

Propiedades reológicas y microestructurales de geles prebióticos de inulina

M.L. López-Castejón*, C. Bengoechea, S. López Collado, J.M. Aguilar

Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Sevilla, Escuela Politécnica Superior. Calle Virgen de África 7, 41011 Sevilla, España

Rheological and micro-structural properties of inulin prebiotic gels

Propietats reològiques i microestructurals de gels prebiòtics de inulina

RECEIVED: 4 OCTOBER 2019; REVISED: 17 JANUARY 2019; ACCEPTED: 6 FEBRUARY 2020

SUMMARY

Inulin is a non-digestible oligosaccharide that is present in many vegetables, fruits, and cereals. Nowadays, it is industrially extracted from chicory root and is widely used as an ingredient in functional foods (e.g. dairy products). In this research work, the rheological behavior of inulin gels was studied at different inulin (15, 20, 25 %) and calcium salts contents (lactate or chloride, at 0, 2.5 or 5 %). In general, an increase in the storage and viscous shear moduli (G' and G'' , respectively) was observed when increasing inulin content or when Calcium chloride was present in the original solution that led to the formation of the gel. On the other hand, both viscoelastic moduli generally decreased in the presence of Calcium lactate. The addition of Calcium chloride, therefore, allows the formation of a reinforced gel with the additional benefit of including Calcium in the formulation, which would be a good starting point for the production of functional foods.

Key words: Inulin; gel; rheology; calcium; prebiotic

RESUMEN

La inulina es un carbohidrato no digerible que está presente en muchos vegetales, frutas y cereales. En la actualidad, se extrae industrialmente de la raíz de la achicoria y se utiliza ampliamente como ingrediente en alimentos funcionales (e.g. productos lácteos). En este trabajo de investigación se estudió el comportamiento reológico de geles de inulina, a diferentes contenidos del polisacárido (15, 20, 25 %) y sales de calcio (lactato o cloruro, a 0, 2,5 o 5 %). Se observó, de forma general un aumento en los módulos de cizalla de almacenamiento y viscoso (G' y G'' , respectivamente) al incrementarse la concentración de inulina o la presencia de cloruro de calcio en la solución original a

partir de la que se forma el gel. Por otra parte, ambos módulos generalmente disminuyeron con la presencia de lactato de calcio. La adición de cloruro de calcio, por tanto, permitirá la formación de un gel reforzado, con el beneficio adicional de la presencia de calcio, lo cual lo convierte en un buen punto de partida para la producción de alimentos funcionales.

Palabras clave: Inulina; gel; reología; calcio; prebiótico

RESUM

La inulina és un carbohidrat no digerible que està present en molts vegetals, fruites i cereals. En l'actualitat, s'extreu industrialment de l'arrel de la xicoira i s'utilitza àmpliament com a ingredient en aliments funcionals (p.e. productes làctics). En aquest treball de investigació es va estudiar el comportament reològic de gels de inulina, a diferents continguts del polisacàrid (15, 20, 25%) i sals de calci (lactat o clorur, a 0, 2,5 o 5%). Es va observar, de forma general un augment en els mòduls de cisalla d'emmagatzematge i viscosos (G' i G'' , respectivament) a l'incrementar-se la concentració de inulina o la presència de clorur de calci en la solució original a partir de la qual es forma el gel. D'altra banda, tots dos mòduls generalment van disminuir amb la presència de lactat de calci. L'addició de clorur de calci, per tant, permetrà la formació d'un gel reforçat, amb el benefici addicional de la presència de calci, la qual cosa el converteix en un bon punt de partida per a la producció d'aliments funcionals.

Paraules clau: Inulina, gel, reologia, calci, prebiòtic.

*Corresponding author: llcastejon@us.es

1. INTRODUCCIÓN

Existen numerosos estudios que establecen la relación entre la flora intestinal y la salud. Los carbohidratos son nutrientes importantes en la dieta, tienen una biodisponibilidad que depende de la capacidad de ser absorbidos en el intestino delgado. La inulina es un carbohidrato no disponible compuesto por una mezcla de oligo y/o polisacáridos constituidos por cadenas unitarias de fructosa (unidas por enlaces β - (1-2) -D-fructosil-fructosa) de varias longitudes, terminadas generalmente por una sola unidad de glucosa (unido por un enlace α -D-glucopiranosilo) ¹. La inulina se puede sintetizar a partir de fuentes naturales como la raíz de achicoria, o sintéticamente a partir de sacarosa a través de la acción de la β -fructo-furanosidasa. El grado de polimerización de la inulina, así como la presencia de ramificaciones, es una propiedad importante, ya que influyen en la funcionalidad de la mayoría de la inulina en un grado sorprendente ². La inulina posee un sabor suave y neutro, es moderadamente soluble en agua y confiere cuerpo y sabor. Tiene varias aplicaciones en la industria alimentaria, ya que puede utilizarse como sustituto de azúcar o grasa y agente emulsionante o estabilizante ³. Por este motivo se añade a la leche, productos fermentados, gelatinas, postres aireados, mousses, helados y productos de panadería. Esta capacidad para modificar la flora intestinal se denomina efecto prebiótico y los prebióticos se definen como “ingredientes alimentarios no digeribles que afectan de manera beneficiosa al organismo al estimular selectivamente el crecimiento y / o la actividad de una o un grupo limitado de bacterias en el colon” ⁴. La inulina no libera fructosa en el tracto gastrointestinal y, por lo tanto, se clasifica como un ingrediente alimentario bajo en calorías ⁵. Los estudios muestran evidencia de que la inulina y los fructooligosacáridos contribuyen a aumentar la absorción de calcio, magnesio y hierro en humanos ^{6,7}.

El calcio es un nutriente esencial requerido en la nutrición humana en cantidades importantes. Una dieta con cantidades adecuadas de calcio ayuda a controlar las enfermedades causadas por la deficiencia de este elemento como la osteopenia y la osteoporosis ⁸. Estas enfermedades se producen no solo por la falta de calcio, sino también por una mala absorción, que luego puede revertirse por la acción de la vitamina D ⁹. El lactato de calcio es una sal de calcio, que generalmente se utiliza como conservante natural en la industria alimentaria. También se usa como estabilizador de la estructura de frutas y verduras durante el proceso industrial. Además, si se mezcla con otras sales de calcio puede funcionar como estabilizador de bebidas. Proporciona un 18% de calcio y su ingesta no representa ningún peligro, por lo que se puede consumir sin límite, excepto en el caso de niños y bebés que aún no han desarrollado las enzimas que lo metabolizan. El cloruro de calcio también se conoce como seguro para la salud y su papel depende del tipo de alimento o proceso de transformación al que se aplica. Se usa como un agente reafirmante para verduras y frutas cocidas, lo que le da una textura más

firme, además de retener la humedad en los alimentos y reducir su punto de congelación ¹⁰.

Los geles exhiben propiedades microestructurales y mecánicas muy diferentes por lo que es difícil de definir. Según Clark ¹¹, un gel es un material formado por una red tridimensional sólida que atrapa el disolvente (agua) y se inmoviliza. Durante la formación de la red tridimensional, el líquido viscoso se convierte en una matriz viscoelástica. Dependiendo del comportamiento reológico que presenten, podemos hablar de geles fuertes o geles débiles cuando se rompen y fluyen bajo la aplicación de fuerzas muy bajas ¹². Si se observa la microestructura, los geles se pueden clasificar en dos grupos: redes de polímeros y dispersiones de agregados, entre las cuales, hay transiciones ¹³. Aunque la mayoría de los geles absorben agua, parte de su fase líquida libre. Este fenómeno se llama sinéresis, ya que generalmente es un sol diluido de liberación líquida. La sinéresis es un sol influenciado por el pH del sistema, que alcanza su máximo en el punto isoeléctrico y la temperatura a la que se mantiene el gel. Lo contrario de la sinéresis es la hidratación. Muchas sustancias sólidas, ya sea a base de proteínas o polisacáridos, cuando entran en contacto con el agua comienzan a absorberla, lo que aumenta su volumen, es decir, presenta hidratación. La tasa de imbibición generalmente disminuye con el tiempo de contacto entre un gel y agua. El pH y la temperatura son los principales factores que afectan a la absorción de un gel.

La reología definida como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de materiales ¹⁴, se considera una herramienta fundamental tanto en el proceso de control de la gelificación experimental, como en la caracterización final de los geles. La caracterización y el estudio de parámetros reológicos como la viscosidad, el esfuerzo de corte o la velocidad de corte necesaria para evaluar el papel potencial como espesantes de ciertos ingredientes ^{15,16}. Estas propiedades reológicas son muy importantes para el desarrollo de nuevos productos, la estimación de su vida útil, la evaluación sensorial y la evaluación de la estabilidad ¹⁷. Estas propiedades pueden verse afectadas por algunos factores como la temperatura, la concentración de la fase continua y el pH ¹⁸.

El objetivo principal del presente trabajo es el desarrollo y caracterización reológica y microestructural de geles de inulina, para ello se realizarán ensayos de flujo y de cizalla oscilatoria, así como medidas de la distribución de tamaño de gotas. De manera específica, se estudiará el efecto de la concentración del polisacárido (15, 20, 25 %) y de la presencia de lactato o cloruro cálcico (0, 2,5, 5 %).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Se ha utilizado inulina de achicoria purificada ($\geq 99,5\%$), Orafti HP, BENEÓ (Bélgica). Cloruro de calcio anhidro de grano grueso (100 %), de Panreac (España) y lactato de calcio hidratado ($\geq 98\%$), de Sigma-Aldrich Chemistry (EE.UU.).

Las muestras se han preparado añadiendo la cantidad de agua necesaria a la cantidad adecuada de inulina (15, 20, 25% p/v) o inulina con sales de calcio (2,5, 5%), utilizando para ello un dispersador T25 Basic Ultra-Turrax (Ika, Alemania), para asegurar la homogenización de la mezcla resultante. Las muestras durante la agitación se colocaron en un baño con hielo, para evitar posibles pérdidas por evaporación. Una vez se ha producido la disolución de las mezclas, se dejan gelificar a temperatura ambiente durante 24 horas.

2.2. Métodos

2.2.1. Propiedades reológicas

Los ensayos de reología de cizalla se efectuaron sobre los geles utilizando para ello un reómetro AR 2000 (TA Instruments, Estados Unidos). Se ha utilizado una geometría de aluminio placa-placa en paralelo con baja inercia con un diámetro de 40 mm y un espacio entre placas de 1 mm para todos los ensayos.

En los ensayos de flujo, la velocidad de cizalla se ha incrementado escalonadamente en el intervalo comprendido entre 0,1 y 100 s⁻¹, hasta obtener el estado estacionario a cada velocidad.

Las mediciones de cizalla oscilatoria de pequeña amplitud (SAOS) se realizaron en el mismo reómetro para obtener las propiedades reológicas dentro de la Región Viscoelástica Lineal (RVL) para todas las muestras estudiadas a frecuencias entre 0,1 y 10 Hz. Previamente, se determinó la RVL mediante barridos de deformación a frecuencia constante (0,1 Hz) desde 0,01 a 100 %.

2.2.2. Distribución de tamaño de gota (DTG)

La distribución de tamaños de partículas de las diferentes dispersiones de los geles de inulina se ha determinado por dispersión del haz de láser 45 mm utilizando un dispositivo Malvern Mastersizer ZX (Malvern Instruments, Malvern, Reino Unido) con agua destilada como agente dispersante. Para ello, se han tomado alícuotas de 0,5 ml y se han introducido en la cámara del analizador sometida a una agitación moderada hasta conseguir una obscuración comprendida alrededor del 15%, siendo el índice de refracción utilizado de 1,53. Las medidas se realizaron a temperatura ambiente al menos por duplicado.

Los valores del diámetro superficial, d_{32} , que es inversamente proporcional a la superficie específica de las gotas, se ha obtenido mediante la siguiente expresión:

$$d_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad (1)$$

donde n_i es el número de gotas con un diámetro igual a d_i .

El diámetro volumétrico, d_{43} , se ha obtenido utilizando la siguiente expresión:

$$d_{43} = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3} \quad (2)$$

Todas las medidas de DTG se han llevado a cabo en las muestras desde el momento en que se prepararon.

2.2.3. Análisis estadístico

Los resultados se han presentado como una media \pm desviación estándar. Se ha realizado un análisis de

varianza con un valor de probabilidad p igual a 0,05. Un valor de p inferior a 0,05 se ha considerado significativo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Geles de inulina

Los geles de inulina se prepararon con diferentes contenidos de polisacáridos (15, 20 y 25 % p/v) para estudiar el efecto del contenido de inulina sobre la reología de los geles y su diámetro de partícula. Kim et al.¹⁹ estudiaron la existencia de una concentración crítica de inulina que debe ser sobrepasada para producir geles, ya sea térmicamente o inducidos por cizallamiento. Debe destacarse que las concentraciones de inulina estudiadas en el presente trabajo están por encima de las concentraciones críticas reportadas.

Espectros mecánicos

Antes de realizar las pruebas de barrido de frecuencia, se estableció la RVL a 1 Hz para cada sistema considerado. Así, la Tabla 1 muestra el esfuerzo crítico (τ_c) para los geles formados con diferentes contenidos de inulina por encima de los cuales su estructura comienza a descomponerse²⁰. Está claro cómo τ_c aumenta significativamente a medida que aumenta el contenido de polisacárido, lo que indicaría el fortalecimiento de la estructura como resultado de un mayor número de interacciones (van der Waals, puente de hidrógeno,...). Estas interacciones contribuirían al desarrollo de geles físicos especialmente en contenidos de inulina más altos, cuando las cadenas poliméricas están próximas.

Tabla 1 Tensión crítica (τ_c) y deformación (γ_c) para geles de inulina con diferentes contenidos de inulina

Composición	τ_c (Pa)	γ_c (%)
15 %	2,11 \pm 0,102	0,505 \pm 7,07·10 ⁻⁶
20 %	17,3 \pm 0,955	0,509 \pm 9,19·10 ⁻⁵
25 %	42,2 \pm 1,18	0,509 \pm 1,47·10 ⁻³

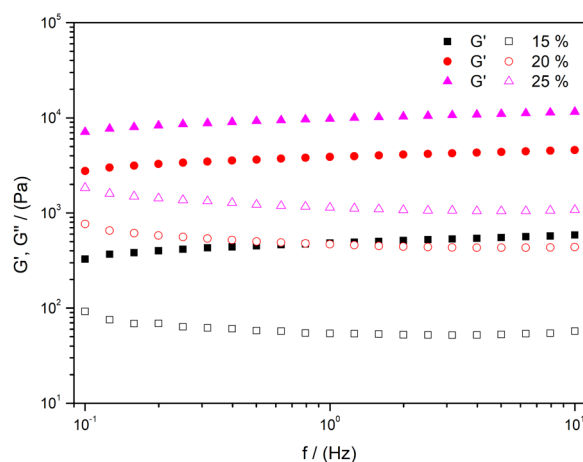


Figura 1. Evolución de los módulos elástico y viscoso con la frecuencia para geles de inulina (15; 20 y 25 %).

La Figura 1 muestra los espectros mecánicos obtenidos para los sistemas estudiados, observando que todos muestran la misma respuesta cualitativa: el módulo elástico (G') está muy por encima del módulo viscoso (G''), lo que denota el comportamiento predominantemente elástico esperado de un gel. Se puede observar que un aumento en el contenido de inulina en los sistemas da como resultado un aumento de sus módulos viscoelásticos, G' y G'' . Franck y De Leenheer²¹ indicaron que a una alta concentración (> 25% en peso para la inulina nativa), la inulina formó una red compuesta de partículas cristalinas sólidas después del cizallamiento que le confiere una textura similar a un gel. Cuando la inulina se mezcla completamente con agua u otro líquido acuoso utilizando un dispositivo de cizallamiento, como un mezclador de rotor-estator (por ejemplo, Ultra-Turrax) o un homogeneizador, se forma una estructura cremosa blanca que se puede incorporar fácilmente en los alimentos para reemplazar la grasa²².

Curvas de flujo

En la Figura 2 se muestra la variación de la viscosidad en función de la velocidad de deformación a 20°C para diferentes concentraciones de inulina (15, 20 y 25 % p/v). La viscosidad aparente de todas las soluciones con diferente concentración de inulina disminuyó al aumentar la velocidad de deformación. Este hecho indica que las muestras presentaron un comportamiento pseudoplástico, debido a que a medida que la velocidad de deformación se incrementa, las cadenas de las moléculas de polímeros entrelazadas dispuestas en forma aleatoria se alinean en la dirección del flujo, generando soluciones de menor viscosidad, ocasionando una menor interacción entre las cadenas de polímeros adyacentes²³. Por otra parte, se puede observar que la viscosidad aparente aumentó cuando la concentración de inulina presente es mayor en los sistemas, este comportamiento es atribuido como se mencionó anteriormente a un mayor número de interacciones entre las cadenas del polisacárido.

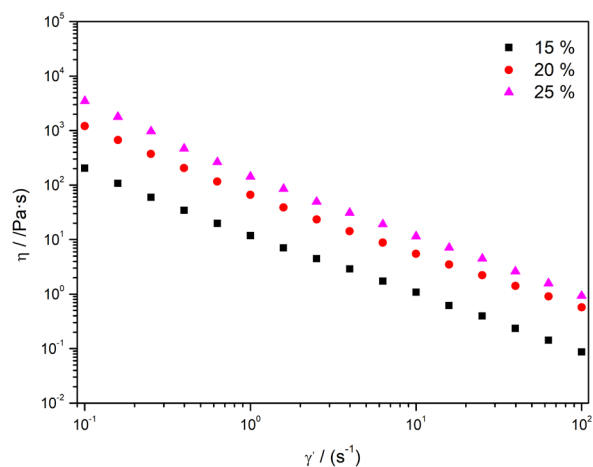


Figura 2. Curvas de flujo para geles de inulina (15; 20 y 25 %).

Además, es posible establecer una superposición empírica para todas estas curvas utilizando el factor de

desplazamiento vertical dependiente de la concentración, a_c , con el sistema que contiene 20% de inulina como referencia. No hubo necesidad de cambiar las curvas horizontalmente. Para los sistemas inulina-agua al 15% (p/v) es necesario multiplicar los resultados obtenidos de viscosidad por 2,20 y para los sistemas al 25% (p/v) es necesario multiplicarlo por 0,65. Por tanto, se puede decir que la viscosidad experimenta un incremento mayor a concentraciones entre 15 y 20% que entre 20 y 25%.

Distribución de tamaño de partículas

La Figura 3 muestra la distribución del tamaño de partículas para geles estabilizados por inulina (15, 20 y 25% en p/v).

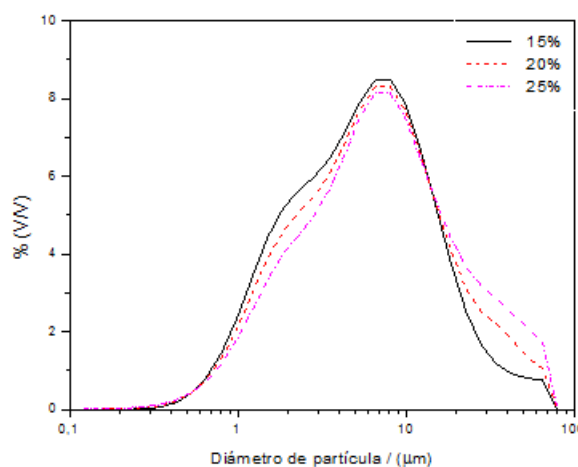


Figura 3. Perfil de distribución de tamaño de gota con la concentración de inulina (15; 20 y 25 %).

Todos los geles mostraron una distribución monomodal con cierto grado de polidispersión, observándose un aumento del hombro derecho y consiguiente descenso del hombro izquierdo al aumentar la concentración de inulina. En la Tabla 2 se muestran los valores de los diámetros Sauter ($d_{3,2}$) y volumétrico ($d_{4,3}$) y de uniformidad (U). Tradicionalmente, el diámetro Sauter se ha utilizado como un diámetro promedio para la mayoría de las gotas, y el diámetro volumétrico se ha asociado a modificaciones en el tamaño de las gotas relacionadas con los procesos de desestabilización (por ejemplo, coalescencia, floculación)²⁴. Tanto los valores de $d_{3,2}$, $d_{4,3}$ y uniformidad aumentan al incrementarse la concentración de inulina tal y como se muestra. Por tanto, conforme aumenta la concentración de inulina, las muestras resultan compuestas por partículas de mayores tamaños y con una distribución de tamaños de partícula más polidispersa, lo que denota una menor estabilidad, ya que los tamaños de gota pequeños se han relacionado con sistemas estables²⁵. La alta estabilidad detectada por los sistemas puede estar relacionada con el aumento de la viscosidad, lo que favorecería la estabilidad mediante la inhibición de la movilidad.

3.2. Efecto de las sales de Calcio

Los hidrocoloides pueden formar estructuras de gel en presencia de iones con carga positiva (por ejemplo,

calcio), siendo el ion positivo ajustado en áreas con carga negativa dentro de la molécula de hidrocoloide. Para analizar este efecto se van a estudiar la presencia de cloruro cálcico y lactato cálcico a diferentes concentraciones (0; 2,5 y 5% p/v) en la formulación de los geles que contienen 20% de inulina.

Tabla 2 Valores de diámetro externo ($d_{3,2}$), diámetro volumétrico ($d_{4,3}$) y uniformidad para geles con distinto contenido de inulina (15, 20 y 25% en peso).

Composición	$d_{3,2}(\mu\text{m})$	$d_{4,3}(\mu\text{m})$	Uniformidad
15 %	$3,74 \pm 2,82 \cdot 10^{-2}$	$9,53 \pm 7,07 \cdot 10^{-2}$	$1,02 \pm 3,18 \cdot 10^{-2}$
20 %	$3,98 \pm 2,18 \cdot 10^{-2}$	$11,6 \pm 0,231$	$1,11 \pm 6,27 \cdot 10^{-3}$
25 %	$4,18 \pm 7,07 \cdot 10^{-2}$	$12,9 \pm 4,74 \cdot 10^{-2}$	$1,21 \pm 8,98 \cdot 10^{-2}$

Tabla 3 Tensión crítica (t_c) y tensión (γ_c) para geles de inulina al 20% en peso con diferentes contenidos de sal de calcio.

% Cloruro	τ_c (Pa)	γ_c (%)
0% sal	$17,3 \pm 0,955$	$0,509 \pm 9,19 \cdot 10^{-5}$
2,5% cloruro	$24,5 \pm 6,43$	$0,805 \pm 1,02 \cdot 10^{-3}$
5% cloruro	$35,2 \pm 2,41$	$0,722 \pm 0,118$
% Lactato	τ_c (Pa)	γ_c (%)
0% sal	$17,3 \pm 0,955$	$0,509 \pm 9,19 \cdot 10^{-5}$
2,5% lactato	$19,9 \pm 2,44$	$0,721 \pm 1,18 \cdot 10^{-1}$
5% lactato	$21,7 \pm 0,912$	$0,803 \pm 4,59 \cdot 10^{-4}$

Propiedades reológicas

La Tabla 3 muestra los valores tanto para el estrés crítico (t_c) como para la deformación (γ_c) para geles con un 20% en peso de inulina, formados en presencia de diferentes contenidos de las sales (0; 2,5 y 5 %). Se puede observar que la presencia de sal provoca un aumento en t_c y γ_c alcanzándose un valor mayor para la concentración máxima de sal utilizada (5% en peso).

La Figura 4 muestra los espectros mecánicos para geles de inulina al 20% en peso que contienen diferentes cantidades (0-5% en peso) de sal de calcio: cloruro de calcio (Figura 4A) y lactato de calcio (Figura 4B). Todas las pruebas de frecuencia siempre se llevaron a cabo dentro del rango viscoelástico lineal ($\tau < t_c$; $\gamma < \gamma_c$). Siempre se encontró un comportamiento predominantemente elástico para los sistemas estudiados ($G' > G''$), confirmando el carácter de gel de las muestras. En presencia de cloruro de calcio, se observa cómo los módulos aumentan al añadirse más concentración de cloruro y la diferencia entre ambos se mantiene prácticamente constante. Parece indicar que un mayor contenido de esta sal produce geles con mayores propiedades viscoelásticas y más resistentes a esfuerzos de cizalla. Sin embargo, la presencia de lactato de calcio como resultado una disminución en ambos módulos viscoelásticos, que tiene lugar en mayor medida, cuando

la concentración de sal es mayor. Esta disminución puede explicarse en función de la interrupción de los agregados que entrelazan diferentes cadenas presentes en las partículas de gel²⁶. Diferentes autores han indicado que a bajas concentraciones de Ca^{2+} , se encuentra un aumento de las propiedades viscoelásticas hasta una meseta, que disminuye abruptamente una vez que se excede una concentración crítica (0,015-0,02% en peso)^{26,27}.

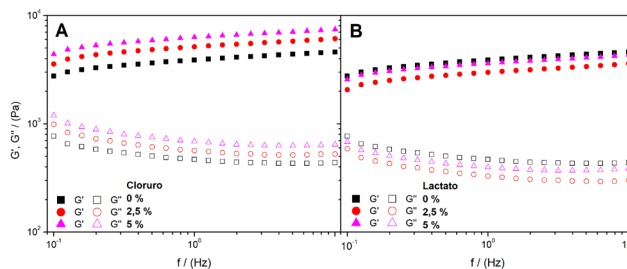


Figura 4. Evolución de los módulos elástico y viscoso con la frecuencia para geles de inulina (15; 20 y 25 %) (A) en presencia de cloruro de calcio; (B) en presencia de lactato de calcio.

Distribución de tamaño de gotas

En la Figura 5 se muestran las curvas de distribución de tamaño de partículas de los geles con las dos sales de calcio a diferentes concentraciones. Todos los geles presentan una distribución de partículas monomodal. Se observa que el comportamiento de las curvas para las distintas concentraciones de cloruro es similar, pero esto no sucede con el lactato donde las curvas de distribución de tamaño de partículas difieren para las concentraciones en estudio.

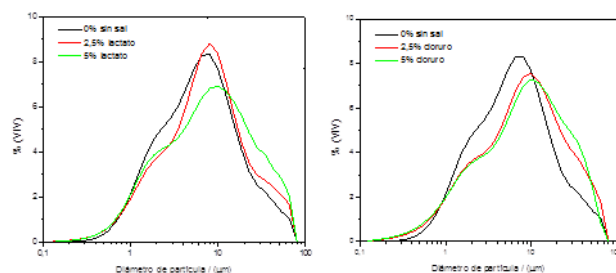


Figura 5

En la Tabla 4 se exponen los valores de $d_{3,2}$; $d_{4,3}$ y la uniformidad de las soluciones con las sales de cloruro y lactato cálcico, comparándolos con los sistemas de referencia de inulina al 20% en peso.

4. CONCLUSIONES

Todos los sistemas estudiados, con o sin presencia de aditivos, tienen un espectro mecánico en el que G' es superior a G'' , tratándose, por tanto, de geles físicos con una red tridimensional formada por uniones que no son completamente estables. El aumento de la concentración de inulina presente en las soluciones produce un aumento de las propiedades reológicas (G' ,

G”) y del intervalo viscoelástico lineal, resultando geles compuestos por partículas de mayores tamaños y con una distribución de partícula más polidispersa. Las curvas de flujo a distintas concentraciones de inulina tienen siempre un comportamiento pseudoplástico, con mayor viscosidad a mayor concentración de inulina.

La presencia de sales de calcio en la formulación de los sistemas inulina-agua produce un aumento del intervalo viscoelástico lineal, independiente del grupo aniónico. Sin embargo, la evolución de los valores del módulo de almacenamiento y el módulo de pérdidas con la concentración de la sal depende del anión, aumentando con el cloruro y disminuyendo con el lactato. Las diferencias encontradas se han asociado a la diferencia del contenido en calcio por molécula de sal. Estos resultados podrían ser prometedores para el desarrollo de alimentos funcionales en forma de geles de inulina con calcio añadido.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación obtenida a través de los proyectos CTQ2015-71164-P (MINECO) y RTI2018-097 100-B-C21 (MICINN), dentro del programa del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- French, A. D. Recent Advances in the Structural Chemistry of Inulin. In *Inulin and Inulin-containing Crops*; Fuchs, A. B. T.-S. in P. S., Ed.; Elsevier, 1993; Vol. 3, pp 121–127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89369-7.50022-1>.
- Bengoechea, C.; Espinosa, S.; Carrera, C. Caracterización de Emulsiones Prebióticas Estabilizadas Con Inulina y B-Lactoglobulina. *Afinidad* **2019**, *76* (585).
- Beccard, S.; Bernard, J.; Wouters, R.; Gehrich, K.; Zielbauer, B.; Mezger, M.; Vilgis, T. A. Alteration of the Structural Properties of Inulin Gels. *Food Hydrocoll.* **2019**, *89*, 302–310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.06.049>.
- Gibson, G. R.; Roberfroid, M. B. Dietary Modulation of the Human Colonic Microbiota: Introducing the Concept of Prebiotics. *J. Nutr.* **1995**, *125* (6), 1401–1412. <https://doi.org/10.1093/jn/125.6.1401>.
- Roberfroid, M. B.; Delzenne, N. M. DIETARY FRUCTANS. *Annu. Rev. Nutr.* **1998**, *18* (1), 117–143. <https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.18.1.117>.
- Coudray, C.; Bellanger, J.; Castiglia-Delavaud, C.; Rémésy, C.; Vermorel, M.; Rayssiguier, Y. Effect of Soluble or Partly Soluble Dietary Fibres Supplementation on Absorption and Balance of Calcium, Magnesium, Iron and Zinc in Healthy Young Men. *Eur. J. Clin. Nutr.* **1997**, *51* (6), 375–380. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1600417>.
- Coudray, C.; Demigné, C.; Rayssiguier, Y. Effects of Dietary Fibers on Magnesium Absorption in Animals and Humans. *J. Nutr.* **2003**, *133* (1), 1–4. <https://doi.org/10.1093/jn/133.1.1>.
- Berdanier, C. D.; Johnson, B.; Hartle, D. K.; Crowell, W. Life Span Is Shortened in BHE/Cdb Rats Fed a Diet Containing 9% Menhaden Oil and 1% Corn Oil. *J. Nutr.* **1992**, *122* (6), 1309–1317. <https://doi.org/10.1093/jn/122.6.1309>.
- Arcot, J.; Shrestha, A. Folate: Methods of Analysis. *Trends Food Sci. Technol.* **2005**, *16* (6), 253–266. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.03.013>.
- Sirijariyawat, A.; Charoenrein, S. Texture and Pectin Content of Four Frozen Fruits Treated with Calcium. *J. Food Process. Preserv.* **2014**, *38* (3), 1346–1355. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12096>.
- Clark, A. H. Gels and Gelling. *Phys. Chem. foods* **1992**, *7*, 263–305.
- Clark, A. H.; Ross-Murphy, S. B. Structural and Mechanical Properties of Biopolymer Gels. In *Biopolymers*; Springer, 1987; pp 57–192.
- Belitz, H. D.; Grosch, W.; Schieberle, P. Food Chemistry. 2009. *Milk Dairy Prod.* 498–545.
- Guegan, P.; Macosko, C. W.; Ishizone, T.; Hirao, A.; Nakahama, S. Kinetics of Chain Coupling at Melt Interfaces. *Macromolecules* **1994**, *27* (18), 4993–4997. <https://doi.org/10.1021/ma00096a022>.
- Barnes, H. A.; Hutton, J. F.; Walters, K. *An Introduction to Rheology*; Elsevier, 1989.
- Xu, J.-L.; Zhang, J.-C.; Liu, Y.; Sun, H.-J.; Wang, J.-H. Rheological Properties of a Polysaccharide from Floral Mushrooms Cultivated in Huangshan Mountain. *Carbohydr. Polym.* **2016**, *139*, 43–49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.12.011>.
- Shaker, R. R.; Jumah, R. Y.; Abu-Jdayil, B. Rheological Properties of Plain Yogurt during Coagulation Process: Impact of Fat Content and Pre-heat Treatment of Milk. *J. Food Eng.* **2000**, *44* (3), 175–180.
- McClements, D. J. *Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques*; CRC press, 2015.
- Kim, Y.; Faqih, M. N.; Wang, S. S. Factors Affecting Gel Formation of Inulin. *Carbohydr. Polym.* **2001**, *46* (2), 135–145. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00296-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00296-4).
- Tadros, T.; Izquierdo, P.; Esquena, J.; Solans, C. Formation and Stability of Nano-Emulsions. *Adv. Colloid Interface Sci.* **2004**, *108*, 303–318.
- (21) Franck, A. M. E. Inulin and Oligofructose. *LFRA Ingred. Handb. Prebiotics Probiotics. Leatherhead Publ. Surrey* **2000**, 1–18.
- Franck, A. Technological Functionality of Inulin and Oligofructose. *Br. J. Nutr.* **2002**, *87* (S2), S287–S291. <https://doi.org/DOI: 10.1079/BJN/2002550>.
- Koocheki, A.; Taherian, A. R.; Bostan, A. Studies on the Steady Shear Flow Behavior and Functional Properties of Lepidium Perfoliatum Seed Gum. *Food Res. Int.* **2013**, *50* (1), 446–456.
- Relkin, P.; Sourdet, S. Factors Affecting Fat Droplet Aggregation in Whipped Frozen Protein-Stabilized Emulsions. *Food Hydrocoll.* **2005**, *19* (3), 503–511. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2004.10.015>.

25. Dickinson, E.; Euston, S. R.; Woskett, C. M. Competitive Adsorption of Food Macromolecules and Surfactants at the Oil-Water Interface. In *Surfactants and Macromolecules: Self-Assembly at Interfaces and in Bulk*; Springer, 1990; pp 65–75.
26. Bozzi, L.; Milas, M.; Rinaudo, M. Solution and Gel Rheology of a New Polysaccharide Excreted by the Bacterium *Alteromonas* Sp. Strain 1644. *Int. J. Biol. Macromol.* **1996**, *18* (1), 83–91. [https://doi.org/10.1016/0141-8130\(95\)01062-9](https://doi.org/10.1016/0141-8130(95)01062-9).
27. Meng, Y. C.; Hong, L. B.; Jin, J. Q. A Study on the Gelation Properties and Rheological Behavior of Gellan Gum. *Appl. Mech. Mater.* **2013**, 284–287, 20–24. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.20>.