la presencia de xantana, que guar o azúcar e incluso a la mezcla Az-XAN y Az-GG.

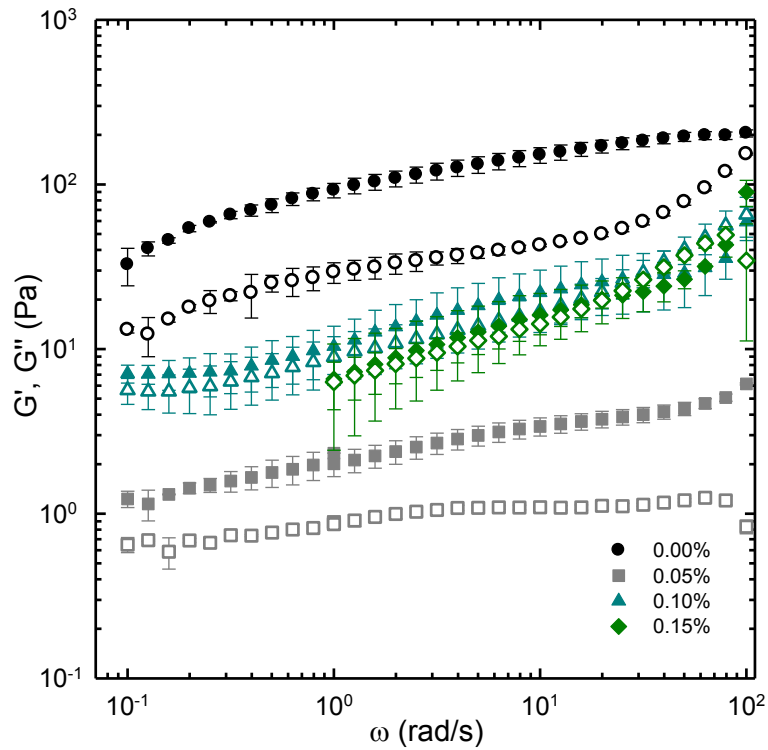


Figura 28. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia en las espumas con 10% m/m de WPI y xantana a diferentes concentraciones; G' (símbolos saturados), G'' (símbolos sin relleno).

El comportamiento de las espumas de WPI con guar, azúcar, Az-GG y Az-XAN muestra el mismo comportamiento de las espumas sin polisacárido; G' es mayor que G'' y la tangente de delta es menor que uno lo que afirma su carácter elástico. La variación de los módulos con respecto a la frecuencia observada en las espumas corresponde a lo descrito en la literatura (Germain *et al.*, 2014; Laporte, *et al.*, 2014), quienes reportan un comportamiento en el que el módulo de almacenamiento (G') es mayor que el de pérdida (G'') con poca variación con la frecuencia; estas características indican un comportamiento tipo gel. El comportamiento diferente entre las espumas de WPI-XAN con respecto al resto puede deberse a una mayor interacción entre las proteínas con xantana que con guar o azúcar.

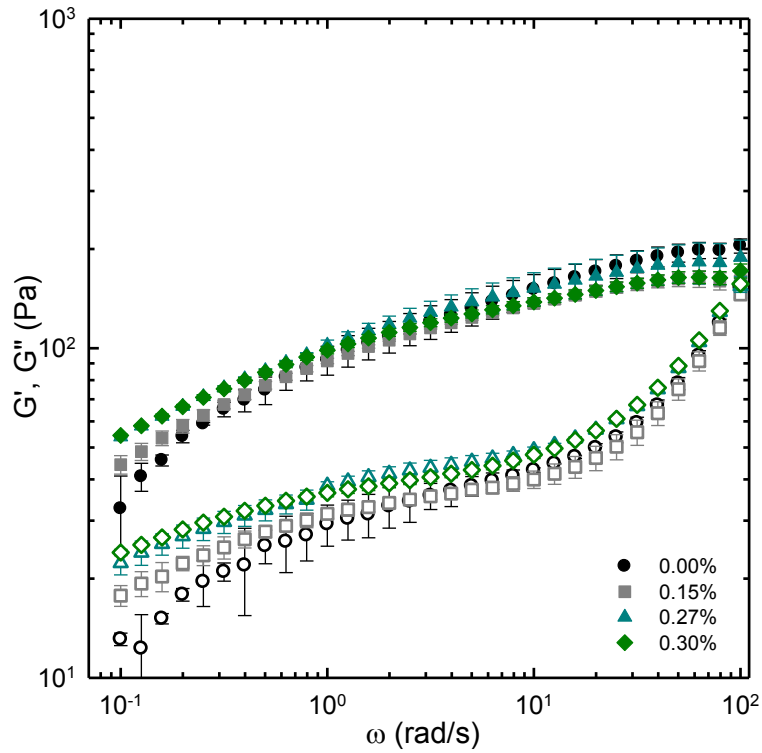


Figura 29. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia en las espumas con 10% m/m de WPI y guar a diferentes concentraciones (sin azúcar). (G' (símbolos saturados), G'' (símbolos sin relleno)).

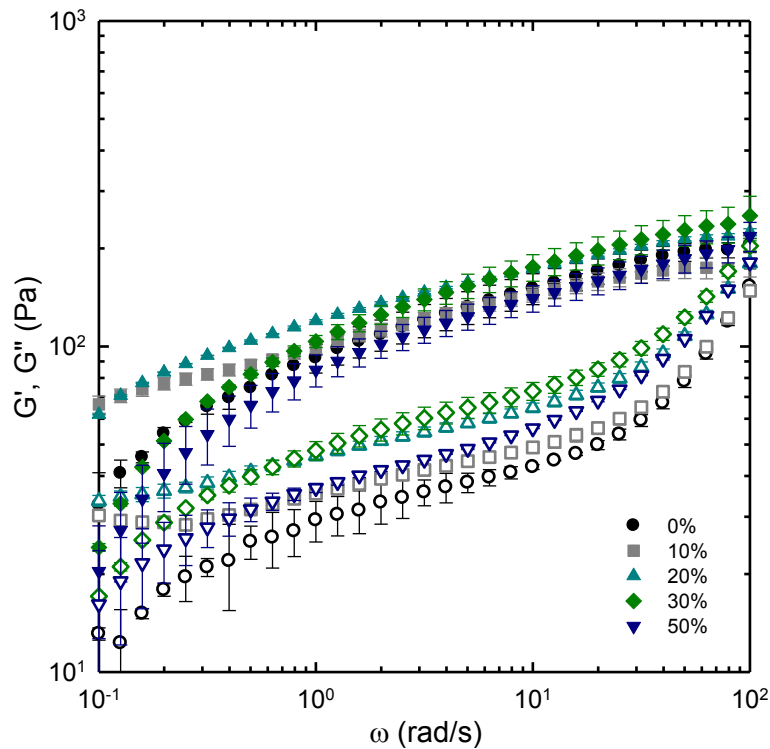


Figura 30. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia en las espumas con 10% m/m de WPI y azúcar a diferentes concentraciones; G' (símbolos saturados), G'' (símbolos sin relleno).

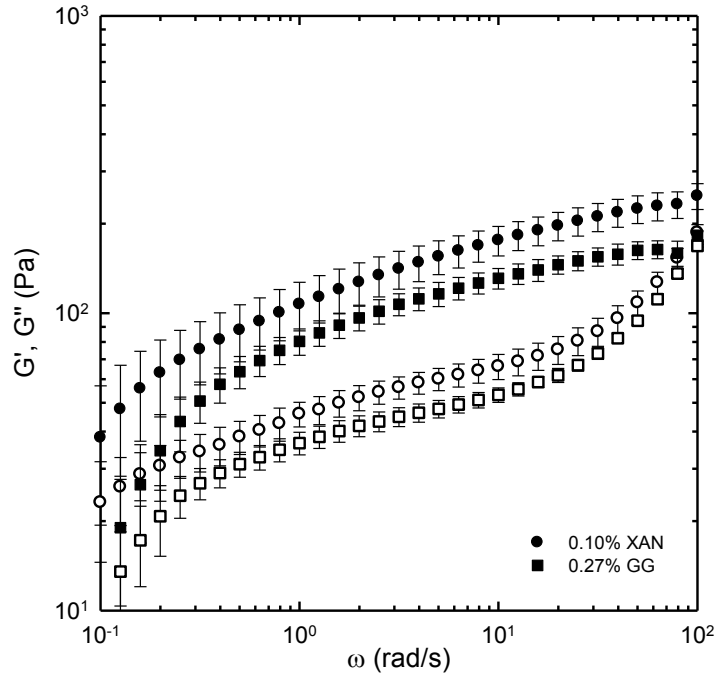


Figura 31. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia en las espumas con 10% m/m de WPI, 20% m/m de azúcar con xantana y guar; G' (símbolos negros), G'' (símbolos blancos).

Las curvas de flujo de las espumas de WPI con xantana, guar, azúcar, Az-XAN y Az-GG se presentan en las Figs 32, 33, 34, 35 y 36 respectivamente.

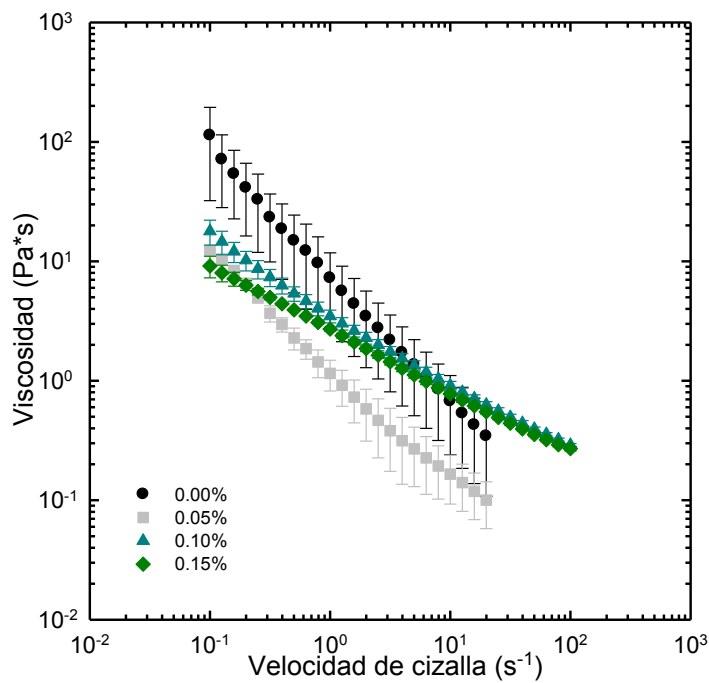


Figura 32. Viscosidad de las espumas de 10% m/m de WPI con xantana a diferentes concentraciones.

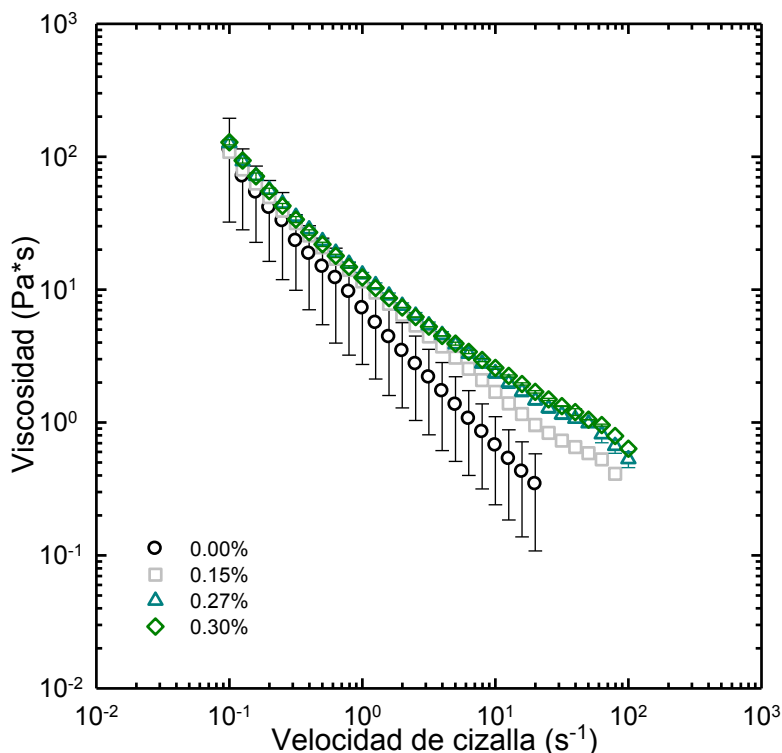


Figura 33. Viscosidad de las espumas de 10% m/m de WPI con guar a diferentes concentraciones.

Todas las espumas mostraron un comportamiento reofluidificante, las curvas de flujo obtenidas se describen adecuadamente por el modelo de ley de la potencia: $\eta = K\dot{\gamma}^{n-1}$, donde η representa la viscosidad, $\dot{\gamma}$ la velocidad de cizalla, K el índice de consistencia y n el índice de comportamiento.

Tabla 5. Correlación entre viscosidad y velocidad de cizalla de acuerdo al modelo de ley de la potencia.

Formulación (% m/m)	K (Pa·s ⁿ)	n	r ²
10 WPI + 0.05 XAN	1.3	0.07	0.9932
10 WPI + 0.10 XAN	3.7	0.41	0.9956
10 WPI + 0.15 XAN	2.7	0.48	0.9992
10 WPI + 0.15 GG	12.38	0.18	0.9955
10 WPI + 0.27 GG	14.84	0.25	0.9904
10 WPI + 0.30 GG	14.76	0.28	0.9846
10 WPI + 10Az	22.89	0.13	0.9978
10 WPI + 20Az	20.01	0.15	0.9972
10 WPI + 30Az	16.21	0.27	0.9983
10 WPI + 50Az	12.69	0.37	0.9916
10 WPI + 20Az + 0.10 XAN	16.84	0.22	0.9982
10 WPI + 20Az + 0.27 GG	13.23	0.31	0.9914

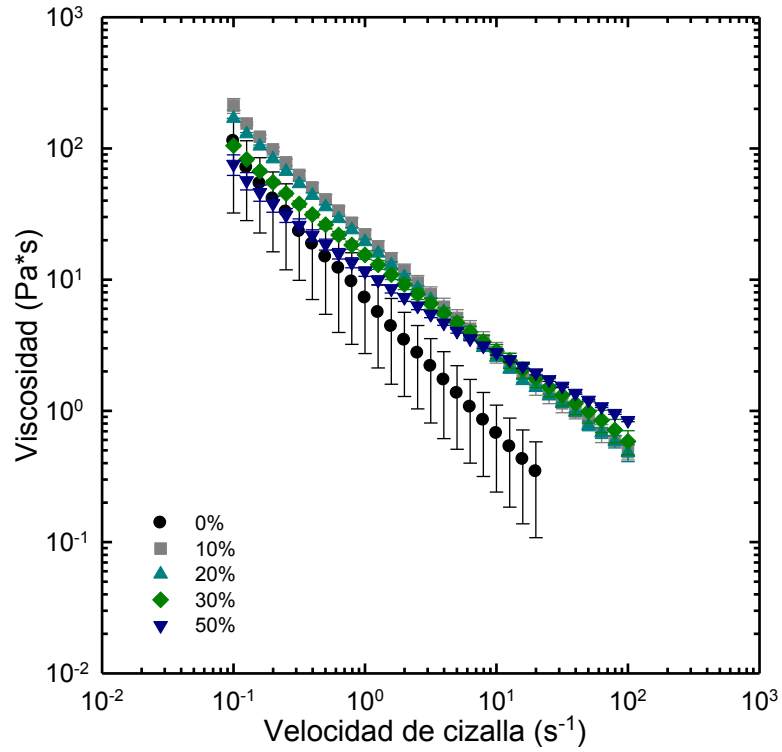


Figura 34. Viscosidad de las espumas de 10% m/m de WPI con azúcar a diferentes concentraciones.

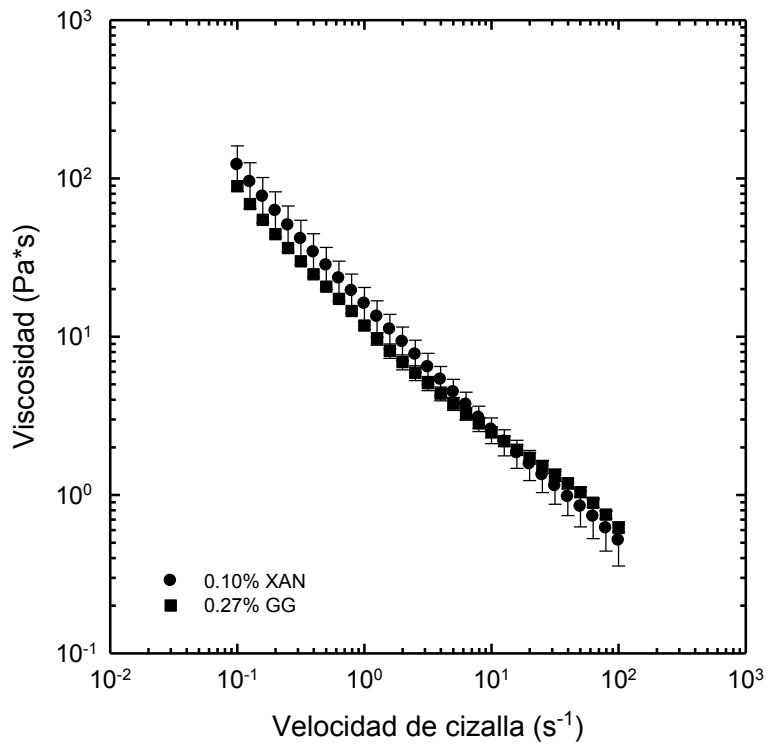


Figura 35. Viscosidad de las espumas de 10% m/m de WPI, 20% m/m de azúcar con xantana y guar.

Las espumas con guar y azúcar fueron más viscosas que las que contenían xantana. Además, en las espumas con 0,10 y 0.15% m/m de xantana, la viscosidad disminuyó en menor medida que para el resto de las espumas, lo que indica que las interacciones WPI-XAN son más fuertes y menos sensibles a la velocidad de cizalla, es decir, las espumas formadas a partir de 10% m/m de WPI con 0,10 y 0.15% en peso de xantana tiene una estructura más rígida que el resto. Como ya se mencionó en la estabilidad, los grupos carboxilo en la estructura de xantana y la conformación hélice que este polisacárido adopta, permiten una mayor interacción con las proteínas que confieren una mayor estabilidad frente la velocidad de deformación de cizalla.

CONCLUSIONES

La concentración de proteína y la velocidad de agitación tienen un efecto notable sobre el overrun y la estabilidad de las espumas. El aumento en la concentración de proteína, aumenta el overrun y la estabilidad, mientras que el aumento en la velocidad de agitación produce mayor overrun en disoluciones con la misma concentración de proteína, sin embargo, si el tiempo de agitación se prolonga se obtiene menor estabilidad que para periodos cortos.

La relación proteína-polisacárido tiene una fuerte influencia sobre la estabilidad y las propiedades reológicas de las espumas, el impacto en dichas propiedades dependerá de la fuerza de estas interacciones.

Se observó una relación inversamente proporcional entre la viscosidad de las disoluciones precursoras y el overrun de las espumas resultantes.

Se obtuvo una mayor estabilidad en las espumas de WPI con la adición de polisacáridos, que con la adición de azúcar refinada.

Entre las espumas estudiadas, las más estables son WPI-XAN que tiene una fuerte interacción proteína-polisacárido, ya que esto les permite formar una compleja multicapa sobre las burbujas de aire que es más resistente a la coalescencia.

Las espumas obtenidas con mezcla proteína-azúcar-polisacárido, fueron menos estables con respecto a las espumas de proteína-polisacárido.

Las espumas muestran características de comportamiento reológico similares a las de un gel, ya que G' predomina sobre G'' y no muestran una gran dependencia de la frecuencia.

No sólo la naturaleza polisacárido seleccionado para estabilizar las espumas, o las proteínas que las forman determinarán características de la espuma, las condiciones de formación también influyen directamente sobre las propiedades del sistema final.

REFERENCIAS

- Badui, S. 2006. Química de los alimentos. Cuarta edición. México: Pearson Educación.
- Bello, J., 1998. Ciencia y Tecnología Culinaria. Madrid: Ediciones Díaz Santos.
- Campbell, G. & Mougeot, E., 1999. Creation and characterization of aerated food products. *Trends in Food Science & Technology*, 10, 283-296.
- Carp, D., Bartholomai, G., Relkin, P. & Pilosof, A., 2001. Effects of denaturation on soy protein-xanthan interactions: comparison of a whipping-rheological and a bubbling method. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 21, 163-171.
- Damodaran, S., 2008. Aminoácidos, péptidos y proteínas. Fennema, R. O. Química de los Alimentos. 3ª edición. Zaragoza: Acribia S. A.
- Davis, J. & Foegeding, E., 2007. Comparisons of the foaming and interfacial properties of whey protein isolate and egg white proteins. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 56, 200-210.
- de Kruif, C. & Tuinier, R., 2001. Polysaccharide protein interactions. *Food Hydrocolloids*, 15, 555-563.
- Dickinson, E., 2003. Hydrocolloids at interfaces and influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocolloids*, 17, 25-39.
- Fennema, O. R., 2010. Química de alimentos. 3ª ed. Zaragoza: Acribia S. A.
- Fischer P. & Windhab, E., 2011. Rheology of food materials. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 16, 36-40.
- Foegeding, E., Davis, J., Doucet, D. & McGuffey, M., 2002. Advances in modifying and understanding whey protein functionality. *Trends in Food Science and Technology*, 13, 151-159.
- Germain, J. & Aguilera, J., 2014. Multi-scale properties of protein-stabilized foams. *Food Structure*, 1, 55-70.

Green, J., Littlejohn, K., Hooley, P. & Cox, P., 2013. Formation and stability of food foams and aerated emulsions: Hydrophobins as novel functional ingredients. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 18, 292-301.

Hemar, Y., Tamehana, M., Murno, P., & Singh, H., 2001. Viscosity, microstructure and phase behavior of aqueous mixtures of commercial milk protein products and xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 15, 565-574.

Istarova, T., Semenova, M., Sorokoumova, G., Selishcheva, A., Belyakova, L., Polikarpov, Y. & Anokhina, M. 2005. Effect of pH on the interactions of sodium caseinate with soy phospholipids in relation to the foaming ability of their mixtures. *Food Hydrocolloids*, 19, 429-440

Laporte, M., Della Valle, D., Loisel, C., Marze, S., Riaublanc, A. & Montillet, A., 2015. Rheological properties of food foams produced by SMX static mixers. *Food Hydrocolloids*, 43, 51-57.

Lowry, O., Rosebrugh, N., Farr, A. & Randall, R., 1951. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193, 265-275

McClements, D., 2006. Non-covalent interactions between proteins and polysaccharides. *Biotechnology Advances*, 24, 621-625

Multon, J., 1999. *Aditivos y auxiliares de fabricación en las industrias agroalimentarias*. Zaragoza: Acribia S. A.

Narchi, I., Vial, Ch. & Djelveh G., 2009. Effect of protein-polysaccharide mixtures on the continuous manufacturing of foamed food products. *Food Hydrocolloids*, 23, 188-201.

Nicorescu, I., Viaal, C., Loisel, C., Riaublanc, A., Djeveh, G., Cuvelier, G. & Legrand, J., 2010. Influence of protein heat treatment on the continuous production of food foams. *Food Research International*, 39, 1585-1593.

NMX-F-294-SCFI-2011 *Industria Azucarera y Alcohólera Determinación de humedad en muestras de azúcares cristalizados*. Secretaría de Economía. México

Pernell, C., Foegeding, E., Luck, P. & Davis, J., 2002. Properties of whey and egg white protein foams. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 204, 9-21.

Phillips, G. & Williams, P., 2009. Handbook of Hydrocolloids. Segunda edición. Cambridge: CCR.

Ramírez J. 2006. Introducción a la Reología de los Alimentos. Colombia: ReCiTeIA.

Rodríguez, M. & Pilosof A., 2011. Protein-polysaccharide interactions at fluid interfaces. Food Hydrocolloids, 25, 1925-1937.

Schramm, L. S., 2005. Emulsions, Foams and Suspensions: Fundamentals and Applications. Alemania: Wiley-VCH.

Stephen, A., Phillips, G. & Williams, P., 2006. Food Polysaccharides and Their Applications. Segunda edición. New York: CCR.

Yang, X. & Foegeding, E., 2011. The stability and physical properties of egg white and whey protein foams explained based on microstructure and interfacial properties. Food Hydrocolloids, 25, 1687-1701.

Walstra, P., 2002. Physical Chemistry of Foods. New York: Marcel Dekker

Wang, B., Wang, L., Li, D., Özkan, N., Li, S. & Mao, Z., 2009. Rheological properties of waxy maize starch and xanthan gum mixtures in the presence of sucrose. Carbohydrate Polymers, 77, 472-481.

ANEXO 1

IV. I BARRIDO DE DEFORMACIÓN DE LAS DISOLUCIONES DE XANTANA, GUAR, AZÚCA

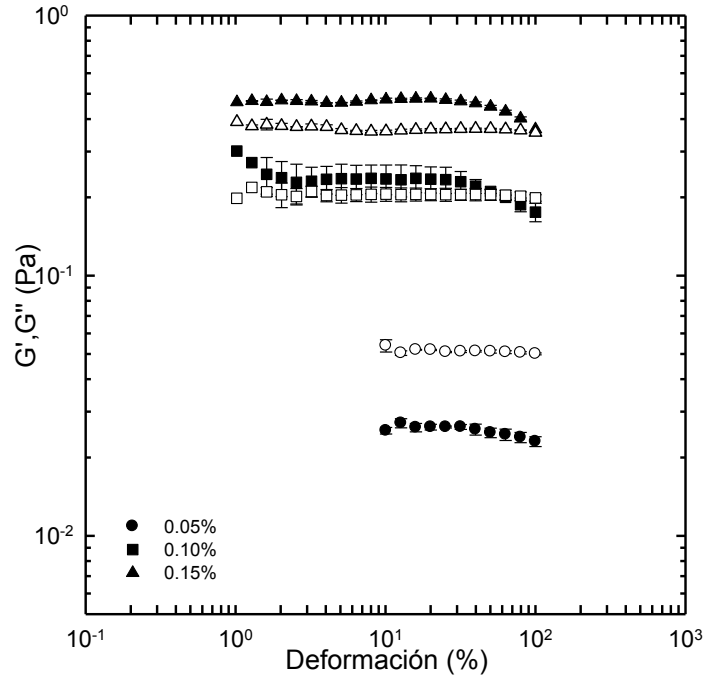


Figura 36. Variación de los módulos dinámicos con la deformación en las disoluciones de xantana diferentes concentraciones: G' (símbolos negro), G'' (símbolos blancos).

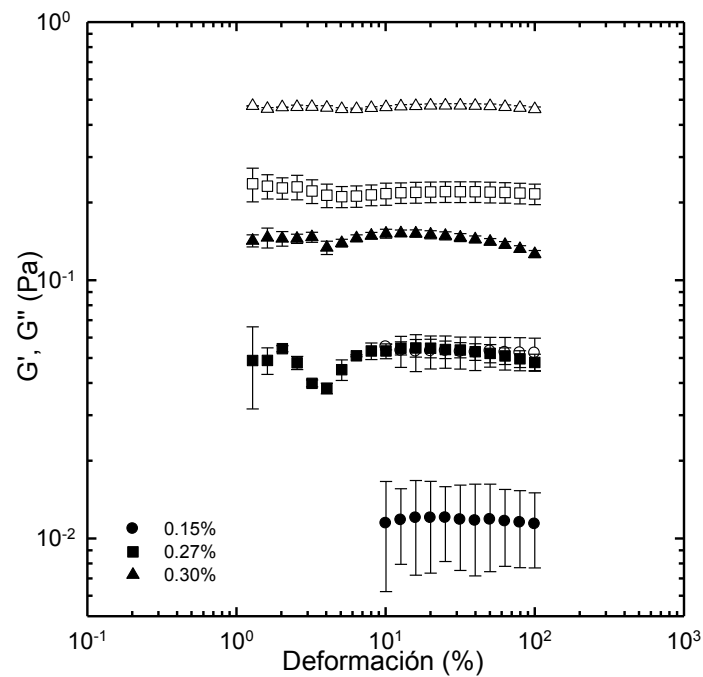


Figura 37. Variación de los módulos dinámicos con la deformación en las disoluciones de guar diferentes concentraciones; G' (símbolos negro), G'' (símbolos blancos).

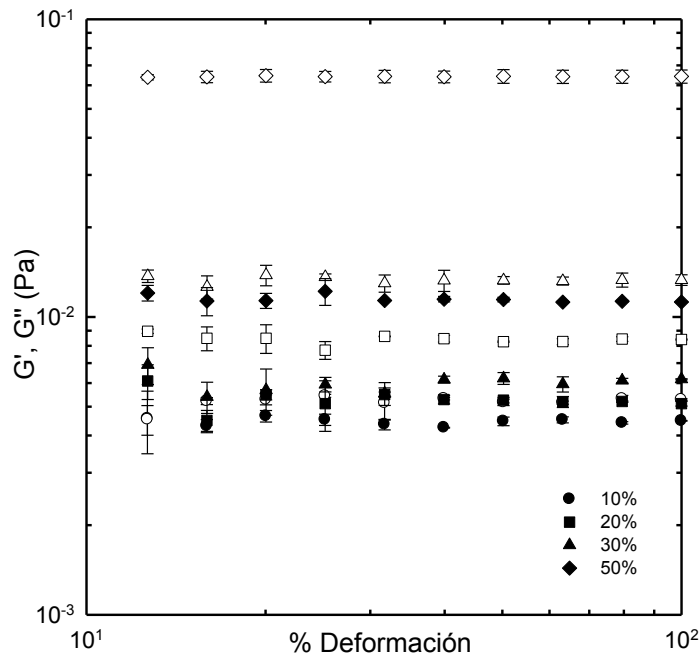


Figura 38. Variación de los módulos dinámicos con la deformación en las disoluciones de azúcar a diferentes concentraciones; G' (símbolos negro), G'' (símbolos blancos).

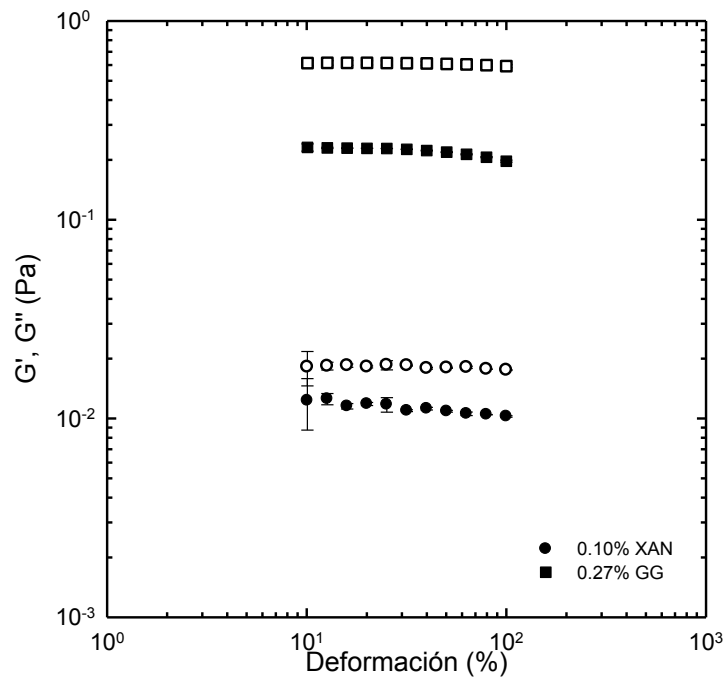


Figura 39. Variación de los módulos dinámicos con la deformación en las disoluciones de azúcar 20% m/con xantana y guar; G' (símbolos negro), G'' (símbolos blancos).

IV. II TANGENTE δ OBTENIDA DEL BARRIDO DE FRECUENCIA DE LAS DISOLUCIONES DE XANTANA, GUAR, AZÚCAR, Az-XAN Y Az-GG.

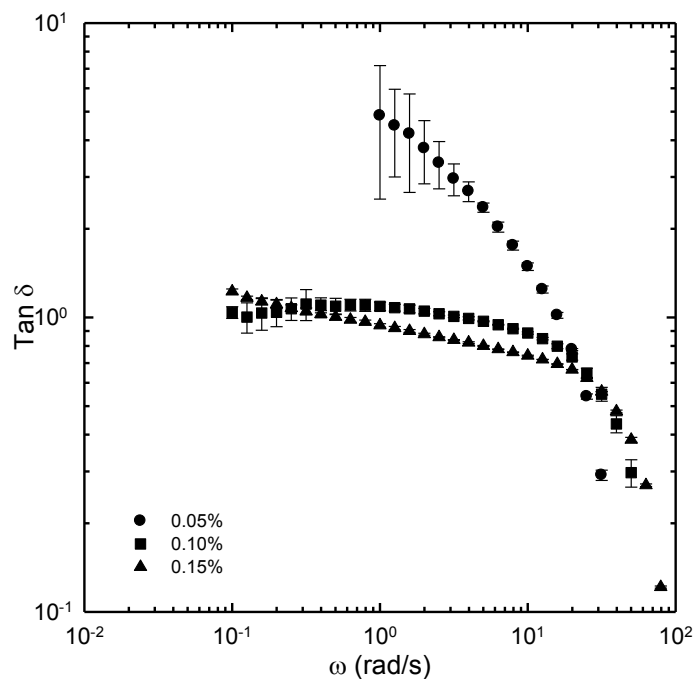


Figura 40. Tangente δ en función de la frecuencia de xantana a diferentes concentraciones (% m/m)

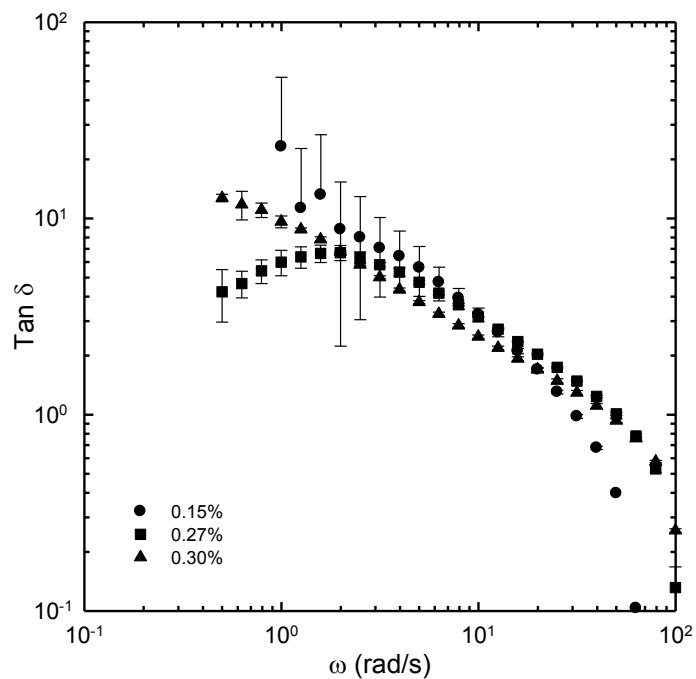


Figura 41. Tangente δ en función de la frecuencia de guar a diferentes concentraciones (% m/m).

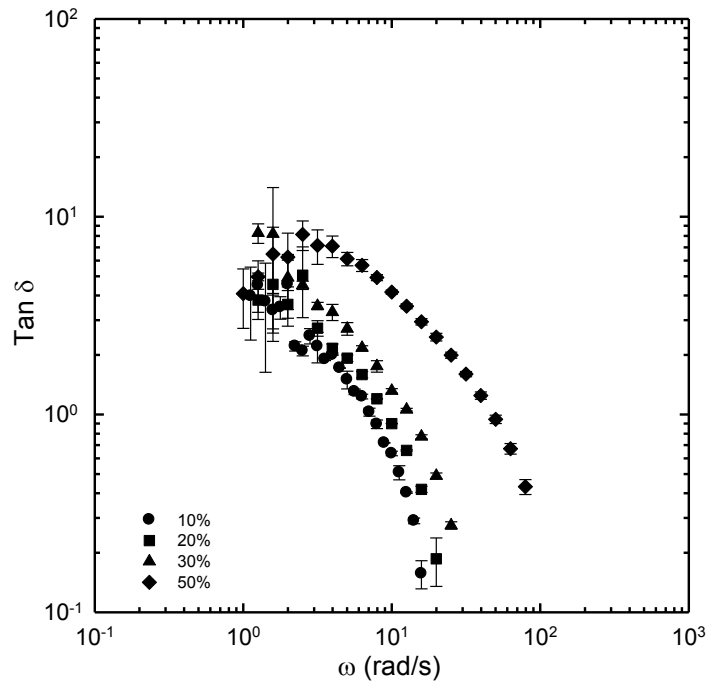


Figura 42. Tangente δ en función de la frecuencia de azúcar a diferentes concentraciones (% m/m).

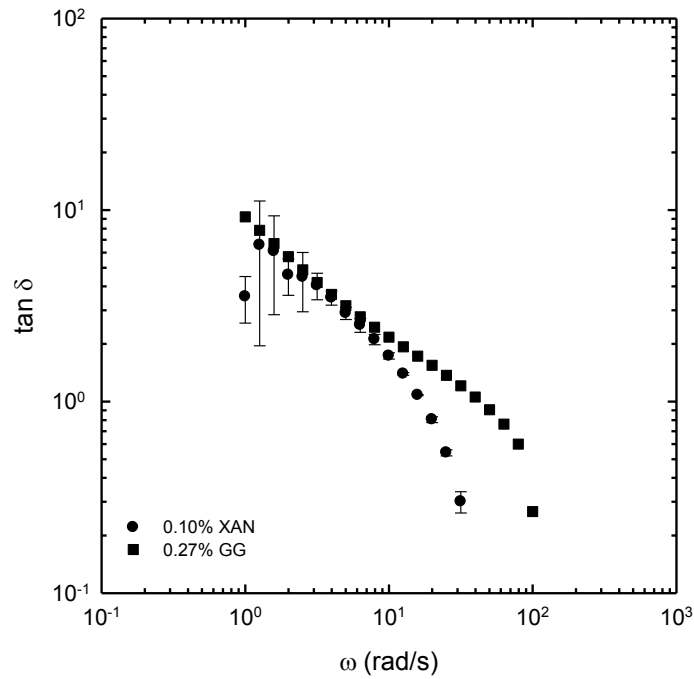


Figura 43. Tangente δ en función de la frecuencia de azúcar 20% m/m con xantana y guar.

IV. III BARRIDO DE DEFORMACIÓN DE LAS DISOLUCIONES PRECURSORAS DE WPI CON GUAR.

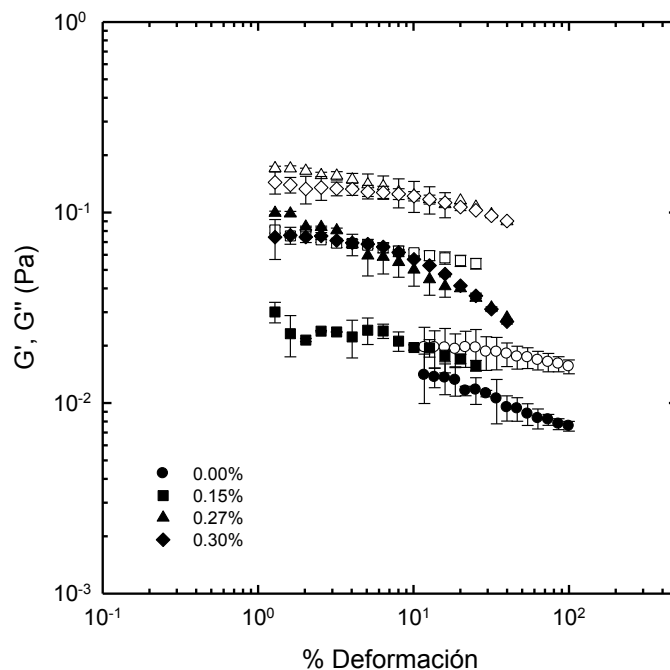


Figura 44. Variación de los módulos dinámicos con la deformación en las disoluciones precursoras con 10% m/m de WPI y guar a diferentes concentraciones; G' (símbolos negros), G'' (símbolos blancos).

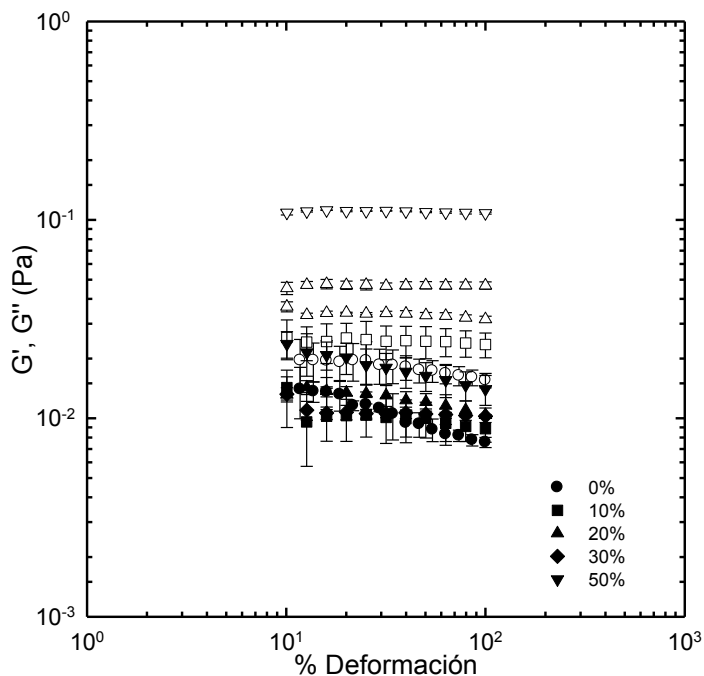


Figura 45. Variación de los módulos dinámicos con la deformación en las disoluciones precursoras con 10% m/m de WPI y azúcar a diferentes concentraciones; G' (símbolos negros), G'' (símbolos blancos).

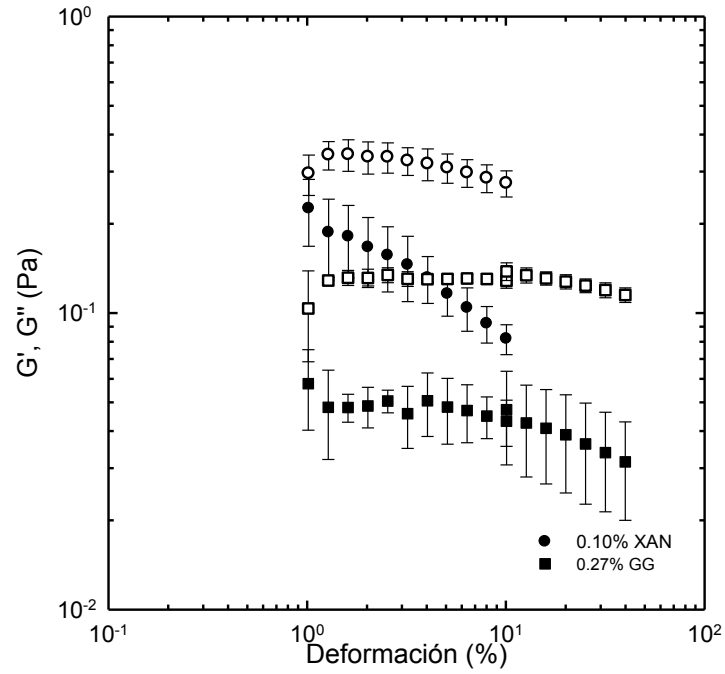


Figura 46. Variación de los módulos dinámicos con la deformación en las disoluciones precursoras con 10% m/m de WPI, 20% m/m de azúcar con xantana y guar; G' (símbolos negros), G'' (símbolos blancos).

IV. IV TANGENTE δ OBTENIDA DEL BARRIDO DE FRECUENCIA DE LAS DISOLUCIONES PRECURSORAS DE WPI CON XANTANA, GUAR, AZÚCAR, AZ-XAN Y Az-GG.

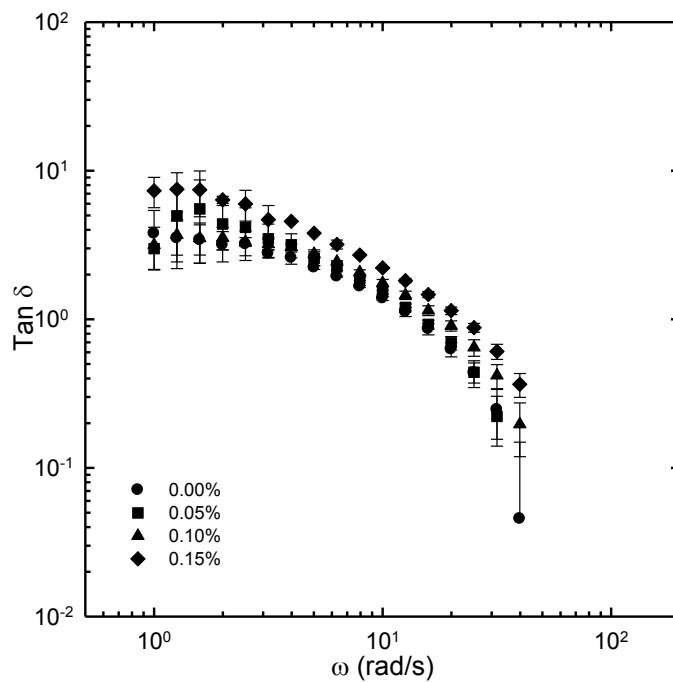


Figura 47. Tangente δ en función de la frecuencia de WPI 10% m/m, con xantana a diferentes concentraciones (% m/m)

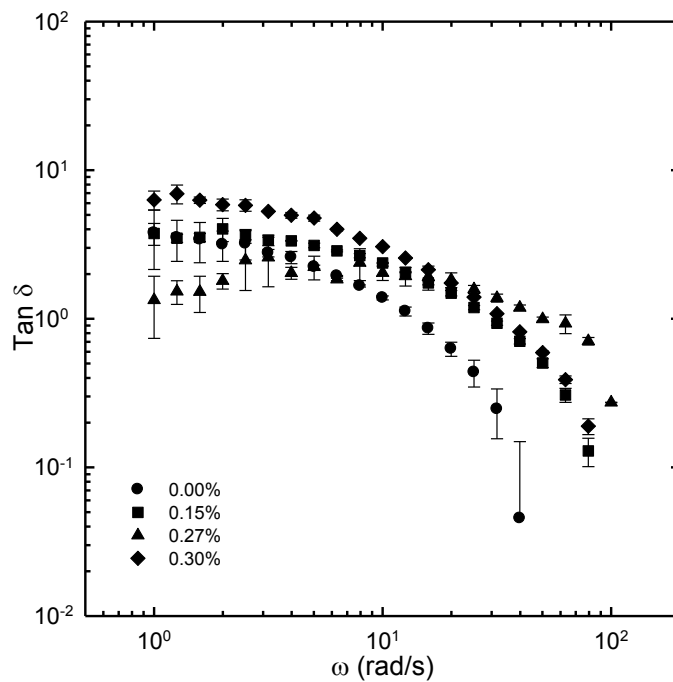


Figura 48. Tangente δ en función de la frecuencia de WPI 10% m/m, con guar a diferentes concentraciones (% m/m).

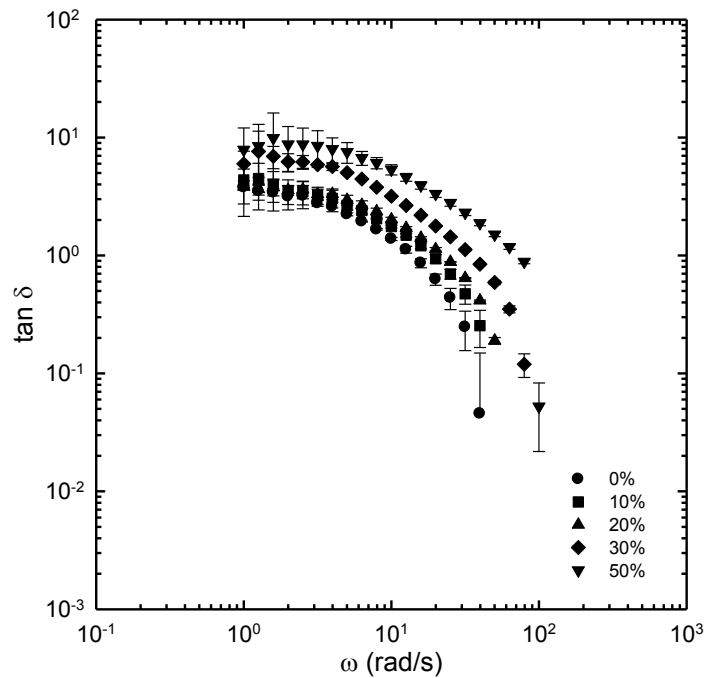


Figura 49. Tangente δ en función de la frecuencia de WPI 10% m/m, con azúcar a diferentes concentraciones (% m/m)

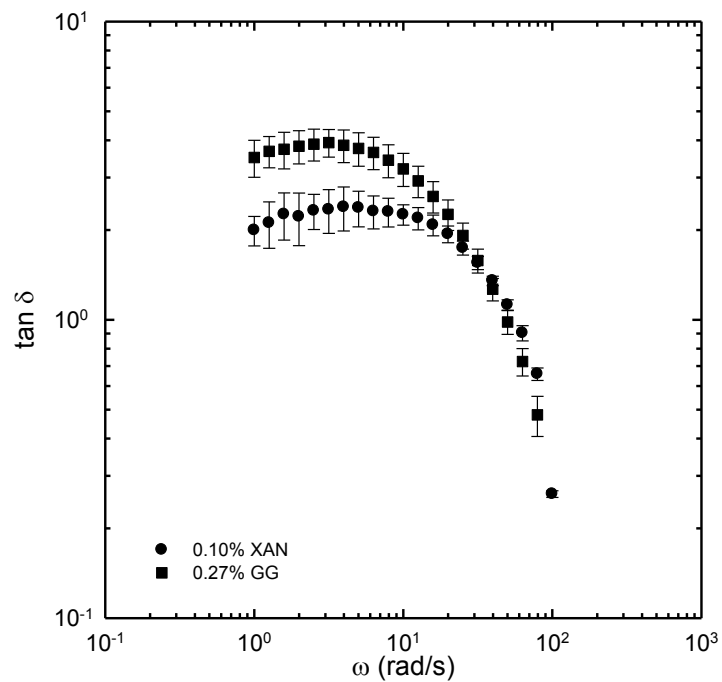


Figura 50. Tangente δ en función de la frecuencia de WPI 10% m/m y azúcar 20% m/m con xantana y guar (% m/m).

IV. V BARRIDO DE DEFORMACIÓN DE LAS ESPUMAS DE WPI CON GUAR, AZÚCAR, Az-X^A

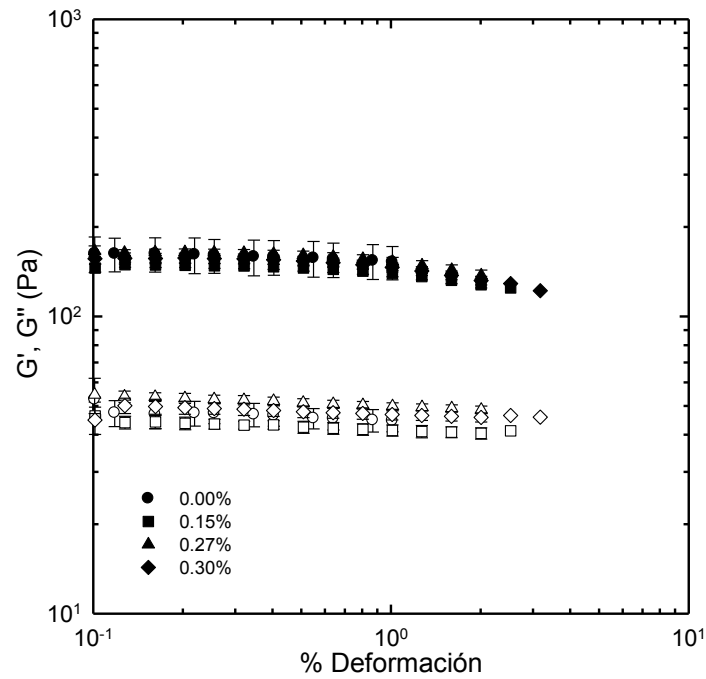


Figura 51. Variación de los módulos dinámicos con la deformación en las espumas con 10% m/m de WPI y guar a diferentes concentraciones; G' (símbolos negros), G'' (símbolos blancos).

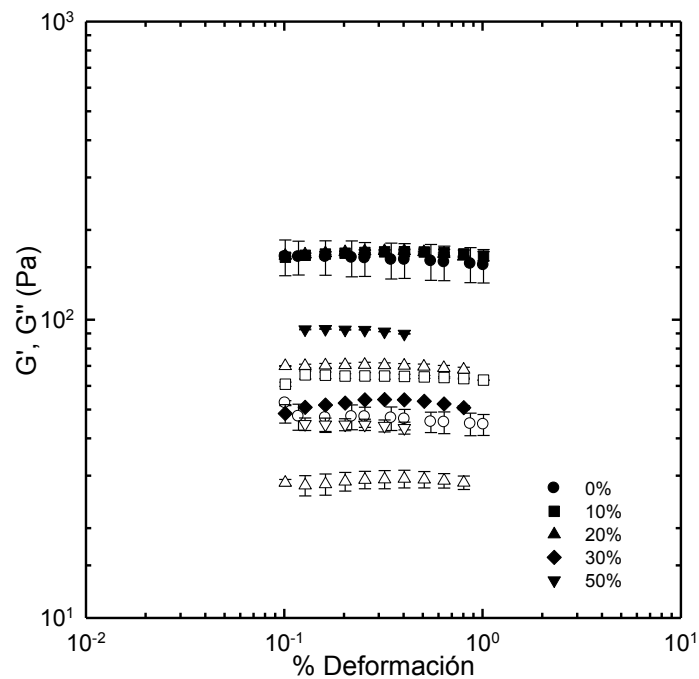


Figura 52. Variación de los módulos dinámicos con la deformación en las espumas con 10% m/m de WPI y guar a diferentes concentraciones; G' (símbolos negros), G'' (símbolos blancos).

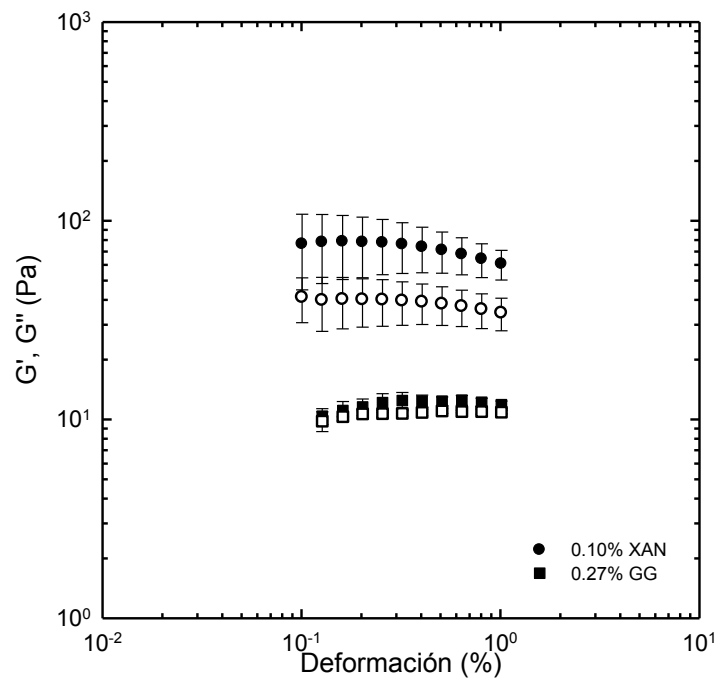


Figura 53. Variación de los módulos dinámicos con la deformación en las espumas con 10% m/m de WPI, 20% m/m de azúcar con xantana y guar; G' (símbolos negros), G'' (símbolos blancos).

IV. VI TANGENTE δ OBTENIDA DEL BARRIDO DE FRECUENCIA DE LAS ESPUMAS DE W α -GG.

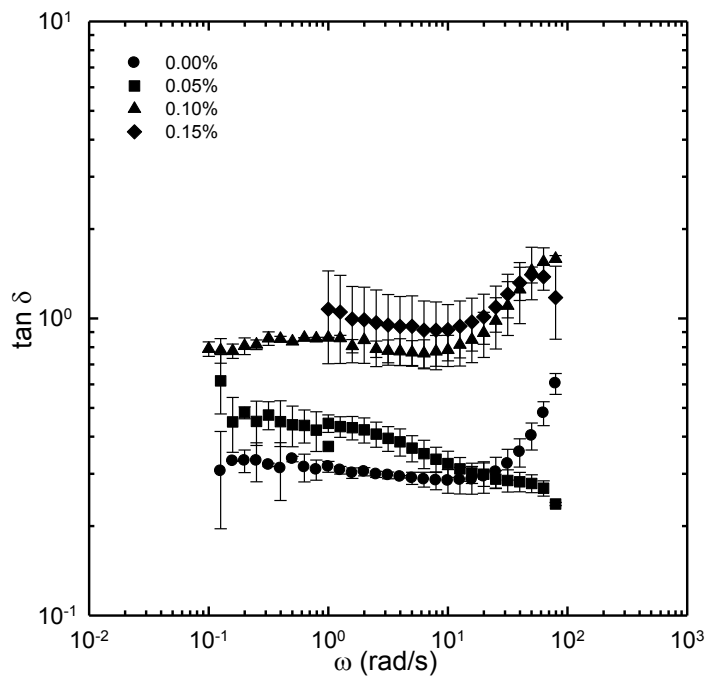


Figura 54. Tangente δ en función de la frecuencia las espumas de WPI 10% m/m, con xantana a diferentes concentraciones (% m/m)

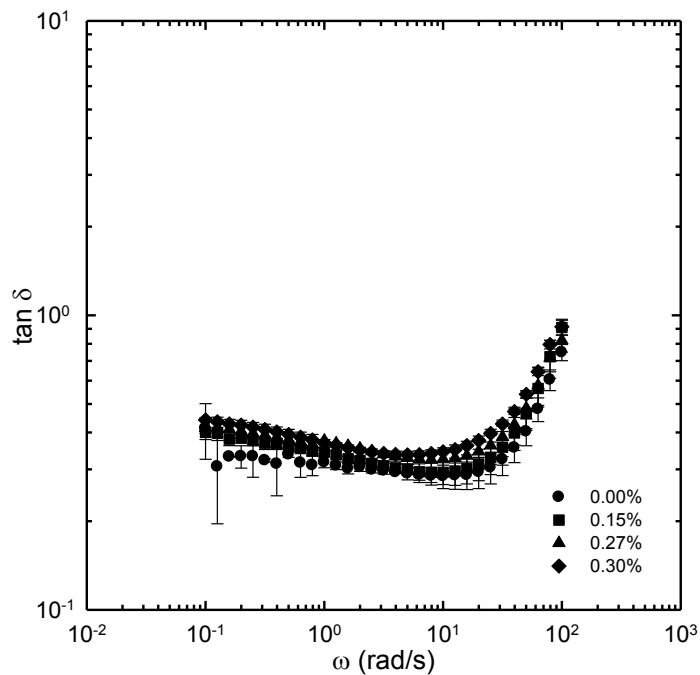


Figura 55. Tangente δ en función de la frecuencia las espumas de WPI 10% m/m, con guar a diferentes concentraciones (% m/m).

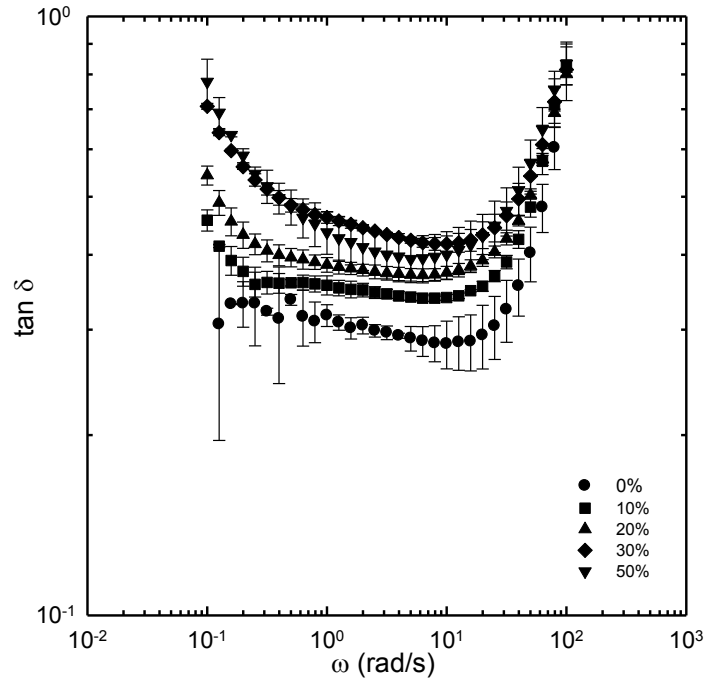


Figura 56. Tangente δ en función de la frecuencia las espumas de WPI 10% m/m, con azúcar a

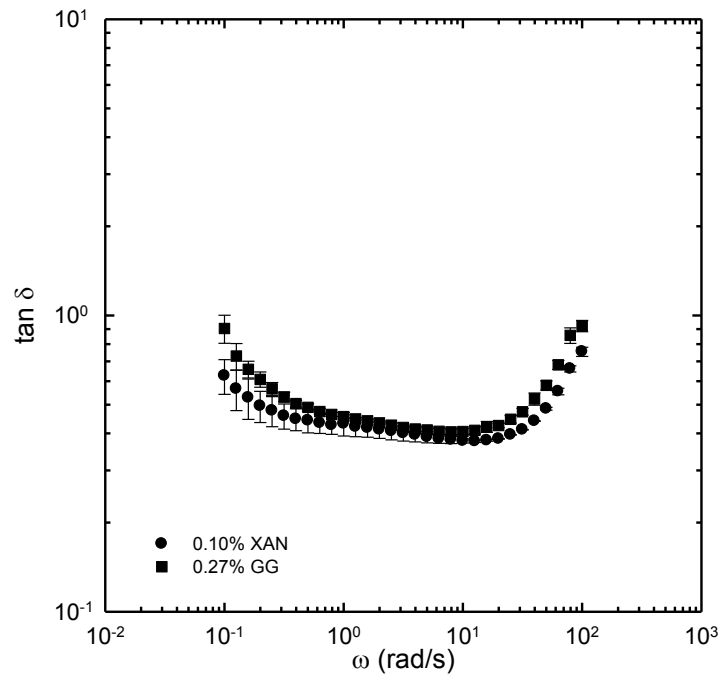


Figura 57. Tangente δ en función de la frecuencia las espumas de WPI 10% m/m, azúcar 20% m/m con xantana y guar (% m/m).