



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

PROPIEDADES REOLÓGICAS EN DISOLUCIÓN
ACUOSA DEL MUCÍLAGO EXTRAÍDO DE LA SEMILLA
DE CHÍA (*Salvia hispanica* L.)

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICA DE ALIMENTOS

PRESENTA

ALMA GUADALUPE DUARTE ANZALDO



MÉXICO, D.F.

2011



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: Profesor: Lucia Cornejo Barrera

VOCAL: Profesor: Alberto Tecante Coronel

SECRETARIO: Profesor: María de los Ángeles Martínez Olmedo

1er. SUPLENTE: Profesor: Karla Mercedes Díaz Gutiérrez

2° SUPLENTE: Profesor: Armando Conca Torres

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO 313, DEPARTAMENTO DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA,
CONJUNTO E, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

DR. ALBERTO TECANTE CORONEL

SUPERVISOR TÉCNICO:

I.A. MARIANA RAMÍREZ GILLY

SUSTENTANTE:

ALMA GUADALUPE DUARTE ANZALDO

**“Los ideales son como las estrellas; no triunfarás al tocarlas con tus manos.....
pero las escoges como tus guías y, al seguirlas, alcanzas tu destino”**

Carl Schurz

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM, mi Universidad, por haber sido una segunda casa para mí durante todos estos años y haber brindado las herramientas necesarias para formar a la persona que hoy he llegado a ser.

A Dios, por permitirme alcanzar esta meta, por darme la fuerza necesaria para no rendirme y seguir trabajando en mis objetivos.

Agradezco también a la Q. Margarita Portillo, a la Q. Araceli Tovar por su apoyo en los análisis realizados en la USAI para la realización de este proyecto.

A mi asesor de Tesis, Dr. Alberto Tecante Coronel, por su apoyo y su infinita paciencia, por brindarme la oportunidad de trabajar en uno de sus proyectos, por sus anécdotas y las enseñanzas que me compartió durante el tiempo que estuve en el laboratorio; por todo su tiempo invertido y la dedicación que mostró para que se concluyera este proceso.

A la I.A. Mariana Ramírez Gilly, por el apoyo técnico en la realización de las pruebas reológicas para esta tesis. Que con su apoyo y ayuda hizo más fácil este camino; por brindarme además de su asesoría y conocimientos su amistad y largas pláticas llenas de consejos y experiencias.

A toda mi familia, que siempre estuvo ahí presente para apoyarme, sus acciones, sus palabras y los ánimos que siempre me dieron fueron de vital importancia para culminar este proyecto.

A todos mis compañeros del laboratorio 313; Karina, Emmanuel, Beatriz, Ixchel Olga, Claudia, Ale y Carmen, por todos los momentos que pasamos juntos, por hacer tan amena la estadía, por los convivios, las horas de comida y plática; en especial a Ale, Carmen y Emmanuel por los consejos que me dieron y el apoyo para que no desesperara y siguiera trabajando hasta conseguir el resultado esperado.

A los sinodales, Lucy Cornejo y María de los Ángeles Martínez Olmedo, por el tiempo invertido en la revisión de mi tesis y por sus consejos para mejorarla.

DEDICATORIAS

A mis papás, que fueron el apoyo más grande que tuve, sin el cual no habría podido alcanzar esta meta que tanto deseaba. A ti mamá, porque siempre estuviste ahí en cada momento importante, no solo durante la Licenciatura; me acompañaste en toda mi vida escolar; por tu confianza, por creer en mí y siempre hacerme segunda en todas mis decisiones. A ti papá, por tu paciencia, por dejarme elegir mi camino y por compartir tus experiencias de vida y consejos que me guiaron y me impulsaron a luchar por esto.

A mis hermanas y amigas. A ti Kary, por siempre ser mi hermana mayor y cuidarme, por tus consejos y experiencias que me ayudaron en muchas ocasiones a enfrentar realidades escondidas, por creer en mí y alentarme a hacer cosas que a veces dudaba. A ti Jen, por ser mi cómplice, por animarme cuando me sentía derrotada, por decirme que siempre estaba un paso más cerca y apoyarme en todas mis decisiones. A las dos las quiero mucho!!!

A mis sobrinos, Saúl, Samuel, y Mariana porque estuvieron todo este tiempo al pendiente e interesados de cómo iba mi proyecto, que muy al modo de cada uno de ustedes me apoyaron; espero que vean que si se puede, que no importa cuánto se tarde o se atrase una meta, si no dejamos de verla siempre podemos realizarla. A Jacobo, que aunque acaba de llegar a nuestra familia, nos alegra todos los días con su sonrisa.

A Lety Barrios, por tu amistad incondicional, por el apoyo que me has dado durante todos los años que llevamos de conocernos porque más que una amiga has formado parte de mi familia, por todas las experiencias que hemos vivido y las que nos faltan.

A mis grandes amigas de toda la vida, Dora, Cris, Ana y Rosy, que desde pequeñas compartimos sueños y deseos, por todas sus palabras de aliento, por acompañarme en este camino, por alegrarse conmigo y consolarme en mis tristezas.

A todos mis amigos de la Facultad, Claux, porque desde el inicio de la carrera fuiste mi compañera y amiga. Blankis, por los últimos semestres tan divertidos que me hiciste pasar. Alex, Susa, Tatiana, Betty, Gustavo, Isaac, Moni, Pugs, Bere, José, Gaby, porque cada uno de ustedes aportó algo especial, por los recuerdos, por todas las experiencias, por las clases compartidas, las desveladas, las risas y enojos.

A todos los que han formado de una u otra forma parte de esto y me han apoyado a seguir adelante.

GRACIAS!!!

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE CUADROS	IV
RESUMEN	1
CAPÍTULO I GENERALIDADES.....	3
1.1 Características generales	3
1.2 Chía. Culto a los dioses y desaparición.....	5
1.3 Valor nutricional.....	5
1.4 Características generales del mucílago	7
1.5 Usos potenciales	8
1.6 Principios reológicos	8
1.6.1 Viscosidad y tipos de comportamiento de flujo	8
1.6.2 Viscoelasticidad lineal.....	9
1.6.3 Viscosidad intrínseca.....	11
HIPÓTESIS	13
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
CAPÍTULO II DESARROLLO EXPERIMENTAL	14
2.1 MATERIALES	14
2.2 MÉTODOS.....	14
2.3 DISOLUCIONES DE MUCÍLAGO	15
2.4 PRUEBAS REOLÓGICAS	16
2.4.1 Pruebas estacionarias.....	17
2.4.2 Pruebas dinámicas.....	17

2.5 VISCOSIDAD INTRÍNSECA	17
2.6 FUERZA IÓNICA	18
2.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	18
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
3.1 VISCOSIDAD INTRÍNSECA	19
3.2 PRUEBAS ESTACIONARIAS	21
3.3 EFECTO DE LOS IONES EXTERNOS.....	22
3.3.1 Propiedades de flujo. Viscosidad.....	22
3.3.2 Propiedades viscoelásticas. Módulos dinámicos	28
3.4. FUERZA IÓNICA	35
CONCLUSIONES	40
REFERENCIAS.....	42
ANEXO A	45

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Planta y semilla de chía	4
Figura 2. Tipos de comportamiento de flujo	9
Figura 3. Espectro infrarrojo del mucílago crudo de la semilla de chía.	15
Figura 4. Determinación de la viscosidad intrínseca con la ecuación de Huggins. ...	19
Figura 5. Determinación de la viscosidad intrínseca con la ecuación de Kraemer....	20
Figura 6. Viscosidad de disoluciones acuosas de mucílago de chía sin iones externos.....	21
Figura 7. Variación de la viscosidad normalizada sin iones externos (círculos rojos) y con diferentes concentraciones de iones externos de sodio y potasio.....	24
Figura 8. Variación de la viscosidad normalizada sin iones externos y con diferentes concentraciones de iones externos de calcio y magnesio.....	25
Figura 9. Disminución de la viscosidad normalizada con el aumento de la concentración de iones monovalentes de sodio y potasio.	27
Figura 10. Disminución de la viscosidad normalizada con el aumento de la concentración de iones divalentes de calcio y magnesio	27
Figura 11. Variación de G' y G'' con la deformación para iones externos de sodio y potasio.....	29
Figura 12. Variación de G' y G'' con la deformación para iones externos de calcio y magnesio.....	30
Figura 13. Variación de G' y G'' con la frecuencia angular sodio y potasio	32
Figura 14. Variación de G' y G'' con la frecuencia angular calcio y magnesio.....	34
Figura 15. Variación de la viscosidad normalizada con el inverso de la raíz cuadrada de la fuerza iónica de iones monovalentes sodio y potasio.....	36
Figura 16. Variación de la viscosidad normalizada con el inverso de la raíz cuadrada de la fuerza iónica de iones divalentes calcio y magnesio	38
Figura 17. Comparación del inverso de la raíz cuadrada de la fuerza iónica sobre la viscosidad normalizada de iones monovalentes sodio y potasio.....	39
Figura 18. Comparación del inverso de la raíz cuadrada de la fuerza iónica sobre la viscosidad normalizada de iones divalentes calcio y magnesio	39

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Clasificación botánica de <i>Salvia hispanica</i>	4
Cuadro 2. Composición química de <i>Salvia hispanica</i>	6
Cuadro 3. Espectro infrarrojo del mucílago crudo de la semilla de chia.....	14
Cuadro 4. Viscosidades para determinar $[\eta]$	19

RESUMEN

Se estudiaron las propiedades viscosas y viscoelásticas en disolución acuosa del mucílago crudo extraído de la semilla de chía (*Salvia hispanica* L.) por medio de pruebas reológicas de cizalla estacionaria circular y cizalla oscilatoria de baja amplitud, con el propósito de determinar si el mucílago crudo posee propiedades espesantes, gelficantes y polielectrolíticas cuya manifestación esté asociada con su concentración y con la presencia de iones mono y divalentes externos. Se examinaron concentraciones de mucílago entre 0.01 a 1%. Las pruebas de cizalla oscilatoria de baja amplitud mostraron un comportamiento con predominante carácter elástico para concentraciones cercanas a 1.0% con el límite de la zona de viscoelasticidad lineal aproximadamente a 1% de deformación. Concentraciones entre 0.2 a 0.1% mostraron un predominio del carácter viscoso, extendiendo el límite de la zona de viscoelasticidad lineal hasta 50% de deformación.

A bajas concentraciones de mucílago de 0.01 a 0.03% existió un comportamiento newtoniano. Estos comportamientos muestran que el mucílago posee propiedades que podrían hacerlo útil como espesante y estabilizador en sistemas alimenticios dependiendo de la concentración usada.

Bajo ninguna de las condiciones examinadas, el mucílago formó geles. La adición de 0, 5, 10, 20, 50, 80 y 100 mM de iones monovalentes y de 0, 2, 5, 8 y 10 mM de iones divalentes modificó las propiedades viscosas y viscoelásticas. La viscosidad de las disoluciones de mucílago disminuyó al aumentar la concentración de iones externos, lo que significa que posee propiedades polielectrolíticas.

Las propiedades viscoelásticas de las disoluciones de mucílago son sensibles a la presencia de iones externos, así como a su naturaleza, lo que confirma su carácter polielectrolítico. Los diferentes comportamientos reológicos debidos a los cambios en la concentración de mucílago y de iones externos muestran la capacidad espesante de este material, la cual depende de las condiciones del medio ambiente acuoso y confirma la presencia de cargas negativas en la estructura del mucílago dada probablemente por azúcares urónicos.

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1 Características generales

La chía (*Salvia hispanica* L.) es una planta anual de verano que se extiende desde el oeste central de México hasta el norte de Guatemala, sus formas silvestres se dispersan a través de las sierra Madre Occidental de Sonora y de Chihuahua. El término chía se refiere a un pequeño grupo de plantas anuales pertenecientes a la familia *Lamiaceae*, nativas del suroeste de California, Texas, México y América. Como características generales, la especie *hispanica* forma plantas anuales, con altura de un metro, con periodo de florecimiento en julio y agosto, que crecen en suelos arcillosos o arenosos e incluso en zonas áridas, no toleran heladas, ni crecen en la sombra (Beltrán-Orozco y Romero, 2007).

La *Salvia hispanica* cuenta con varios nombres comunes como: salvia española, artemisa española, chía mexicana, chía negra o simplemente chía. La variedad nativa de la República Mexicana es la *chionocalyx Fernald*. Esta variedad crece en bosques de juníperos, encino, pino, pino-encino y otras a una altitud aproximada de 1900 m. Su cultivo en México está distribuido en los estados de Jalisco, en los municipios de Cuautitlán, Ahualulco de Mercado y Tolimán; por otro lado en Michoacán, en los municipios de Tzintzuntzán, Uruapan, Zacapu, Erongarícuaro, Huaniqueo, Morelia, Pátzcuaro, La Piedad (SEMARNAT, 2002).

La semilla de chía es pequeña, de apenas unos milímetros de longitud y tiene una forma oval ligeramente aplanada, puede ser oscura y moteada aunque ocasionalmente puede ser blanca o albina (Fig. 1). Es resistente a las plagas, pero ocasionalmente puede ser atacada por plagas del suelo como la gallina ciega, aunque no es recomendable utilizar ningún agroquímico para combatirla, pues no serían semillas adecuadas para el consumo humano.



Figura 1. Planta y semilla de chía (*Salvia hispanica* L.).

El Cuadro 1 muestra la clasificación botánica de la chía *Salvia hispanica* L. (Hentry et al. 1990).

Cuadro 1. Clasificación botánica de *Salvia hispanica*.

Reino	Plantae
Subreino	Tracheobionta – Planta vascular
Superdivisión	Spermatophyta – Planta de semillas
División	Magnoliophyta – Planta con flores
Clase	Magnoliospsida - Dicolitedónea
Subclase	Asteridae
Orden	Labiales
Familia	Lamiaceae (Familia de la menta)
Género	<i>Salvia</i>
Especie	<i>Hispánica</i>

La chía es una especie nativa de México, ampliamente cultivada e introducida en otros países de América. El aprovechamiento de esta especie es generalmente a nivel doméstico por lo que su comercialización se realiza principalmente en mercados locales (Beltrán-Orozco y Romero, 2007).

1.2 Chía. Culto a los dioses y desaparición

La chía también formaba parte de los cultos religioso de las culturas prehispánicas; los aztecas recibían semilla de chía como tributo anual de los pueblos conquistados y la ofrecían a los dioses como parte de las ofrendas en las ceremonias religiosas (Ayerza & Coates, 2005). La ciudad de Tenochtitlán recibía cada año como tributo de los pueblos conquistados, un mínimo de 6360 toneladas de maíz, 4410 toneladas de frijoles, 4410 toneladas de chía y 3780 toneladas de amaranto (Crispín-Carrillo 2006).

La desaparición de este cultivo se debió a la colonización, ya que aunque el amaranto, el frijol, la chía y el maíz comprendían los componentes principales de las dietas de las civilizaciones aztecas y mayas, cuando Cristóbal Colón llegó al Nuevo Mundo, el cultivo de la chía decreció ya que fue una manera de reprimir a los nativos, conjuntamente como se suprimían sus tradiciones se destruyó la mayoría de su producción agrícola intensiva y el sistema de comercialización existente.

1.3 Valor nutricional

Como alimento la chía se conoce desde hace muchos años; es un cultivo que en épocas prehispánicas formaba parte de la alimentación de la población. Por siglos la semilla de chía fue utilizada por los indios del oeste y del sur de México. Los aztecas la consumían debido a su aporte energético (Coates y Ayerza, 1996). Otros sin conocer todas las propiedades que esta semilla posee, la utilizaban para resistir largas jornadas de trabajo, como los indios del oeste de Norteamérica que solamente comían el equivalente de una cucharada para resistir un viaje de 14 horas. Hay evidencia científica que muestra que la semilla de chía comenzó a usarse en la alimentación humana unos 3,500 años A.C. y se convirtió en un cultivo básico en el centro de México entre 1,500 y 900 años A.C. Esta semilla se usó como alimento mezclada con otros cultivos, en bebidas, molida en harina, incluida en medicinas y prensada para obtener su aceite, utilizado luego como base para pinturas para el rostro y el cuerpo (Ayerza & Coates, 2005).

El uso de la semilla de chía en la industria de alimentos se debe en gran parte a su composición química y su valor nutrimental (Cuadro 2). Como se observa en estos datos, en la semilla de chía destaca su alto contenido de aceite, que varía entre 32-39%. Este aceite y el de lino, son fuentes naturales con grandes cantidades de ácido α -linolénico (Ayerza & Coates, 2005; Taga et al. 1984). El contenido de proteína, entre 19-23%, es comparable con el de otros granos como el trigo (14%), maíz (14%), arroz (8.5%) y amaranto (14.8%). Sin embargo, a diferencia de otros granos los aminoácidos de la proteína de chía satisface los requerimientos de la dieta de personas adultas, pero su perfil de aminoácidos indispensable muestra deficiencias con respecto a las recomendaciones de 1985 de la FAO / OMS / ONU en niños en edad preescolar. Por lo que no es recomendable su uso como única fuente de proteína, sin ser suplementada con una fuente rica en lisina, ya que es el aminoácido limitante. (Olivos-Lugo et al. 2010).

Cuadro 2. Composición química de *Salvia hispanica* (Bushway et al. 1981).

Componente	Contenido (g/100 g semilla)
Humedad	4.31 \pm 0.16
Grasa	29.8 \pm 0.87
Fibra cruda	18.0 \pm 0.64
Cenizas	4.61 \pm 0.03
Proteína	23.6
Carbohidratos	18.7
Fósforo	0.69 \pm 0.01
Calcio	0.54 \pm 0.01

La proteína presente en la chía se caracteriza por ser de fácil absorción y digestión (Beltrán-Orozco y Romero, 2007). Esta eficiente asimilación favorece el desarrollo de los tejidos especialmente durante el periodo de crecimiento en los niños y en los adolescentes, así como durante el crecimiento y la regeneración durante el embarazo y la lactancia. La semilla de chía es una buena fuente de vitamina del complejo B. También lo es de calcio, boro, fósforo, potasio, zinc y cobre. Los hidratos

de carbono y la fibra cruda corresponden al tercer componente mayoritario en esta semilla (Bushway et al. 1981).

Una vez que el aceite se ha extraído de la semilla de chía, el material remanente contiene 50-60% de fibra. La semilla posee 5% de fibra soluble que aparece como mucílago al colocarla en agua y es útil como fibra dietética (Bushway et al. 1981). La chía tiene una capacidad de captación de agua excepcional, ya que puede absorber 12 veces su peso en agua. Cuando está en medio acuoso, la semilla queda envuelta en un mucílago copioso, el cual es excelente para la digestión y que, junto con el propio grano es un alimento nutritivo (Hentry et al. 1990).

1.4 Características generales del mucílago

El mucílago es un coloide hidrófilo, que se extrae con agua y es insoluble en alcohol. Contiene un polisacárido de alto peso molecular (0.8 a $2 \cdot 10^6$ g/mol) que cubre a la semilla y se hincha cuando se la remoja en agua. El mucílago forma un halo gelatinoso que rodea la semilla entera. El esqueleto principal del mucílago está formado por una secuencia lineal de $(1 \rightarrow 4)\text{-}\beta\text{-D-xilanopiranosil-(1} \rightarrow 4)\text{-}\alpha\text{-D-glucopiranosil-(1} \rightarrow 4)\text{-}\beta\text{-D-xilopiranosil}$ con ramificaciones formadas por residuos de $4\text{-O-metil-}\alpha\text{-D-glucopiranosil}$ unidos al esqueleto principal en la posición O-2 de alguno de los residuos de $\beta\text{-D-xilanopiranosil}$ (Lin et al. 1994). Este tetrasacárido forma la unidad repetitiva básica del mucílago. Su hidrólisis total produce $\beta\text{-D-xilosa}$, $\alpha\text{-D-glucosa}$ y ácido $4\text{-O-metil-}\alpha\text{-D-glucurónico}$ en una proporción molar de 2:1:1, respectivamente. Por hidrólisis parcial se produce $2\text{-O-(4-O-metil-}\alpha\text{-D-ácido glucopiranosidurónico)-D-xilosa}$ el cual es un ácido aldobiourónico. El 5% de fibra soluble o mucílago que posee la semilla, tiene propiedades como espesante. Se plantea que la ingesta de mucílago ya sea solo o en combinación con la semilla, interactúa sobre el metabolismo de lípidos, disminuyendo la absorción intestinal de ácidos grasos, colesterol y el arrastre de sales biliares, incrementa la pérdida de colesterol a través de las heces; además la fibra soluble, forma medios viscosos que producen distensión gástrica, vaciado gástrico al ralentí y sensación de saciedad, por lo que se considera al mucílago un alimento nutritivo (Reyes Caudillo, 2006). El mucílago se obtiene al hidratar las semillas bajo agitación suave y constante y una

vez hinchado se separa de la semilla. Para optimizar la extracción puede establecerse una relación agua:semilla, tomando en cuenta que la chía absorbe agua aproximadamente 12 veces su peso.

1.5 Usos potenciales

En la industria de alimentos como:

Emulsionante: Las disoluciones acuosas de mucílago de chía permiten estabilizar emulsiones como mayonesas, helados y saborizantes líquidos.

Floculante: Al mezclar de 0.1 a 0.5 g de mucílago pulverizado con 50-200 mL de leche, el mucílago propicia la floculación de la leche y esta acción, puede aprovecharse en el proceso de elaboración de quesos, requesones justificando su potencial uso como floculante en la industria de alimentos, así como en la biotecnología.

En la industria cosmética como:

Emulsionante: Las disoluciones acuosas de mucílago de chía permiten estabilizar cremas, shampoos (Marin Flores et al. 2008).

1.6 Principios reológicos

1.6.1 Viscosidad y tipos de comportamiento de flujo

La viscosidad de un fluido (η), es la relación entre el esfuerzo de cizalla y la rapidez de deformación de cizalla. Es una medida de la capacidad de los fluidos para resistirse al movimiento cuando se les aplica un esfuerzo de cizalla simple. También es una propiedad física que caracteriza el flujo de los fluidos de composición simple. En muchos líquidos, η es constante para una temperatura y presión dadas y no depende del esfuerzo o la rapidez de deformación de cizalla que existan en él. Para muchos líquidos η es una función de la rapidez de deformación de cizalla ($\dot{\gamma}$). La viscosidad puede verse afectada significativamente por el tiempo durante el cual el material es sometido a un esfuerzo o una rapidez de deformación de cizalla constantes. También es función de la temperatura, la presión y en el caso de disoluciones de la concentración de soluto (Cornejo Romero, 1999).

Existen dos tipos principales de comportamiento de flujo (Fig. 3); newtoniano en el cual la relación entre el esfuerzo de cizalla y la rapidez de deformación de cizalla es lineal y por lo tanto la viscosidad es constante a una temperatura y presión dadas, y no newtoniano en el cual la relación entre el esfuerzo de cizalla y la rapidez de deformación de cizalla no es lineal y por lo tanto la viscosidad no es constante.

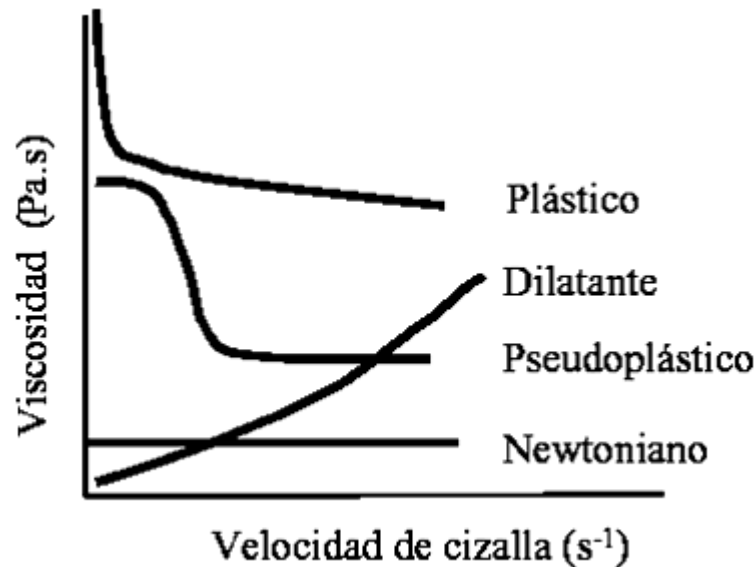


Figura 2. Tipos de comportamiento de flujo (Crispín Carrillo, 2006)

1.6.2 Viscoelasticidad lineal

Un método para estudiar el comportamiento viscoelástico de los alimentos incluye el uso de pruebas dinámicas. Estas pruebas tienen múltiples aplicaciones tales como la evaluación de la dureza de geles, examen de la gelatinización de almidones, observación de la coagulación o desnaturalización de proteínas, desarrollo de textura en productos cárnicos y de panadería y pruebas de vida media, entre otras. Las pruebas dinámicas que se realizan frecuentemente consisten en someter al material de estudio a un esfuerzo o una deformación oscilatoria sinusoidal a una frecuencia angular ω (rad/s) y una amplitud de onda determinada que son transmitidas a través del material. La magnitud y el tiempo de movimiento de la transmisión depende de la naturaleza de la sustancia estudiada, generalmente se emplea una geometría de placas paralelas, cono-placa o cilindros concéntricos. En estas pruebas oscilatorias se usan ondas de baja amplitud, debido a que se emplean pequeñas deformaciones con el fin de mantener un comportamiento

viscoelástico lineal, es decir, una relación lineal entre el esfuerzo y la rapidez de deformación de cizalla. Además se busca que la deformación sea suficientemente pequeña como para que la estructura de los materiales no sea modificada significativamente y proporcionan información para tiempos de observación relativamente cortos (0.1-100 s).

En este tipo de estudios se controlan variables como la frecuencia angular (ω), la amplitud máxima de la deformación (γ_0) y las respuestas que se obtienen son el esfuerzo de cizalla sinusoidal (σ), el cual junto con la deformación o la rapidez de deformación proporcionan diferentes módulos que caracterizan las propiedades viscosas y elásticas del material. Este tipo de perturbación también puede realizarse aplicando un esfuerzo sinusoidal y midiendo la deformación resultante. Entre las funciones materiales resultantes están el módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G''). La relación entre ellos y el esfuerzo de cizalla producido por la deformación sinusoidal está dada por la ecuación (1):

$$\sigma = G' \gamma + (G'' / \omega) \dot{\gamma} \quad (1)$$

Ambos módulos son función de la frecuencia y pueden ser expresados en términos del cociente entre la amplitud en fase y fuera de fase:

$$G' = [\sigma_0 / \gamma_0] \cos(\delta) \quad (2)$$

$$G'' = [\sigma_0 / \gamma_0] \sin(\delta) \quad (3)$$

Para un sólido perfectamente elástico, toda la energía es almacenada, G'' es cero y el esfuerzo y la deformación están en fase. En contraste, para un líquido puramente viscoso, es decir sin propiedades elásticas, toda la energía es disipada en forma de calor, G' es cero y el esfuerzo y la deformación se encuentran fuera de fase exactamente 90° . Otra función importante empleada para describir el comportamiento viscoelástico es la tangente del ángulo de desfase (δ), la cual es también una función de la frecuencia angular:

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

Esta cantidad adimensional es una medida de la relación entre la energía disipada y la energía almacenada en un ciclo de deformación, es decir, del predominio del carácter elástico sobre el carácter viscoso del material (Crispín-Carrillo, 2006).

1.6.3 Viscosidad intrínseca

La viscosidad intrínseca, $[\eta]$, es el aporte de una sola macromolécula en disolución a la viscosidad de la misma. Su valor depende del peso molecular de la molécula, así como de su estructura y conformación que adopta en el espacio. También depende de la calidad del disolvente, es decir, si es un buen disolvente o no, de la temperatura y con frecuencia de la rapidez de deformación de cizalla o de la frecuencia angular en el caso de movimientos oscilatorios. Las dimensiones de $[\eta]$ son de volumen por unidad de masa y por ello esta cantidad es también referida como “volumen específico efectivo hidrodinámico” de la macromolécula en disolución. Para la determinación del valor experimental de la viscosidad intrínseca, es necesario trabajar con disoluciones diluidas ya que “una” macromolécula altera la viscosidad del disolvente. Considerando que la viscosidad del disolvente es η_s y la viscosidad de la disolución es η , la viscosidad relativa es el cociente:

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_s} \quad (5)$$

y la viscosidad específica es:

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1 \quad (6)$$

Si la viscosidad específica se divide por la concentración y se extrapola a concentración nula, se obtiene la viscosidad intrínseca.

$$\left[\frac{\eta_{sp}}{c} \right]_{c=0} = [\eta] \quad (7)$$

La viscosidad intrínseca se expresa comúnmente en dL/g y con menos frecuencia en cm^3/g . Una forma común para determinarla experimentalmente es a partir de una disolución madre cuya concentración de soluto es 1%. De esta disolución se hacen diluciones y la viscosidad de estas se determina usando un instrumento adecuado. Uno de los más usados es el viscosímetro capilar (Sperling, 1992).

HIPÓTESIS

Bajo condiciones isotérmicas, las disoluciones de mucílago crudo de semilla de chíá en presencia o ausencia de iones mono o divalentes externos mostrarán comportamientos de flujo diferentes y propiedades viscoelásticas que dependerán, además de la presencia de cationes externos, de la concentración de mucílago. Tal comportamiento podrá estar asociado con sus propiedades electrolíticas.

OBJETIVO GENERAL

Determinar el comportamiento de flujo estacionario y viscoelástico lineal en disolución acuosa del mucílago crudo de semilla de chíá por medio de pruebas de cizalla circular y cizalla oscilatoria de baja amplitud, respectivamente, usando diferentes concentraciones de mucílago y de cationes externos mono y divalentes, para establecer con claridad la capacidad espesante, de formación de geles y polielectrolítica del mucílago crudo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar el comportamiento reológico en disolución acuosa del mucílago de semilla de chíá en presencia de cationes externos mono y divalentes para determinar la influencia de la concentración de mucílago y de cationes sobre las propiedades viscosas y viscoelásticas de este material y poder establecer aplicaciones en sistemas alimenticios.

Determinar por medio de la variación de la viscosidad intrínseca con la fuerza iónica si el mucílago de semilla de chíá en disolución acuosa muestra propiedades polielectrolíticas y caracterizarlas.

CAPÍTULO II DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 MATERIALES

Se usó mucílago en polvo ya separado de la semilla en estudios previos. Se usaron NaCl (J.T. Baker, México), KCl (Mallinckrodt Reactivo Analítico, México), CaCl₂ (Merck, México), MgCl₂·6H₂O cristal (J.T. Baker, México), acetona recuperada por destilación y agua desionizada.

2.2 MÉTODOS

Para conocer las características del mucílago se determinó su contenido de humedad y proteína usando métodos oficiales de la AOAC (Horwitz, 2000), así como pruebas de calorimetría, espectroscopía infrarroja y absorción atómica. Estas pruebas se llevaron a cabo en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) de la Facultad de Química.

La humedad del mucílago fue 8.30% y su contenido de proteína (N₂ x 6.25) fue 9.80%. La espectroscopia infrarroja (Fig. 3) mostró la presencia de grupos carboxilo, consistente con la estructura primaria mencionada en el capítulo anterior. Los principales picos detectados en el espectro de Infrarrojo corresponden a los grupos funcionales mostrados en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Espectro infrarrojo del mucílago crudo de la semilla de chíá.

Grupo funcional	Pico (cm ⁻¹)	Intervalo de absorción (cm ⁻¹)
O-H	3391.7	3400-2850
C=O	1625.1	1900-1500

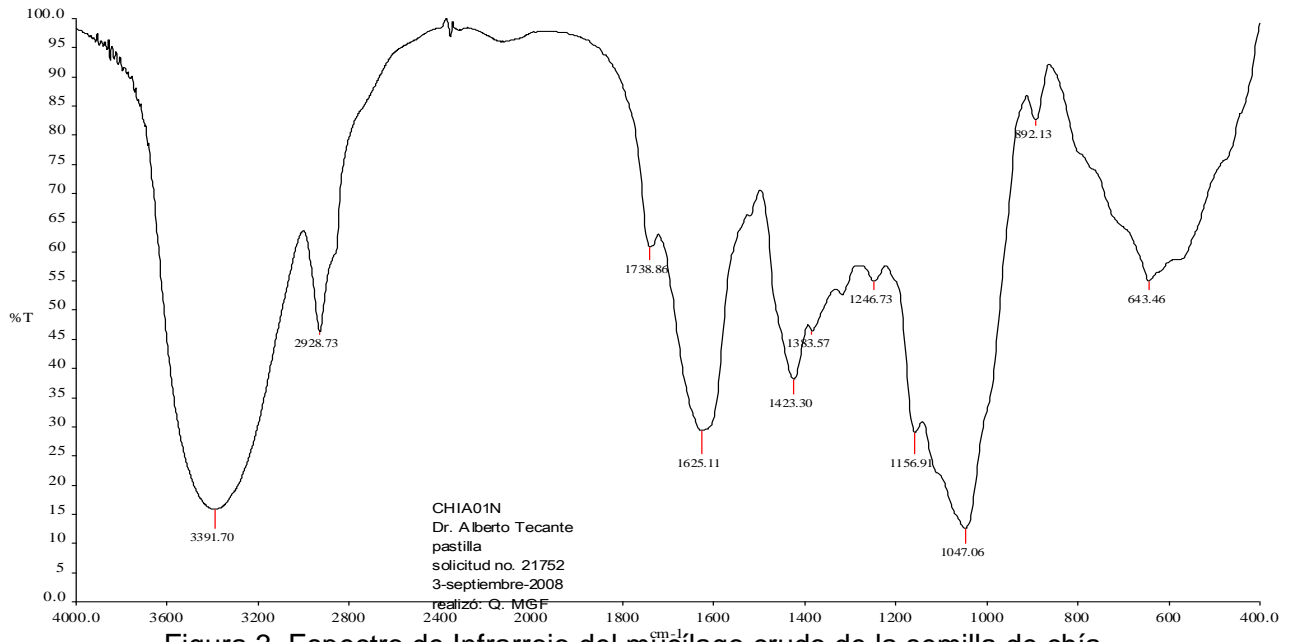


Figura 3. Espectro de Infrarrojo del mucílago crudo de la semilla de chía.

El comportamiento térmico del mucílago por calorimetría de barrido diferencial no mostró presencia de transiciones térmicas en el intervalo de temperaturas de 10 a 90 °C. El contenido de sodio, potasio, calcio y magnesio del mucílago en polvo fue determinado por absorción atómica. El análisis fue realizado usando el procedimiento técnico PT-USAI-FQ-AA-001, en un equipo Varian Spectr AA 220. El contenido de iones expresado en mg/kg de polvo fue: $K^+ = 11994$, $Na^+ = 37975$, $Ca^{2+} = 11687$ y $Mg^{2+} = 41666$, el cual corresponde a 1.20, 3.80, 1.17 y 4.20%, respectivamente. Estos valores muestran que el mucílago contiene una mayor cantidad de magnesio, seguida por sodio y cantidades similares de potasio y calcio.

2.3 DISOLUCIONES DE MUCÍLAGO

Las disoluciones para las pruebas de reometría se prepararon a partir de una disolución madre con 0.5% masa de mucílago en polvo. El mucílago ya separado de la semilla contiene material insoluble muy difícil de separar por medios mecánicos porque se trata esencialmente de restos de cáscara de semilla de pequeño tamaño. Por ello fue necesario determinar la concentración real de material soluble partiendo de la disolución madre. Para preparar dicha disolución el polvo se dispersó

lentamente en agua desionizada con agitación magnética a temperatura ambiente y una vez disperso se calentó a 70° C durante 15 minutos. Se enfrió a temperatura ambiente y se centrifugó a 2500 rpm durante 20 minutos para separar el material insoluble. La concentración real de mucílago se determinó mediante el procedimiento siguiente: en cajas Petri se colocó un trozo de papel filtro pesado previamente y las cajas se introdujeron en una estufa (Squaroid Vacuum Oven, Modelo 3608, USA) a 110° C hasta alcanzar peso constante. Posteriormente se pesaron 5 g de la disolución madre (OHAUS GA 200 ± 0.0001g, USA) y se precipitó el mucílago con acetona en una relación volumen de 2:1 (acetona:agua). El precipitado se separó filtrando al vacío en un papel filtro previamente llevado a peso constante. Se dejó secar durante 48 h en un desecador y transcurrido ese tiempo, se pesó y se calculó el peso de mucílago precipitado por diferencia entre la cantidad de disolución madre y la masa de mucílago precipitado. El resultado se expresó en porcentaje masa (m/m).

Una vez conocida la concentración real de la disolución madre, se hicieron las diluciones necesarias para tener 20 mL de cada concentración que se examinó en el reómetro; las concentraciones fueron 0.05%, 0.08% y 0.1% (m/m). Para la preparación de las disoluciones con iones externos, se disolvió previamente la respectiva sal en el agua desionizada y se siguió el mismo procedimiento descrito anteriormente. Para conocer el efecto de estos iones sobre la viscosidad y la viscoelasticidad de las disoluciones se agregaron iones monovalentes y divalentes, en concentraciones de 0, 10, 20, 50, 80 y 100 mM para Na⁺ y K⁺ y concentraciones de 0, 2, 5, 8, 10 y 15 mM para Ca²⁺ y Mg²⁺.

2.4 PRUEBAS REOLÓGICAS

El estudio reológico de las disoluciones de mucílago se realizó en un reómetro (ARES-RFS III, TA Instruments, EUA), utilizando una geometría de cilindros concéntricos de doble pared cuyas dimensiones son: 27.94 mm de diámetro interior de la copa, 29.50 mm de diámetro interior del cilindro interno, 32.00 mm de diámetro exterior del cilindro externo, 34.00 mm de diámetro exterior de la copa y un espacio anular vertical de 1.00 mm. Se realizaron pruebas estacionarias y dinámicas a 25 °C.

2.4.1 Pruebas estacionarias

Se examinó el comportamiento de flujo para velocidades de deformación ($\dot{\gamma}$) de 1 a 100 s⁻¹ en disoluciones con las concentraciones de mucílago y iones externos ya señaladas.

2.4.2 Pruebas dinámicas

Para las pruebas dinámicas, primero se localizó la zona de viscoelasticidad lineal mediante un barrido de deformación, manteniendo una frecuencia angular (ω) constante de 6.28 rad/s y en un intervalo de deformación (γ) de 10% a 100%. Conociendo la zona de viscoelasticidad lineal, se realizaron los barridos de frecuencia sobre la zona lineal en el intervalo de frecuencia angular de (ω) 1 a 10 rad/s. Todas las pruebas se hicieron por duplicado y los datos se promediaron. Sólo se consideraron los valores superiores al torque mínimo detectable por el reómetro (3.9×10^{-7} N·m).

2.5 VISCOSIDAD INTRÍNSECA

La viscosidad intrínseca del mucílago se determinó por medio de pruebas de cizalla estacionaria circular. Para ello fue necesario encontrar las concentraciones de mucílago que produjeran disoluciones de comportamiento newtoniano. Dichas concentraciones fueron 0.010, 0.015, 0.020, 0.025 y 0.030%.

La viscosidad intrínseca se determinó mediante la ecuación de Huggins

$$\frac{\eta_{\text{esp}}}{C} = [\eta] + k'[\eta]^2C \quad (8)$$

y de Kraemer por separado

$$\frac{\ln \eta_{\text{rel}}}{C} = [\eta] - k''[\eta]^2C \quad (9)$$

2.6 FUERZA IÓNICA

La fuerza iónica se determinó a partir de las concentraciones de iones cuantificados por absorción atómica y con los iones externos cuando así se requirió. Se usó la siguiente fórmula:

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\# \text{ iones}} m_i \cdot z_i^2 \quad (10)$$

Las gráficas que se muestran en el capítulo siguiente corresponden a las concentraciones de 0.05, 0.08 y 0.1%, con las cinco concentraciones individuales de los iones Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . El efecto de la fuerza iónica sobre la viscosidad de las disoluciones se analizó mediante la relación de la viscosidad normalizada y el inverso de la raíz cuadrada de la fuerza iónica de acuerdo con la teoría (Smidsrod y Haug, 1971). La viscosidad normalizada es el cociente entre la viscosidad de la disolución con iones externos y la viscosidad sin iones externos.

2.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados se expresan como el promedio de diferentes repeticiones. Se hizo un análisis de varianza para determinar la diferencia significativa ($\alpha < 0.05$) entre valores diferentes. El análisis se hizo utilizando el programa Microsoft Excel de Office 2007, siguiendo la metodología señalada en Probabilidad y Estadística para Ciencias Químico-Biológicas (Márquez de Cantú, 1991); la cual se puede observar en el Anexo A.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 VISCOSIDAD INTRÍNSECA

Las viscosidades de las disoluciones para determinar $[\eta]$ se muestran en el Cuadro 4. La viscosidad del disolvente a 25 °C fue $9.5 \cdot 10^{-4}$ Pa·s (0.95 mPa·s).

Cuadro 4. Viscosidades para determinar $[\eta]$.

C (g/dL)	η (mPa·s)	η_{rel}	η_{esp}	η_{esp}/C	η_{rel}/C	$(\ln\eta_{rel})/C$
0.030	1.74	1.83	0.832	27.7	61.1	20.1
0.025	1.56	1.64	0.642	25.7	65.7	19.8
0.020	1.31	1.38	0.379	18.9	68.9	16.1
0.015	1.30	1.37	0.368	24.6	91.2	21.0
0.010	1.15	1.21	0.210	21.1	121	19.1

La Fig. 4 muestra la correlación de los datos mostrados en el Cuadro 4 con la ecuación de Huggins. Por lo tanto $[\eta] = 19.0$ dL/g y $k' = 0.79$ ($r = 0.9439$).

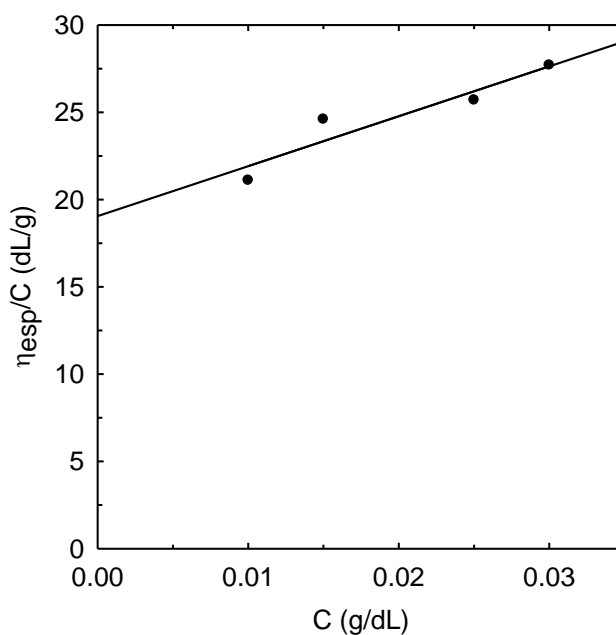


Figura 4. Determinación de la viscosidad intrínseca con la ecuación de Huggins.

La Fig. 5 muestra la correlación de los datos mostrados en el Cuadro 3 con la ecuación de Kraemer. Por lo tanto $[\eta] = 18.9 \text{ dL/g}$ y $k'' = 0.045$.

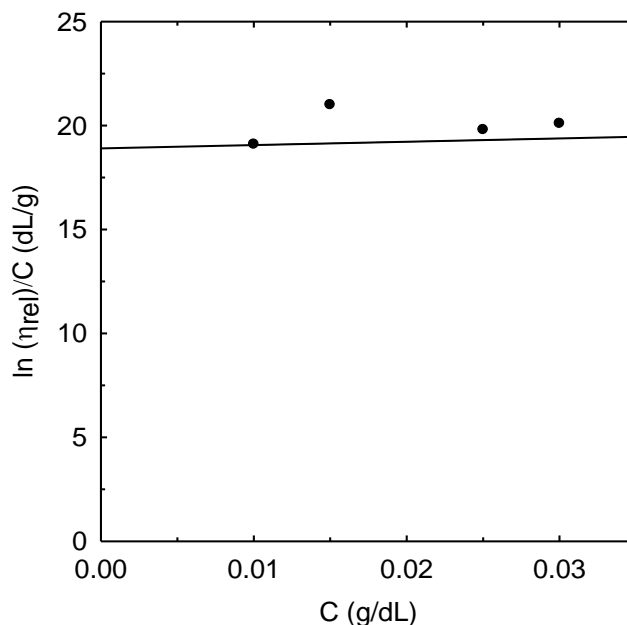


Figura 5. Determinación de la viscosidad intrínseca con la ecuación de Kraemer.

Las viscosidades intrínsecas calculadas con las ecuaciones de Huggins y Kraemer difieren entre sí por 0.52% la cual es una desviación más que aceptable considerando la extrapolación involucrada. A pesar de la ausencia de iones externos, la viscosidad intrínseca muestra que el mucílago ocupa un volumen hidrodinámico moderado. La suma de los coeficientes k' y k'' es 0.85 lo que es congruente con una molécula desplegada y además sugiere una distribución de pesos moleculares amplia. Esta suma debe ser en teoría cercana a 0.5 para macromoléculas con una distribución de pesos moleculares que tiende a ser monodispersa. Aunque no se examinó el efecto de los iones externos sobre la viscosidad intrínseca, se espera que esta disminuya con la concentración de contraiones debido a una reducción en el volumen hidrodinámico, siempre y cuando el mucílago posea propiedades polielectrolíticas. De hecho las posee como se mostrará más adelante.

3.2 PRUEBAS ESTACIONARIAS

Las curvas de viscosidad se realizaron para estudiar el efecto de los iones mono y divalentes proporcionados por las sales NaCl, KCl y CaCl₂, MgCl₂, respectivamente. En la preparación de las disoluciones para estas pruebas se utilizó agua desionizada para poder asegurar que el efecto que se observa se atribuya a los iones agregados en las distintas concentraciones utilizadas. Por ello, se determinó por absorción atómica la cantidad de iones presentes en el polvo de mucílago de chíá. Tomando en cuenta esto, los resultados presentados consideran el efecto total de los iones ya presentes y los agregados para obtener las concentraciones deseadas para el estudio. Para estas pruebas se usaron tres concentraciones de mucílago de chíá; 0.05, 0.08 y 0.1%. La viscosidad depende de la concentración de mucílago y de la rapidez de deformación de cizalla como se muestra en la Fig. 6.

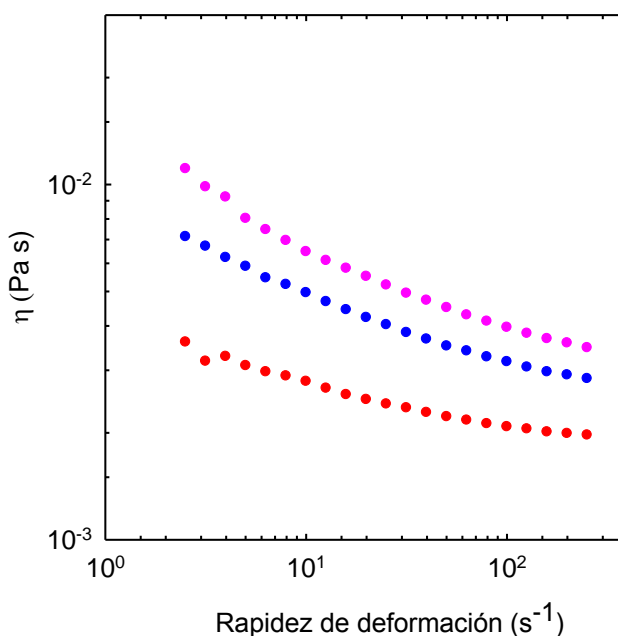


Figura 6. Viscosidad de disoluciones acuosas de mucílago de chíá sin iones externos a 25 °C; 0.05% (círculos rojos), 0.08% (círculos azules) y 0.1% (círculos rosas).

Una menor concentración de mucílago produjo disoluciones con más baja viscosidad debido a que al existir menor cantidad de mucílago hay menor interacción entre sus cadenas y mayor interacción con el disolvente. Esto provoca una disminución de la resistencia al flujo. El comportamiento de adelgazamiento por cizalla (shear-thinning)

es evidente, sin embargo, la disminución de la viscosidad con la rapidez de deformación de cizalla no pudo ser correlacionada por la ecuación empírica de la ley de potencia, la cual establece que $\eta = k\dot{\gamma}^{n-1}$ siendo k el coeficiente de consistencia y n el índice de flujo. Este último es igual a 1 para materiales de comportamiento newtoniano y menor de 1 para materiales adelgazados por cizalla como las disoluciones de mucílago de chíá. El comportamiento podría estar descrito por una ley de potencia, pero en dos secciones, ya que la dependencia mostrada en la Fig. 6 muestra una ligera concavidad, es decir, para valores de rapidez de deformación menores de 10 s^{-1} la pendiente es mayor, mientras que para valores de rapidez de deformación mayores de este valor, la pendiente es menor. Entonces, existe un punto de inflexión a 10 s^{-1} para las tres concentraciones de mucílago. Este comportamiento con un doble índice de flujo podría estar asociado con el peso molecular del mucílago y muy probablemente con la distribución de peso molecular. Al momento de producir este documento, se están implementando las técnicas para determinar estas dos cantidades.

3.3 EFECTO DE LOS IONES EXTERNOS

Para apreciar mejor el efecto de los iones externos, las viscosidades de las disoluciones con estos iones fueron normalizadas con respecto a las viscosidades de las disoluciones sin iones externos. Los resultados obtenidos mostraron una misma tendencia para las tres concentraciones de mucílago. Por ello aquí se presentan únicamente los resultados para una concentración de 0.1% de mucílago con sus respectivos iones. Este comportamiento puede considerarse como ejemplo de lo que ocurrió con la molécula para otras concentraciones.

3.3.1 Propiedades de flujo. Viscosidad

Para determinar si el mucílago de chíá posee propiedades polielectrolíticas, se examinó el cambio de la viscosidad de sus disoluciones en presencia de iones monovalentes (Na^+ y K^+) y divalentes (Ca^{2+} y Mg^{2+}) externos y se comparó con la viscosidad en ausencia de ellos. En todos los casos se observó el comportamiento de adelgazamiento por cizalla mostrado en la Fig. 6. Para comprender mejor el

efecto de los iones, los datos se presentan como el cociente η/η_0 , donde η es la viscosidad con iones externos y η_0 es la viscosidad sin iones externos. En este documento a este cociente se le denomina la viscosidad normalizada.

La Fig. 7 muestra el efecto de la adición de iones de sodio y potasio sobre la viscosidad normalizada. Para ambos iones esta viscosidad disminuyó con el aumento de la concentración de iones externos, siendo esta disminución ligeramente mayor para el ion sodio que para el ion potasio. La Fig. 8 muestra el efecto de la adición de iones de calcio y magnesio sobre la viscosidad. Para ambos iones la viscosidad disminuyó con el aumento de la concentración de iones externos, siendo esta disminución mayor para el ion magnesio que para el ion calcio. Las concentraciones estudiadas fueron de 2 a 15 mM, es decir, de cinco a seis veces menores que las concentraciones de los iones monovalentes. A pesar de ello, es evidente que la disminución de viscosidad provocada por los iones divalentes externos es similar en magnitud a la provocada por los monovalentes externos.

Analizando el efecto conjunto de los cuatro iones externos utilizados, la viscosidad es afectada con mayor intensidad por los iones divalentes, siendo el de mayor importancia el magnesio que el calcio para los divalentes y el sodio que el potasio para los monovalentes. Este comportamiento indica que el mucílago de semilla de chía en disolución acuosa es sensible a la presencia o ausencia de iones externos así como a la concentración y tipo de los mismos. La disminución de la viscosidad mostrada en las Figs. 7 y 8 es característica de macromoléculas que poseen una carga, en este caso negativa, a lo largo de su cadena. En rigor se trata de una densidad de carga de la macromolécula en disolución que se comporta como un polianión. En ausencia de iones externos, la cantidad de cationes ya presentes en el mucílago no es suficientemente grande para neutralizar la densidad de carga del polianión. Por lo tanto, sus cadenas están desplegadas debido a la repulsión que ocurre al tratar de plegarse. Al agregar cationes a la disolución, estos forman una pantalla al neutralizar la densidad de carga negativa y por lo tanto el polianión se pliega ante las fuerzas que provocan su flujo. El resultado es una menor resistencia o viscosidad.

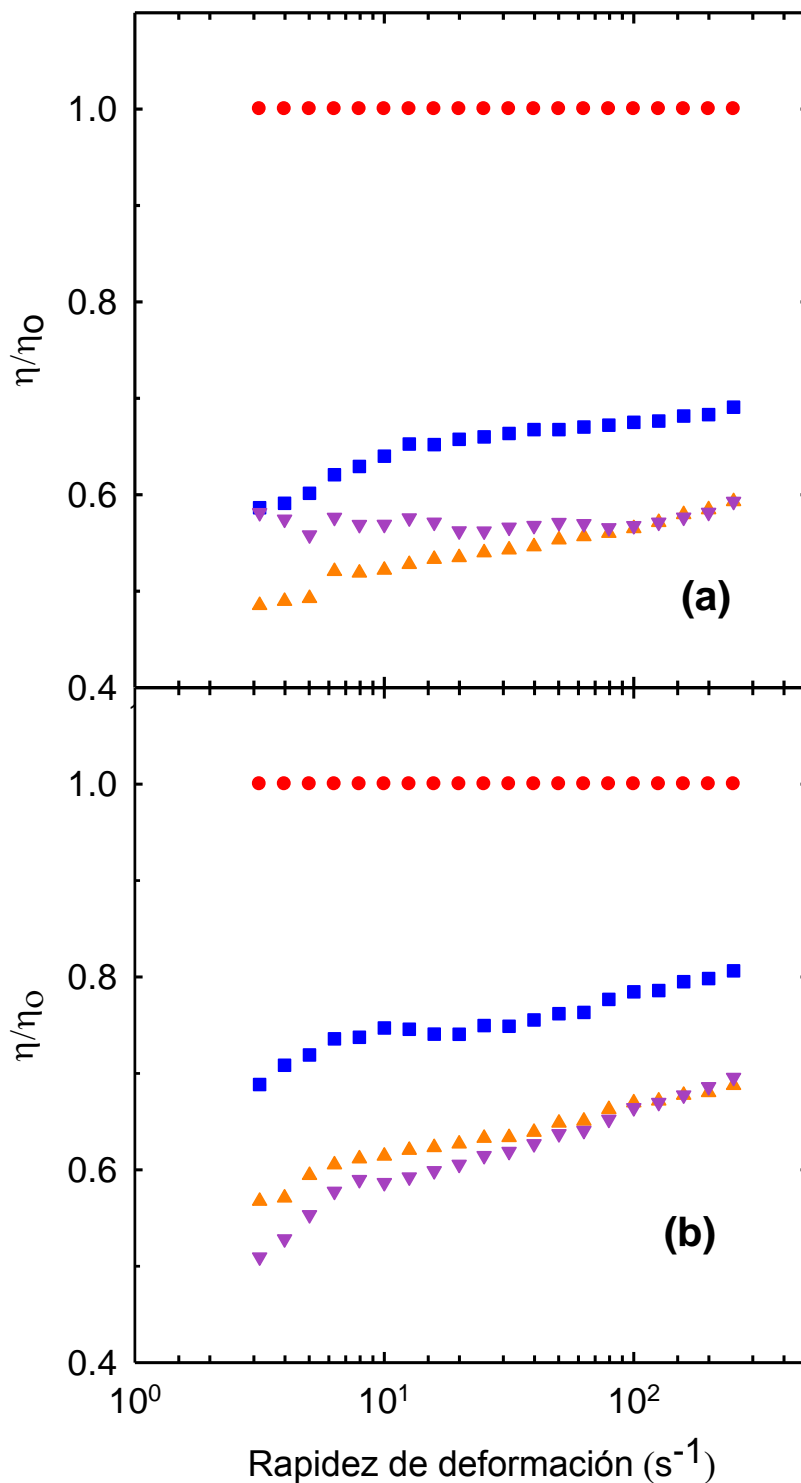


Figura 7. Variación de la viscosidad normalizada sin iones externos (círculos rojos) y con diferentes concentraciones de iones externos de sodio (a) y potasio (b); 10 (cuadros azules), 80 (triángulos naranjas) y 100 mM (triángulos invertidos morados).

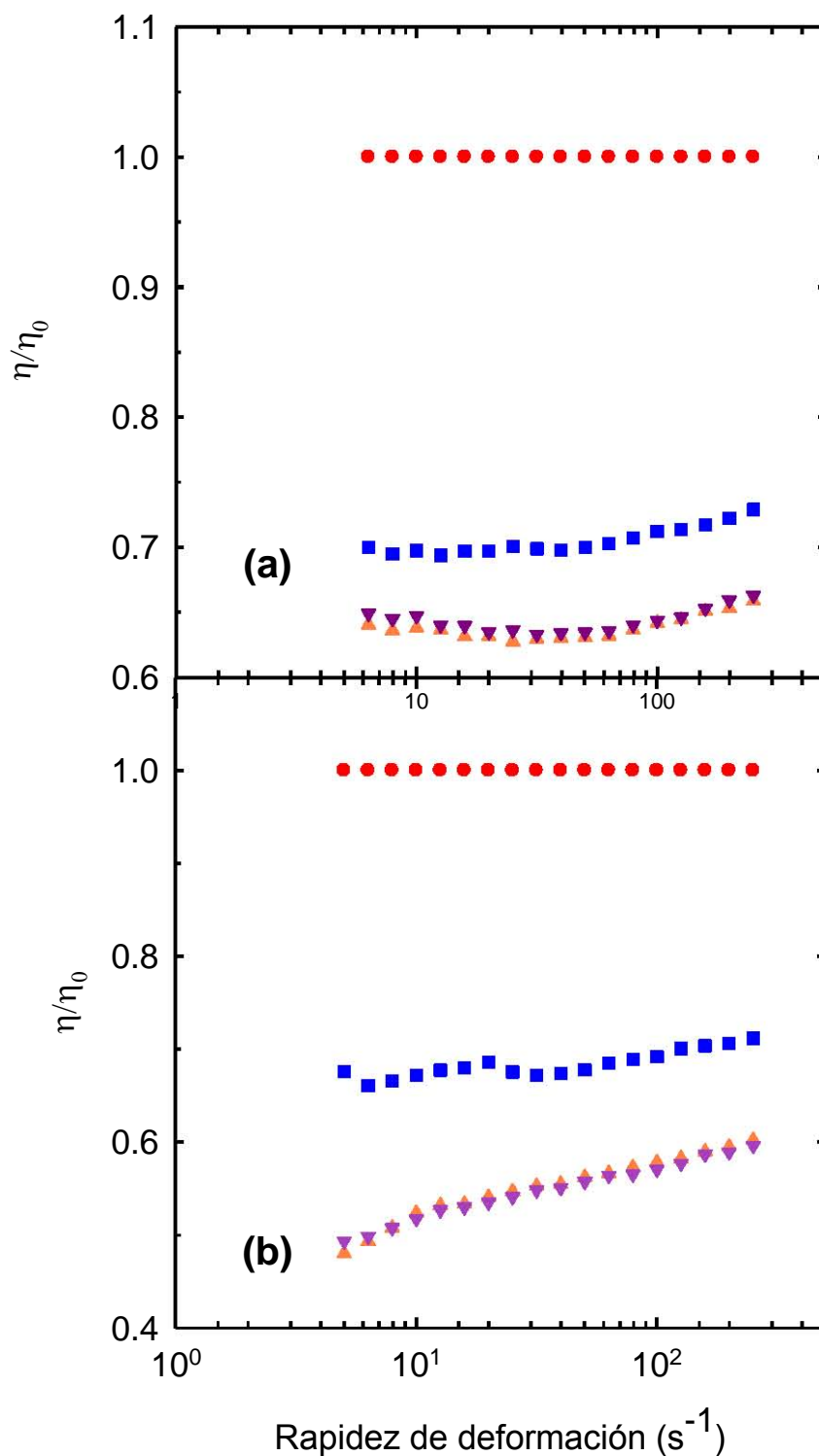


Figura 8. Variación de la viscosidad normalizada sin iones externos (círculos rojos) y con diferentes concentraciones de iones externos de calcio (a) y magnesio (b); 2 (cuadros azules), 10 (triángulos naranjas) y 15 mM (triángulos invertidos morados).

Este efecto electroviscoso está mediado por interacciones de tipo electrostático entre los cationes externos y el macroanión. Sin embargo, el apantallamiento no es infinito, es decir, alcanza un límite más allá del cual hay un exceso de cationes que además de no provocar una posterior disminución de viscosidad empiezan a solvatare y por lo tanto a competir con la macromolécula por el disolvente. En teoría una gran concentración de cationes externos provocará en algún momento una atracción entre cadenas poliméricas que favorecerá su interacción sobre aquella con el disolvente. El resultado de un estado tal, sería la precipitación de la macromolécula.

Con la finalidad de apreciar mejor la influencia de los cationes externos sobre la viscosidad de las disoluciones de mucílago, se presenta en las Figs. 9 y 10 la disminución de la viscosidad normalizada con la concentración de cationes externos para velocidades de deformación de 10 y 100 s⁻¹. El efecto de apantallamiento comentado previamente se observa claramente a través de la disminución de la viscosidad normalizada con el aumento de la concentración de cationes externos. Para altas concentraciones de estos cationes la viscosidad normalizada tiende a ser constante. Esto significa que ya no hay más efecto de apantallamiento. La forma en que los cationes monovalentes y los divalentes interactúan con las cadenas cargadas negativamente, es diferente. Se ha postulado que en el caso de los cationes monovalentes se establece una interacción de tipo cadena⁽⁻⁾-cation⁽⁺⁾-agua-cation⁽⁺⁾-cadena⁽⁻⁾, es decir el agua solvata al catión monovalente, mientras que en el caso de cationes divalentes la interacción sería cadena⁽⁻⁾-cation⁽²⁺⁾-cadena⁽⁻⁾, es decir, dos cadenas de macromolécula estarían unidas por el catión divalente sin agua de por medio. Esto explicaría por qué se necesitan menores concentraciones de cationes divalentes para provocar una reducción en la viscosidad similar a aquella provocada por los cationes monovalentes. Además, se observa claramente que el efecto del ion sodio fue mayor que el del ion potasio, a pesar de que la tendencia que siguen ambos iones es la misma, el ion sodio representado por los símbolos rojos se encuentra claramente por debajo de sus similares azules (potasio) para la misma rapidez de deformación de cizalla.

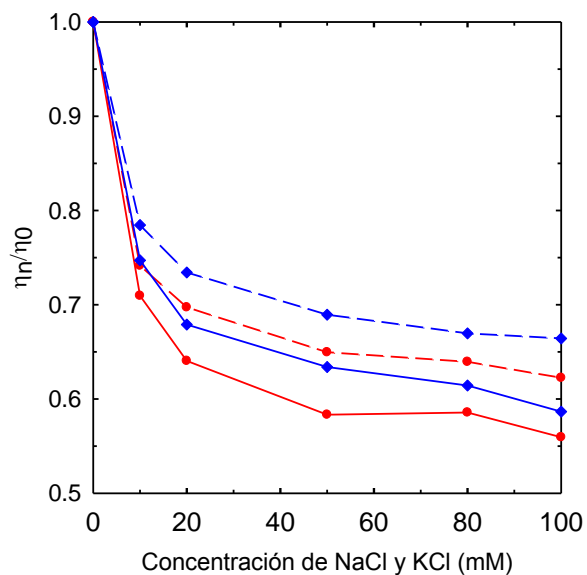


Figura 9. Disminución de la viscosidad normalizada con el aumento de la concentración de iones monovalentes de sodio (círculos rojos) y potasio (diamantes azules) a 10 (línea continua) y 100 s⁻¹ (línea discontinua).

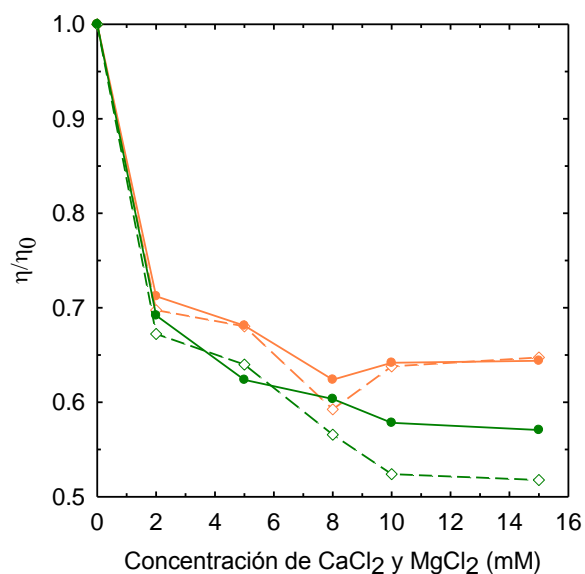


Figura 10. Disminución de la viscosidad normalizada con el aumento de la concentración de iones divalentes de calcio (símbolos naranjas) y magnesio (símbolos verdes) a 10 (línea continua) y 100 s⁻¹ (línea discontinua).

En la Fig. 10, se muestra el efecto de la presencia de los cationes externos divalentes. Para una misma velocidad de cizalla los iones magnesio provocaron una mayor disminución de la viscosidad que los iones de calcio para el cual la viscosidad se mantiene a la par para las dos velocidades de deformación de cizalla mostradas en la figura.

3.3.2 Propiedades viscoelásticas. Módulos dinámicos

La Fig. 11 muestra los barridos de deformación para una frecuencia angular de 6.28 rad/s con diferentes concentraciones de iones externos de sodio (a) y potasio (b). Al aumentar la concentración de ion externo, G' y G'' disminuyeron para la mayoría de las concentraciones de sales, en relación con las disoluciones sin ion externo. En las disoluciones sin ion externo, G' y G'' fueron mayores que en las disoluciones con ion externo. Esto se puede explicar por la presencia de ácido glucurónico en el mucílago. La presencia de grupos carboxilo permite la interacción con los cationes Na^+ y K^+ lo que conduce a un plegamiento de las cadenas debido a un efecto de pantalla provocado por la presencia de los iones externos. En la Fig. 11(b) el comportamiento del ion K^+ es más claro, por lo que se pueden apreciar mejor los cambios ya señalados. La diferencia entre estos dos iones a pesar de ser monovalentes, puede atribuirse a diferencias en su tamaño, su capacidad de solvatación y su electronegatividad. Asimismo, la zona de viscoelasticidad lineal de las disoluciones fue amplia; para ambos iones monovalentes, fue desde 20 hasta 60% de deformación aproximadamente, lo cual es característico de una disolución polimérica poco estructurada, es decir, de cadenas flexibles.

El efecto de los iones divalentes Ca^{2+} y Mg^{2+} , se muestra en las Figs. 12(a) y 12(b), respectivamente. Para ambos iones externos se observó el mismo patrón de comportamiento: a medida que aumentó su concentración, G' y G'' disminuyeron. Este comportamiento se debe a que un ion divalente, tiene mayor capacidad de interacción con las cadenas de mucílago. La zona de viscoelasticidad lineal fue más estrecha que la de los iones monovalentes; de 20 a 40% de deformación.

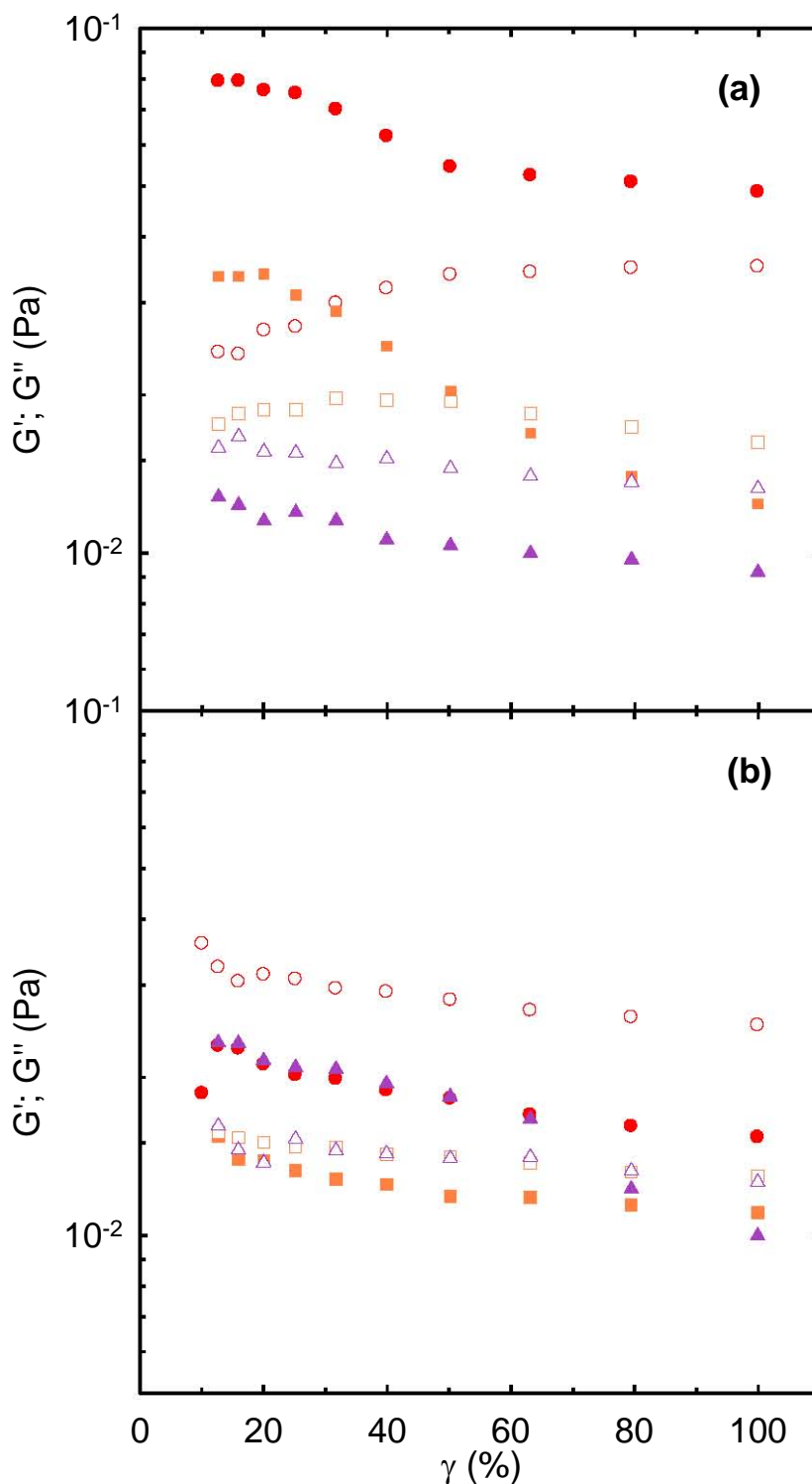


Figura 11. Variación de G' (símbolos llenos) y G'' (símbolos vacíos) con la deformación a 25 °C y 6.28 rad/s para iones externos de sodio (a) y potasio (b) en concentraciones de 0 (rojos), 80 (naranjas) y 100 mM (morados).

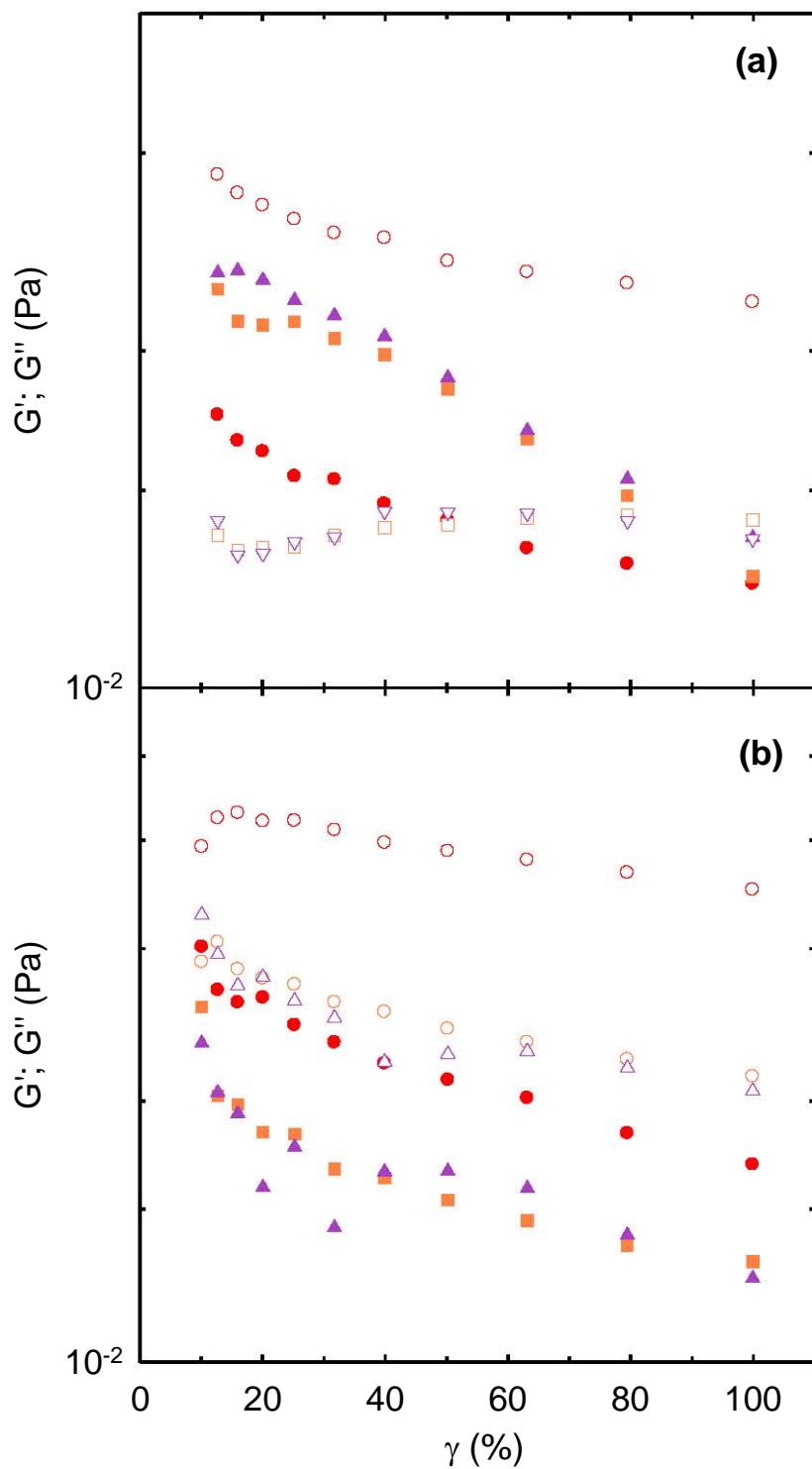


Figura 12. Variación de G' (símbolos llenos) y G'' (símbolos vacíos) con la deformación a 25 °C y 6.28 rad/s para iones externos de calcio (a) y magnesio (b) en concentraciones de 0 (rojos), 10 (naranjas) y 15 mM (morados).

Los barridos de frecuencia mostrados aquí corresponden a 25 °C y 0.1% de mucílago. El porcentaje de deformación al cual se hizo cada barrido de frecuencia dependió de las concentraciones de mucílago y de iones externos. En la Fig. 13(a) se muestra el efecto del ion Na^+ . Se observaron cambios en el comportamiento de ambos módulos dinámicos por efecto de la concentración de los iones externos. Para la mayoría de las concentraciones de estos, G' fue mayor, pero para 100 mM, G'' fue mayor que G' . Estos cambios pueden atribuirse principalmente a naturaleza propia del ion y a la influencia que puede tener, ya que la tendencia que sigue es la esperada. Sin embargo, 0 mM y 80 mM G' fue mayor que G'' . Para esta última concentración de iones externos, G' y G'' fueron muy cercanos, es decir, la tangente del ángulo de pérdida, $\tan \delta$, tendió a 1. Al llevar la concentración de ion sodio a 100 mM la posición de los módulos se invirtió, como ya se señaló G'' fue mayor que G' . Además, hubo una mayor dependencia con la frecuencia angular. Este cambio en el valor y posición relativos de los módulos indica algún tipo de alteración en la conformación de las cadenas de mucílago. El hecho de que G' para una disolución sin iones externos sea grande y superior a G'' y que al momento de agregar los iones los módulos sufran un intercambio tan importante y rápido, se debe sin duda a la interacción del mucílago con el ion sodio. Esto indica la presencia de una densidad de carga negativa en las cadenas de mucílago.

En la Fig. 13(b) para el ión K^+ , el comportamiento es similar; al aumentar la concentración de iones potasio los módulos disminuyen. Sin embargo, la disminución no es tan notable como para el caso del ion sodio. Además, en todos los casos G'' fue mayor que G' lo muestra que la interacción con el ion potasio es diferente que con el ion sodio. La explicación de este comportamiento puede encontrarse en el contenido de iones ya presentes en el mucílago determinado por absorción atómica. De los iones monovalentes, el ion sodio está en mayor cantidad (3.8%) que el ion potasio (1.2%). Esto representa más del doble y al agregar la misma concentración de ambos cationes a las disoluciones de mucílago esta proporción se mantiene constante. Sin embargo, la concentración aumenta y en el caso del ion sodio los resultados sugieren que es debido a ese aumento que los cambios son más intensos.

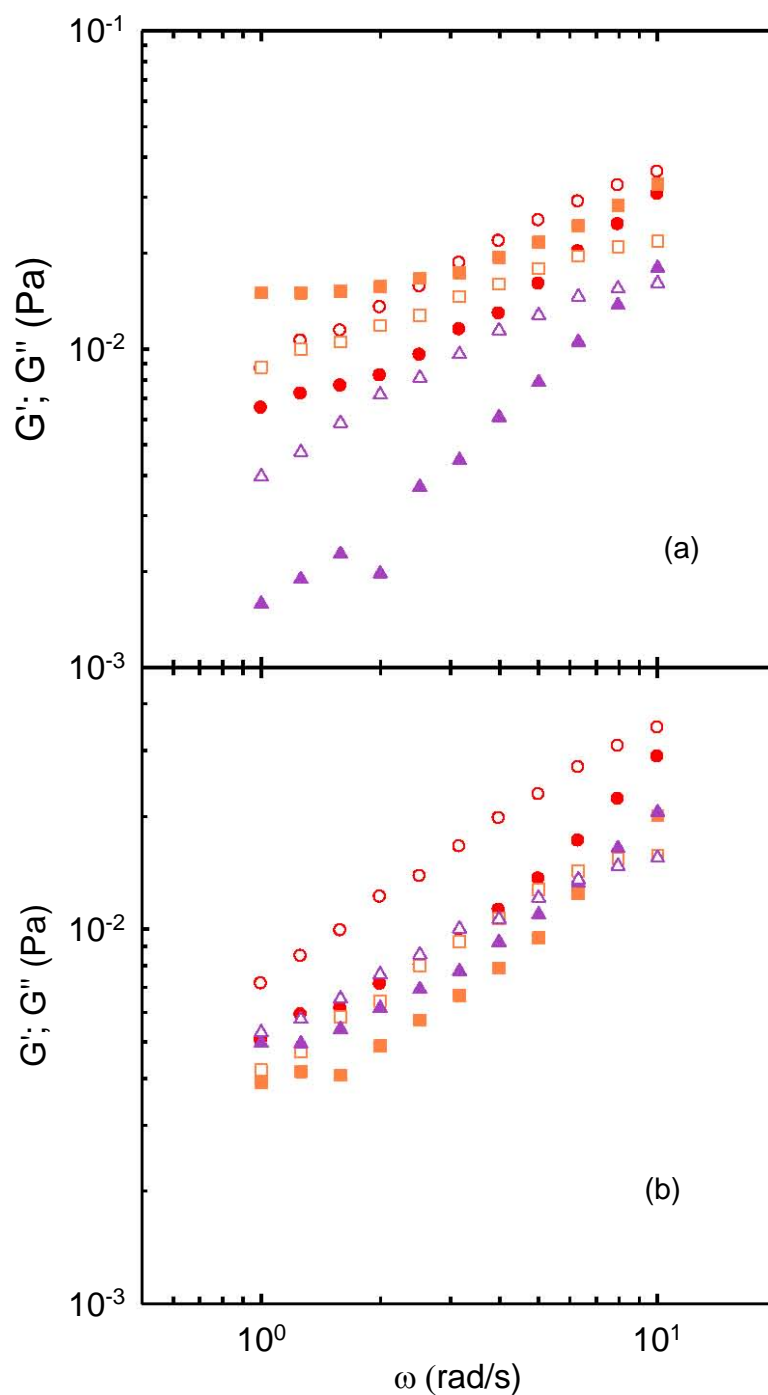


Figura 13. Variación de G' (símbolos llenos) y G'' (símbolos vacíos) con la frecuencia angular a 25 °C para sodio (a), $\gamma = 30\%$, y potasio (b), $\gamma = 50\%$ en concentraciones de 0 (rojos), 80 (naranjas) y 100 mM (morados).

En la Fig. 14(a), se muestra el comportamiento de las disoluciones en presencia de Ca^{2+} . Para las concentraciones de 0, 2, 5 y 8 mM, G'' fue mayor que G' , pero para concentraciones de 10 y 15 mM, se observó un cambio en los módulos con G' mayor que G'' , lo que indica un incipiente predominio del carácter elástico. En la Fig. 14(b) se observa el comportamiento de las disoluciones en presencia del ion Mg^{2+} . A diferencia de la Fig. 14(a) se observa como G'' fue mayor que G' sobre un amplio intervalo de frecuencias. Sin ion externo los módulos se cruzan a aproximadamente 17 rad/s, mientras que para concentraciones de 8 y 15 mM el cruce ocurre a 10 rad/s. Por arriba de estas frecuencias el módulo de almacenamiento fue superior al de pérdida. El efecto de un ión divalente es más fuerte, provocando un mayor plegamiento de las cadenas de mucílago para bajas concentraciones. A pesar de la alta concentración de ion Mg^{2+} el carácter viscoso de las disoluciones predominó. Comparando la influencia del ion K^+ con la del ion Ca^{2+} , la inversión de los módulos dinámicos de las disoluciones ocurrió a menores concentraciones en presencia del ion divalente. Esto se debe a que este ion es más efectivo para interactuar con el mucílago y esto se refleja en el abatimiento de los módulos. De manera general fue necesaria una menor concentración de ion externo divalente para observar la influencia sobre el mucílago en disolución acuosa. Debido a la naturaleza del ion ya que por ser divalente ejerce una doble acción sobre las cadenas de mucílago. Sin embargo, comparando el ion monovalente Na^+ con el divalente Mg^{2+} , el comportamiento que presentaron de manera general fue el mismo; para mayor concentración de ion externo los módulos disminuyeron, pero la intensidad de este cambio depende del tipo de ion y de su naturaleza en el caso de iones con la misma carga.

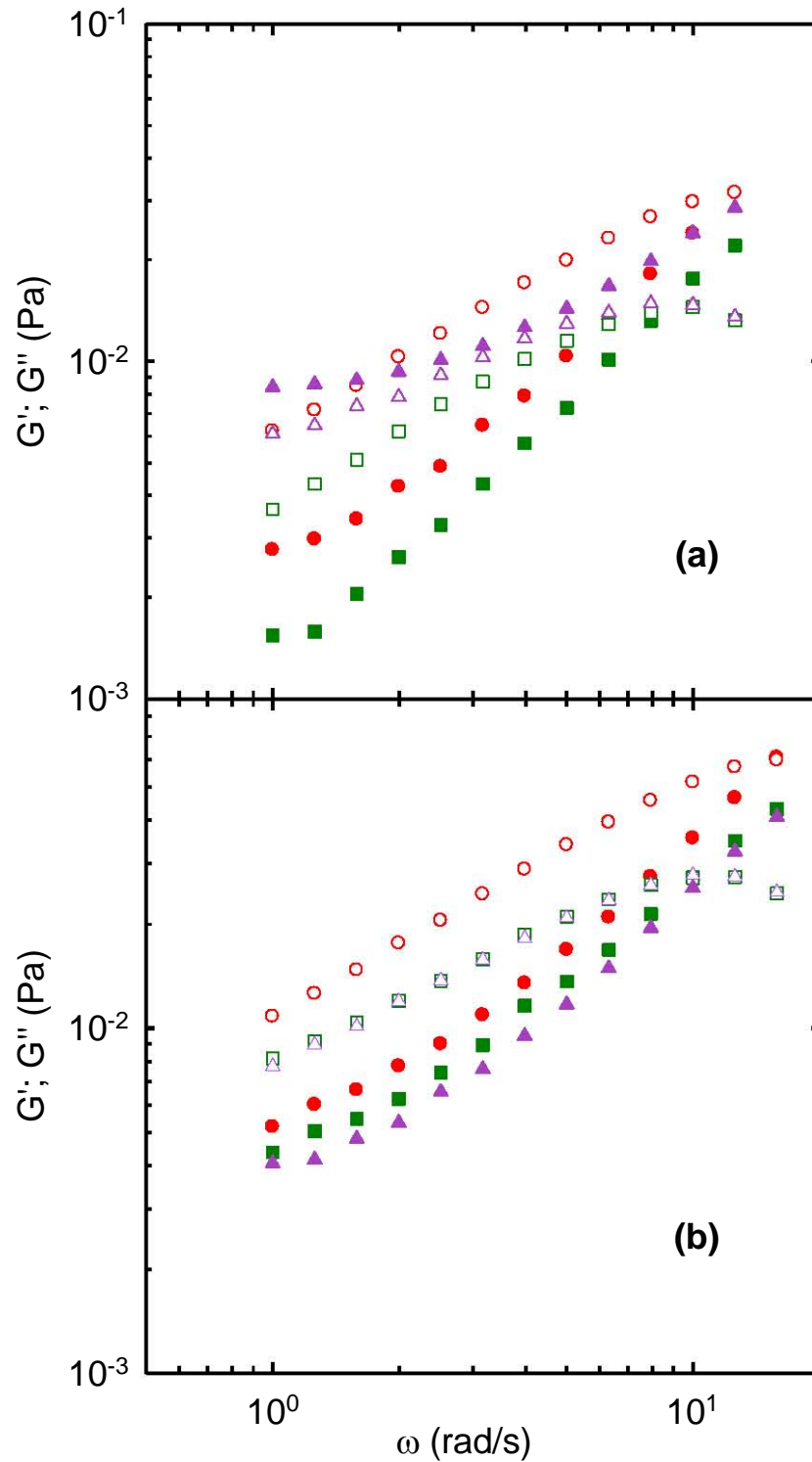


Figura 14. Variación de G' (símbolos llenos) y G'' (símbolos vacíos) con la frecuencia angular a 25 °C para calcio (a), $\gamma = 50\%$ y magnesio (b), $\gamma = 40\%$, en concentraciones de 0 (rojos), 8 (verdes) y 15 mM (morados).

3.4. FUERZA IÓNICA

Debido a que el mucílago de chía tiene una naturaleza polielectrolítica, la adición de iones provoca cambios en la conformación de la macromolécula, es decir, la orientación espacial que inicialmente tiene se ve afectada por la presencia de los cationes añadidos, así como por su interacción con el disolvente. Las cadenas de mucílago responden a la fuerza iónica que ejercen los iones externos, ya sean monovalentes o divalentes, ya que se contraen conforme va aumentando la concentración del ion y por consiguiente la fuerza iónica. Al contraerse, la resistencia al flujo de la molécula también disminuye y la viscosidad se ve afectada por esto. El comportamiento polielectrolítico del mucílago puede representarse examinando la variación de la viscosidad normalizada con el inverso de la raíz cuadrada de la fuerza iónica como se muestra en la Fig. 15. En teoría la dependencia mostrada en esta figura debería producir una relación lineal independientemente de la concentración de mucílago y el tipo y naturaleza del ion externo utilizado. El efecto del ion sodio, Fig. 15(a), es notorio. Para una fuerza iónica muy grande la disminución de viscosidad normalizada se interrumpe y aparece un ligero aumento para 0.05 y 0.1%, mientras que para 0.08% el aumento fue más notable.

En la Fig. 15(b) se aprecia el efecto del ion potasio. La disminución de la viscosidad normalizada es notable, pero menos intensa que para el ion sodio y para una fuerza iónica grande no se observa el aumento de la viscosidad normalizada sobretodo para concentraciones de mucílago de 0.08 y 0.1%. Para una fuerza iónica muy baja, la viscosidad normalizada es igual a uno, lo que significa que la viscosidad de las disoluciones sin iones externos es igual a la de las disoluciones con iones externos. El comportamiento con mayor dispersión a fuerzas iónicas grandes se observó para las disoluciones con 0.05% de mucílago. Esto podría deberse a que para una baja concentración las cadenas de mucílago se encuentran más separadas por lo que las interacciones que se favorecen son intramoleculares. En cambio cuando la concentración de mucílago aumentó, la fuerza iónica inicial fue mayor y a partir de ahí el efecto fue más notorio.

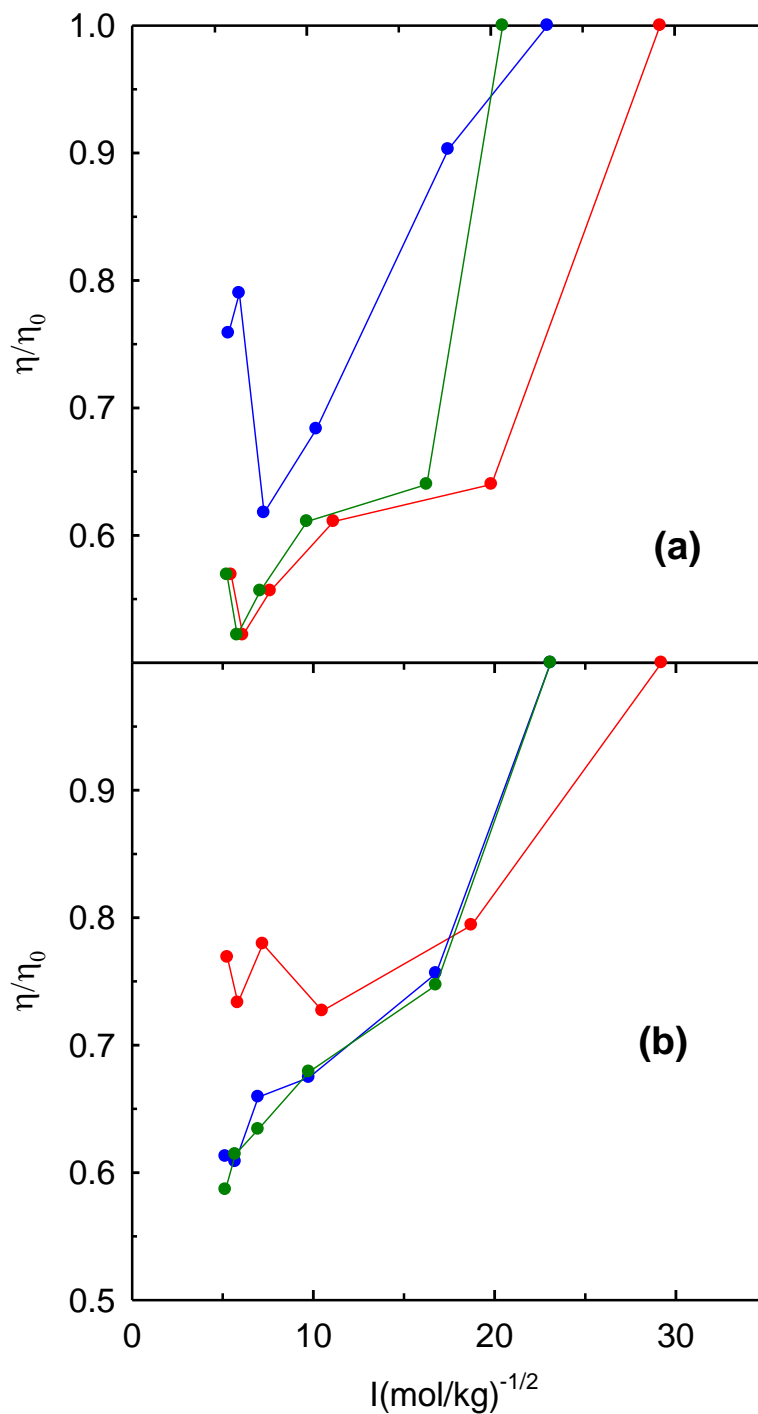


Figura 15. Variación de la viscosidad normalizada con el inverso de la raíz cuadrada de la fuerza iónica a 25 °C de disoluciones con 0, 10, 20, 50, 80 y 100 mM de iones monovalentes de sodio (a) y potasio (b). Los círculos rojos, azules y verdes representan 0.05, 0.08 y 0.1% de mucílago, respectivamente.

El efecto observado para los iones divalentes, Fig. 16(a) para el ion calcio y 16(b) para el ion magnesio demuestra como de nuevo la concentración más baja de mucílago se encuentra por arriba, en viscosidad normalizada, de las otras dos concentraciones y que mientras la concentración del mucílago aumentó, el efecto de la fuerza iónica fue mayor. Es importante señalar que para los iones divalentes y una mayor concentración de mucílago existen mayor número de interacciones entre las cadenas del polisacárido, las intramoleculares y entre la cadena y el disolvente. Debido a que es el mucílago es un polisacárido de naturaleza glucosídica, al estar en disolución acuosa abundan las interacciones secundarias, como de tipo dipolo-dipolo, fuerzas de Coulomb, así como de Van der Waals, que aunque por sí solas son interacciones débiles, en conjunto y en abundancia le confieren a la molécula estabilidad en la disolución.

Considerando que 0.1% de mucílago fue la concentración seleccionada para presentar los resultados de este estudio, en las siguientes figuras se presenta de manera más explícita el efecto de cada ion. El ion Na^+ (Fig. 17) tuvo una mayor influencia en la viscosidad normalizada que el ion K^+ . Esto confirma los resultados expuestos anteriormente. En el caso de los iones externos divalentes (Fig. 18), el ion Mg^{2+} fue el que mostró un efecto mayor sobre la viscosidad normalizada de las disoluciones de mucílago.

Todos los resultados presentados aquí muestran que el mucílago de semilla de chíá en disolución acuosa posee propiedades típicas de un polianión. Así lo demuestra la sensibilidad de la viscosidad hacia la fuerza iónica. Estas macromoléculas por lo general tienen alta viscosidad para una baja fuerza iónica debido a que la molécula se expande por la repulsión de sus cargas (Lapasin y Pricl 1995). Esta sensibilidad al medioambiente acuoso puede aprovecharse para preparar sistemas con diferentes viscosidades dependiendo de la aplicación deseada y abre la posibilidad de seguir estudiando el mucílago bajo condiciones de mayor concentración, así como el efecto de los iones externos sobre la viscosidad intrínseca, parámetro que en este estudio fue determinado únicamente sin iones externos. Asimismo, resta por determinar la concentración crítica que separa el régimen diluido del semi-diluido para determinar el parámetro de traslape de cadenas de mucílago.

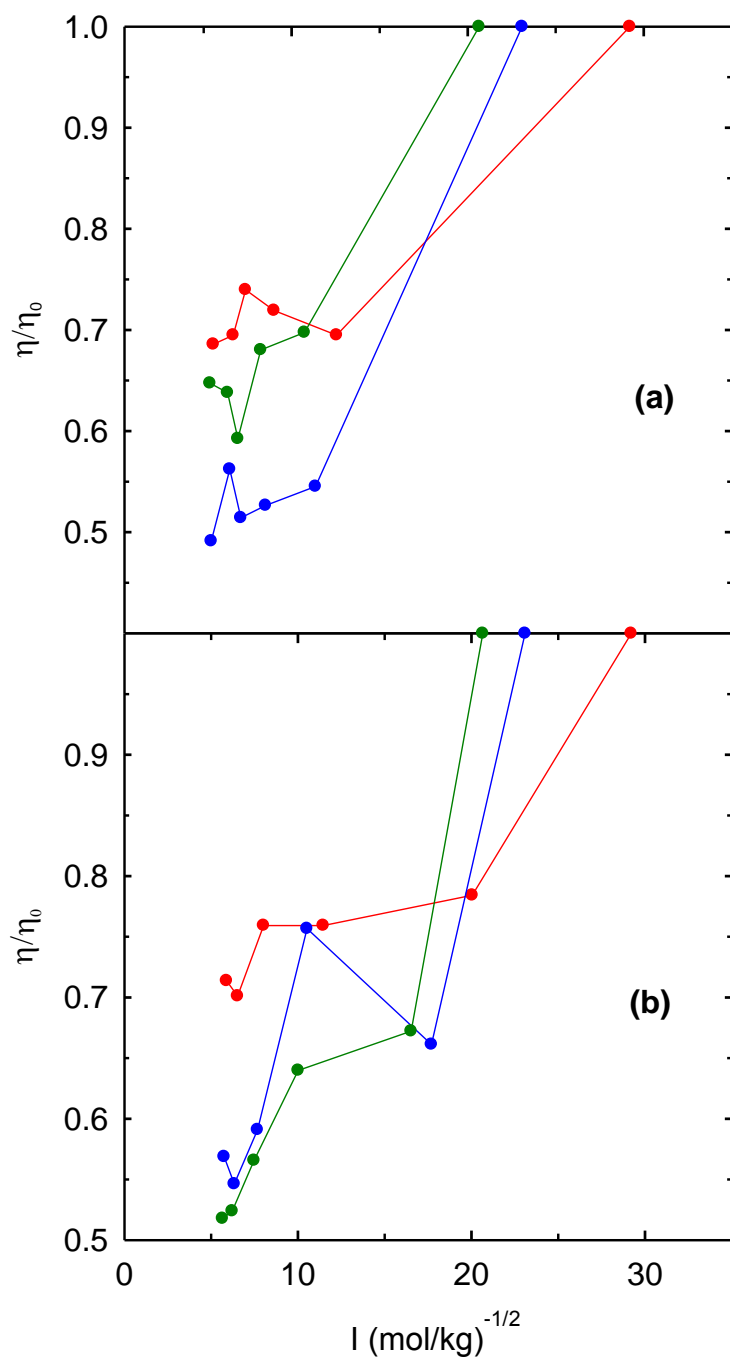


Figura 16. Variación de la viscosidad normalizada con el inverso de la raíz cuadrada de la fuerza iónica a 25 °C de disoluciones con 0, 2, 5, 8, 10 y 15 mM de iones divalentes calcio (a) y magnesio (b). Los círculos rojos, azules y verdes representan concentraciones de mucílago de 0.05, 0.08 y 0.1%, respectivamente.

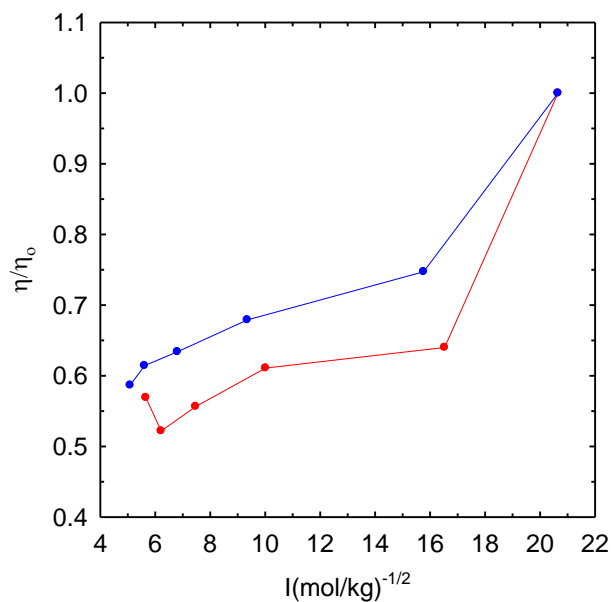


Figura 17. Comparación del inverso de la raíz cuadrada de la fuerza iónica sobre la viscosidad normalizada a 25 °C, para 0.1% de mucílago, con 0, 10, 20, 50, 80 y 100 mM de iones monovalentes sodio (rojo) y potasio (azul).

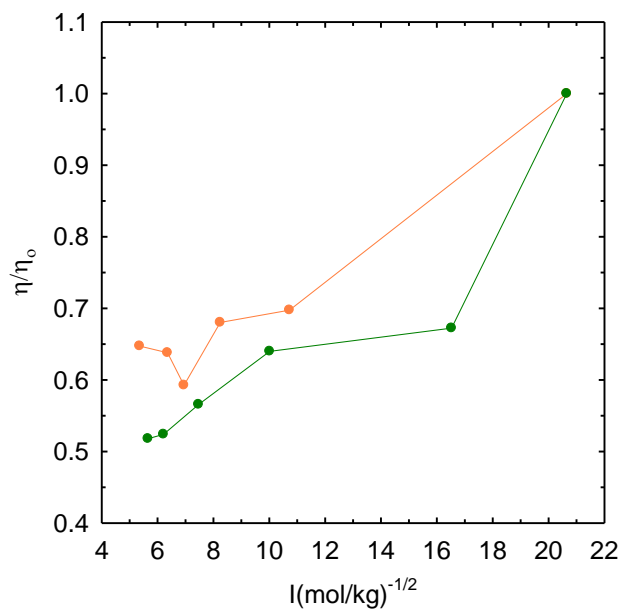


Figura 18. Comparación del inverso de la raíz cuadrada de la fuerza iónica sobre la viscosidad normalizada a 25 °C, para 0.1% de mucílago, con 0, 2, 5, 8, 20 y 15 mM de iones divalentes calcio (naranja) y magnesio (verde).

CONCLUSIONES

El comportamiento viscoelástico de las disoluciones acuosas de mucílago de chía es característico de macromoléculas flexibles cuyos módulos dependen del régimen de concentración. En el intervalo de concentraciones de mucílago y iones externos las disoluciones parecen estar en el régimen semi-diluido.

Las ecuaciones de Huggins y Kraemer produjeron una viscosidad intrínseca que difiere en 0.52%. El valor obtenido, 19.0 dL/g, muestra que las cadenas de mucílago son compactas y probablemente de bajo peso molecular.

En todas las disoluciones predominó el carácter viscoso, en especial para bajas concentraciones de mucílago. La adición de iones, no modificó el predominio del carácter viscoso para bajas concentraciones de iones externos, pero al aumentar su concentración el comportamiento tendió a volverse más elástico sin llegar a presentar ningún comportamiento de gel débil.

La concentración de mucílago es también un factor importante que influye en la viscosidad de las disoluciones. Para bajas concentraciones de mucílago las cadenas presentan menor resistencia al flujo por lo tanto su viscosidad es menor que para altas concentraciones.

El ion externo Na^+ presentó una marcada diferencia con el K^+ , teniendo el primero mayor influencia sobre la viscosidad de la disolución. Por el contrario, para los iones externos divalentes, la diferencia no fue tan marcada pero se aprecia que el Mg^{2+} tuvo mayor efecto. Para los cuatro iones, la viscosidad fue menor para altas velocidades de cizalla.

Las disoluciones con mayor fuerza iónica mostraron mayores cambios de viscosidad normalizada y dependencia con este factor. El tipo de ion influye, observándose un mayor efecto para los iones divalentes.

En general, el mucílago extraído de la semilla de chía presenta un comportamiento polielectrolítico que lo hace sensible a la presencia de iones externos. En todos los casos predominó el carácter viscoso en la disolución siendo mayor en aquellas con concentraciones bajas.

El carácter espesante del mucílago puede cambiar dependiendo de las condiciones del medioambiente acuoso, pero bajo las condiciones estudiadas no hubo formación de gel.

Los comportamientos mostrados abren la posibilidad de continuar los estudios con preparaciones más purificadas de mucílago. En particular, la reducción en el contenido de iones mono y divalentes para obtener la sal específica de cada ion y de esa manera refinar los resultados obtenidos aquí. Sobre todo aquellos que describen la variación de la viscosidad normalizada con el inverso de la raíz cuadrada de la fuerza iónica.

REFERENCIAS

Ayerza, R. & Coates, W. (2005). Chia. Rediscovering a forgotten crop of the Aztecs. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona U.S.A. pp. 44-85.

Beltrán-Orozco, M.C. & Romero, M.R. (2007). La chía alimento milenario. *Industria alimentaria*, sept-oct, 20-29. Acceso en línea el 18 de febrero de 2009. <http://www.scribd.com/doc/419687/CHIA-ALIMENTO-MILENARIO>

Bushway, A. A., Belya, P. R. & Bushway, R. J. (1981). Chia seed as a source of oil, polysaccharide, and protein. *Journal of Food Science*, 46, 1349-1356.

Coates, W. & Ayerza, R. (1996). Production potential of chia in Northwestern Argentina. *Industrial Crops and Products*, 5, 229-233.

Cornejo Romero, A. (1999). Cambios de viscosidad durante la concentración por ultrafiltración en un módulo de fibras huecas de soluciones macromoleculares newtonianas. Tesis de Licenciatura, FQ-UNAM, pp. 39 y 40.

Crispín Carrillo, L. (2006). Comportamiento reológico en flujo estacionario y no estacionario del mucílago de la semilla de chía (*Salvia hispanica*). Tesis de Licenciatura, FQ-UNAM.

Hentry, H.S., Mittleman, M. & McCrohan, P.R. (1990). Introducción de la chía y la goma de tragacanto en los Estados Unidos. En *Avances en Cosechas Nuevas*. Prensa de la Madera, J. Janick & J.E. Simon (eds.), Portland, USA, pp. 252-256.

Lapasin, R. & Prici, S. (1995). *Rheology of Industrial Polysaccharides. Theory and Applications*. Ed. Blackie Academic & Professional. 1st ed. Great Britain.

Lin, K.Y., Daniel, J. & Whistler, R. L. (1994). Structure of chia seed polysaccharide exudate. *Carbohydrate Polymers*, 23, 13-18.

Marin Flores, M., Acevedo Mascarúa, J., Tamez Ramírez, M., Nevero Muñoz, J. & Garay Almada, L. (2008). Proceso de obtención del mucílago de *Salvia hispanica* L. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. World Intellectual Property Organization.

Márquez de Cantú, M. J. (1991). Probabilidad y Estadística para Ciencias Químico-Biológicas. Ed. Mc Graw Hill, pp. 361-375.

Horwitz, W. (2000). Official Methods of Analysis of AOAC International. Volume I. Agricultural Chemicals, Contaminants, Drugs. 17th edition, AOAC International. Chapter 2, p.14; Chapter 4, p.1.

Olivos-Lugo, B.L., Valdivia-López, M.A. & Tecante, A. (2010). Thermal and physicochemical properties and nutritional value of the protein fraction of Mexican chia seed (*Salvia hispanica* L.). *Food Science and Technology International*, 16, 89-96.

Reyes Caudillo, E. (2006). La chía (*Salvia hispanica*): Fuente de fibra dietética total con propiedades funcionales y antioxidantes. Tesis de Licenciatura, FQ-UNAM.

Smidsrod, O. & Haug, A. (1971). Estimation of the relative stiffness of the molecular chain in polyelectrolites from measurments of viscosity at different ionic strengths. *Biopolymers*, 10, 1213-1227.

SEMARNAT (2002). Especies con usos no maderables en bosque de encino, pino y pino-encino en los estados de Chihuahua, Durango, Jalisco, Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Acceso en línea el 20 de febrero de 2009.

www.semarnat.gob.mx/pfnm/SalviaHispanica.html.

Sperling, L.H. (1992). Introduction to Physical Polymer Science, 2nd. Ed., Wiley-Interscience, USA, pp. 100-103.

Taga, M.S., Miller, E.E. & Pratt, D.E. (1984). Chia seeds as a source of natural lipid antioxidants. *Journal of American Oil Chemists' Society*, 61, 928-931.

ANEXO A

ANÁLISIS DE VARIANZA

Para determinar si existe o no diferencia significativa en el uso de las cuatro sales empleadas sobre la viscosidad de las disoluciones de chía, se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA). Se plantean las siguientes hipótesis.

$$H_0 = X_{KCl} = X_{NaCl} = X_{MgCl_2} = X_{CaCl_2}$$

$$H_a = \text{Al menos una de las } X \text{ es diferente.}$$

Nivel de significación empleado: 0.05

Estadístico de prueba utilizado:

$$\frac{MS_{Trat}}{MS_{Error}}$$

H_0 es rechazada si: $F_0 > F_c$

Vel. de def. (s^{-1})	0.1% chía con NaCl		0.1% chía con KCl		0.1% chía con CaCl		0.1% chía y MgCl ₂	
	Eta (Pa·s)	Eta ₂ (Pa·s)	Eta (Pa·s)	Eta ₂ (Pa·s)	Eta (Pa·s)	Eta ₂ (Pa·s)	Eta (Pa·s)	Eta ₂ (Pa·s)
1	0.00851	7.24x10 ⁻⁵	0.0126	0.000159	0.002587	6.69x10 ⁻⁶	0.0136	0.00018
1.2589	0.00718	5.16x10 ⁻⁵	0.00813	6.61x10 ⁻⁵	0.00297	8.82x10 ⁻⁶	0.0105	0.00011
1.5849	0.00621	3.86x10 ⁻⁵	0.002835	8.04x10 ⁻⁶	0.002477	6.13x10 ⁻⁶	0.00811	6.6x10 ⁻⁵
1.9953	0.00478	2.28x10 ⁻⁵	0.003525	1.24x10 ⁻⁵	0.00236	5.57x10 ⁻⁶	0.00663	4.4x10 ⁻⁵
2.5119	0.0044	1.94x10 ⁻⁵	0.002185	4.77x10 ⁻⁶	0.00225	5.06x10 ⁻⁶	0.00558	3.1x10 ⁻⁵
3.1623	0.00402	1.62x10 ⁻⁵	0.00255	6.5x10 ⁻⁶	0.00229	5.24x10 ⁻⁶	0.00524	2.7x10 ⁻⁵
3.9811	0.00369	1.36x10 ⁻⁵	0.002325	5.41x10 ⁻⁶	0.00216	4.67x10 ⁻⁶	0.00481	2.3x10 ⁻⁵
5.0119	0.00351	1.23x10 ⁻⁵	0.00212	4.49x10 ⁻⁶	0.002097	4.4x10 ⁻⁶	0.00436	1.9x10 ⁻⁵
6.3096	0.00332	1.1x10 ⁻⁵	0.001935	3.74x10 ⁻⁶	0.001993	3.97x10 ⁻⁶	0.00401	1.6x10 ⁻⁵
7.9433	0.0032	1.02x10 ⁻⁵	0.001915	3.67x10 ⁻⁶	0.00194	3.76x10 ⁻⁶	0.00381	1.5x10 ⁻⁵

10	0.00306	9.36×10^{-6}	0.001855	3.44×10^{-6}	0.00189	3.57×10^{-6}	0.00366	1.3×10^{-5}				
12.5893	0.00296	8.76×10^{-6}	0.001755	3.08×10^{-6}	0.00183	3.35×10^{-6}	0.00349	1.2×10^{-5}				
15.8489	0.00282	7.95×10^{-6}	0.001715	2.94×10^{-6}	0.001777	3.16×10^{-6}	0.00332	1.1×10^{-5}				
19.9526	0.00268	7.18×10^{-6}	0.00169	2.86×10^{-6}	0.00173	2.99×10^{-6}	0.00317	0.00001				
25.1189	0.00255	6.5×10^{-6}	0.001645	2.71×10^{-5}	0.001683	2.83×10^{-6}	0.00302	9.1×10^{-5}				
31.6228	0.00247	6.1×10^{-6}	0.001595	2.54×10^{-6}	0.001653	2.73×10^{-6}	0.0029	8.4×10^{-6}				
39.8107	0.00236	5.57×10^{-6}	0.001555	2.42×10^{-6}	0.001613	2.6×10^{-6}	0.00277	7.7×10^{-6}				
50.1188	0.00228	5.2×10^{-6}	0.001505	2.27×10^{-6}	0.001577	2.49×10^{-6}	0.00264	7×10^{-6}				
63.0958	0.0022	4.84×10^{-6}	0.001475	2.18×10^{-6}	0.00155	2.4×10^{-6}	0.00254	6.5×10^{-6}				
79.4329	0.00213	4.54×10^{-6}	0.00144	2.07×10^{-6}	0.001523	2.32×10^{-6}	0.00245	6×10^{-6}				
100	0.00207	4.28×10^{-6}	0.00143	2.04×10^{-6}	0.001507	2.27×10^{-6}	0.00239	5.7×10^{-6}				
125.893	0.00202	4.08×10^{-6}	0.00141	1.99×10^{-6}	0.001487	2.21×10^{-6}	0.00233	5.4×10^{-6}				
158.489	0.00197	3.88×10^{-6}	0.0014	1.96×10^{-6}	0.001477	2.18×10^{-6}	0.00226	5.1×10^{-6}				
199.526	0.00194	3.76×10^{-6}	0.001385	1.92×10^{-6}	0.001467	2.15×10^{-6}	0.00221	4.9×10^{-6}				
251.189	0.00191	3.65×10^{-6}	0.00138	1.9×10^{-6}	0.001457	2.12×10^{-6}	0.00217	4.7×10^{-6}	GRAN TOTAL			
ΣEta	8.42E-02		0.063355		4.73×10^{-2}		0.10797		0.303			
ΣEta²	3.54×10^{-4}		0.00031		9.37×10^{-5}		0.00065		1.41×10^{-3}			
Tamaño de muestra (n)	25		25		25		25		100			
Media Armónica	0.002311											
Σ (Eta)/N	9.18×10^{-4}											
$SST = \Sigma[Eta^2] - \frac{(\Sigma Eta)^2}{N}$	4.94×10^{-4}											
Σ (Eta) ²	7.10×10^{-3}									0.0040139	2.24×10^{-3}	0.01166
Σ (Eta)/n	2.84×10^{-4}									0.0001606	8.97×10^{-5}	0.00047
$SSTrat = \frac{\Sigma[Eta^2]}{N} - \frac{(\Sigma Eta)^2}{N^2}$	8.28×10^{-5}											
SSError=SST-SSTrat	4.11×10^{-4}											

FUENTE DE VARIACIÓN	G.L.	S.C.	C.M.	F_{calc}	F_{teórica}
Tratamiento = Sales	3	8.283×10^{-5}	2.761×10^{-5}	6.454	2.76
Error	96	0.0004107	4.278×10^{-6}		
Total	99	0.0004936			

$F_c > F_t (0.05, 3, 99)$. Por lo tanto al menos una de las sales utilizadas no tiene el mismo efecto sobre la viscosidad de la solución.