



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DEL PSYLLIUM Y DE LA GOMA XANTANA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Curso: 2018/19

Alumno: Gisele Marcondes Luz

Tutor: Manuel Gómez Pallarés

Tutor externo: Mayara Lopes da Silva Belorio

Máster en Calidad, Desarrollo e Innovación de Alimentos
E.T.S. Ingenierías Agrarias, Campus de la Yutera (Palencia)
Universidad de Valladolid

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVO.....	5
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	5
3.1. Materiales	5
3.2. Métodos.....	6
3.2.1. Propiedades de Hidratación	6
3.2.2. Comportamiento Viscoso.....	7
3.2.3. Propiedades Reológicas.....	8
3.2.4. Textura y color del gel	8
3.2.5. Análisis Estadístico.....	9
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	9
4.1. Propiedades de Hidratación.....	9
4.2. Comportamiento Viscoso	12
4.3. Propiedades Reológicas	16
4.4. Textura y color del gel.....	18
5. CONCLUSIONES	22
6. AGRADECIMIENTOS.....	22
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23

RESUMEN

Las combinaciones de almidón con hidrocoloides han sido ampliamente estudiadas en diferentes enfoques y usadas en la industria de alimentos a fin de mejorar el desempeño de procesos, diversificar las aplicaciones, modificar las propiedades reológicas, entre otros. En este trabajo se busca evaluar las propiedades de hidratación de mezclas de almidón de maíz con psyllium (PSY) y goma xantana (XAN), los parámetros de viscosidad y reología de las pastas y la textura y el color de los geles obtenidos con estas combinaciones de almidón e hidrocoloides en distintos niveles de sustitución del almidón (2, 5, 10, 100%). El psyllium y la goma xantana incrementan las propiedades de hidratación, tanto en frío como tras calentamiento, de forma similar. En el análisis RVA se observa que el psyllium incrementa la viscosidad de las pastas tras la gelatinización, especialmente al 10%, mientras que la goma xantana apenas afecta a la viscosidad. Ambos productos incrementan los valores de G'' y $\tan \delta$ de manera similar. En cuanto al color, en los geles obtenidos se observa que la inclusión de xantana y psyllium en general reducen la dureza de los mismos y hasta el 10% apenas afectan al color, pero en el caso del psyllium los valores de b^* son menos negativos.

Palabras clave:

Hidrocoloides, almidón, psyllium, goma xantana y propiedades funcionales

ABSTRACT

The combinations of starch with hydrocolloids have been widely studied in different approaches and used in the food industry to improve the performance of processes, diversify applications, modify the rheological properties, among others. In this work we seek to evaluate the hydration properties of mixtures of corn starch with psyllium (PSY) and xanthan gum (XAN), the parameters of viscosity and rheology of the pastes and the texture and color of the gels obtained with these combinations of starch and hydrocolloids at different levels of starch substitution (2, 5, 10, 100%). Psyllium and xanthan gum increase the hydration properties, both in cold and after heating, in a similar way. In the RVA analysis it is observed that psyllium increases the viscosity of the pastes after gelatinization, especially at 10%, while xanthan gum hardly affects the viscosity. Both products increase the values of G'' and $\tan \delta$ in a similar way. Regarding the color, in the gels obtained it is observed that the inclusion of xanthan and psyllium in general reduce the hardness of them and up to 10% hardly affect the color, but in the case of psyllium the values of b^* are less negative.

Keywords:

Hydrocolloids, starch, psyllium, xanthan gum and functional properties

1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda por alimentos seguros y saludables, así como estrategias innovadoras en su dinámica de producción ha evolucionado rápidamente durante las últimas décadas (Silva, Sereno y Sobral, 2017). Conociendo la importancia en atender la demanda de la sociedad y del mercado actual, así como también las nuevas tendencias, ocurre un aumento tanto del conocimiento científico de campo como en la industria alimentaria, en que se permite desarrollos utilizando ingredientes o aditivos diferentes a los tradicionales, revelando nuevas oportunidades (Saguy, Singh, Johnson y Fryer, 2013; Santeramo et. al, 2018).

Entre estos ingredientes destacan los hidrocoloideos, que en su gran mayoría reúnen propiedades tecnológicas capaces de solucionar deficiencias, ayudar en la mejora o a llevar nuevos atributos a los alimentos, pero su aplicación de manera aislada en los productos todavía es muy difícil para obtener todos los efectos deseados (Wang et al., 2017). El nombre “hidrocoloide” o goma se refiere al polímero de cadena larga, obtenido a partir de diferentes fuentes como extractos de plantas o algas marinas, harinas de semillas o granos, microorganismos, biopolímeros modificados a través de la adaptación química o enzimática del almidón y celulosa y de otros productos naturales (Mikus, Valík y Dodok, 2011; Milani y Maleki, 2012).

Debido a las condiciones de formación y obtención, tiene una variedad de estructuras diferentes (ramificación, flexibilidad, peso molecular y carga iónica), como por ejemplo las condiciones de crecimiento de las plantas en el caso de los polisacáridos naturales, y que influyen en su comportamiento y en la reología de sus soluciones (BeMiller, 2011). Es caracterizado por su propiedad de formar geles y/o soluciones viscosas a través de dispersiones intermedias entre una solución verdadera y una suspensión cuando entran en contacto con el agua, por el gran número de grupos hidroxilos presentes que aumenta esa afinidad convirtiéndolos en compuestos hidrófilos (Milani y Maleki, 2012).

Cada hidrocoloide tiene funcionalidades diferentes dependiendo de su origen, de las condiciones de obtención, del método de procesado o de los ingredientes a que se los combinan. Estas funcionalidades están relacionadas con las propiedades fisicoquímicas como el comportamiento reológico, capacidad de retención de agua y consecuente hinchazón, la susceptibilidad a la degradación o fermentación bacteriana y la fácil solubilización (Rosell, Santos y Collar, 2009).

Estudio de las propiedades funcionales del psyllium y de la goma xantana

Los hidrocoloides son muy utilizados como aditivos para realizar propósitos específicos, con sabor y aromas neutros, valor energético mínimo o nulo, además de una amplia gama de propiedades funcionales en los alimentos como espesantes, estabilizantes (emulsiones y espumas), gelificantes, agentes de recubrimiento, sustitutos de grasas y gluten, modificación en la gelatinización del almidón y otros (Chenlo, Moreira, Pereira y Silva, 2009). En sistemas alimentarios compuestos por harinas, principalmente la de trigo y almidón, participa de procesos básicos en la fabricación de alimentos como la gelatinización y la gelificación (Rojas, Rosell y Barber, 1999).

La viscosidad con la capacidad de modificación de la reología del sistema alimentario es la principal razón o efecto de su amplio uso y sus propiedades se ven afectadas por la concentración, el grado de dispersión, el tamaño de las partículas y moléculas, las direcciones y asociación de las moléculas (Milani y Maleki, 2012). En los geles, la red tridimensional ocurre a través de entrelazamientos y enlaces de cadenas de polímeros, siendo este mecanismo variable de acuerdo con los parámetros por los cuales el proceso fue sometido, que puede implicar una jerarquía de estructuras como la agregación de enlaces de cadenas primarias en “zonas de unión” (Saha y Bhattacharya, 2010; Milani y Maleki, 2012).

La goma xantana, es un polisacárido extracelular aniónico producido por microorganismos, más específicamente la bacteria fitopatógena *Xanthomonas campestris* en el proceso de infección y muerte de las muchas especies de crucíferas (Casas, 2016). Su estructura es compuesta por un esqueleto celulósico de unidades de D-glucosa unidas en β (1 \rightarrow 4) sustituidas en residuos de glucosa alternativos con una cadena lateral de trisacárido de dos unidades de manosa. (Achayuthakan y Suphantharika, 2008).

Se caracteriza como un sólido de flujo libre, de color blanco-crema, soluble tanto en agua fría como caliente, de alto peso molecular ($M = 2,5 \times 10^6$ g/mol), de alta viscosidad y de estabilidad independiente del pH. Es compatible y estable en presencia de diferentes compuestos como ácidos orgánicos, sales y compuestos químicos de pH alcalino incluyendo el hidróxido de amonio y tiene efecto sinérgico a baja concentración con goma guar, garrofín y konjak (Casas, 2016).

Debido a sus propiedades, la goma xantana es empleada como espesante, estabilizante y emulsificante o como medio de suspensión debido a su alto valor de rendimiento para desarrollar productos de panadería y rellenos (sin gluten o ricos en proteínas), postres y productos lácteos, pasteles, estabilizar emulsiones

(principalmente aceite/agua) y mejorar la estabilidad de la masa congelada (Makri y Doxastakis, 2006; Matuda, Chevallier, Filho, Lebail y Tadini, 2008). También puede ayudar a prolongar la vida útil del producto de panadería debido a la inhibición de la interacción gluten-almidón y la menor pérdida de humedad de la miga (Guarda, Rosell, Benedito y Galotto, 2004).

Las soluciones de goma xantana son muy viscosas y se caracterizan por ser altamente pseudoplásticas, donde la viscosidad aparente disminuye radicalmente con el aumento de la velocidad de cizalla y puede formar geles termorreversibles cuando se mezcla con ciertos galactomananos (por ejemplo, goma de algarroba) o glucomanano de konjac (Mikus, Valík y Dodok, 2011; Casas, 2016).

Entre los diferentes tipos de hidrocoloides naturales, hay un grupo de gomas denominadas mucílagos que son polisacáridos muy viscosos extraídos de semillas o tallos blandos de plantas. Su elevado uso en ciertos productos alimenticios es debido a las propiedades funcionales (viscosidad, gelificación, unión al agua) y el papel bioactivo en la prevención y/o tratamiento de ciertas enfermedades, siendo el psyllium (de la especie *Plantago*) uno de los ejemplos (Milani y Maleki, 2012).

El psyllium es un término utilizado para la corteza, la semilla y toda la planta que es una hierba anual perteneciente a la familia *Plantaginaceae* (*Plantago psyllium* L.) con casi 200 especies en todo el mundo. Es encontrado con mayor abundancia en general en India, Punjab, Pakistán, Irán y las Islas Canarias, siendo India el mayor productor, vendedor y exportador más destacado de la semilla (Hojjatoleslami, Raisi, Asadi, Mohammadian y Samanian, 2013).

La estructura del psyllium es compatible con una estructura compuesta por una cadena principal densamente sustituida de residuos de D-xilopiranosilo con enlaces β (1 \rightarrow 4) que pueden aportar cadenas laterales de xilopiranosilo individuales en la posición 2 o en la posición 3, ramas de trisacáridos que tenían la secuencia I-Araf- α -(1 \rightarrow 3)-D-Xyl ρ - β -(1 \rightarrow 3)-I-Araf (Thakur y Thakur, 2014). La harina obtenida a través de la cáscara es un material fibroso, de color blanco e hidrófilo que a través de la absorción de agua forma un gel transparente, incoloro y mucilaginoso con aumento del volumen en diez veces o más (Al-Assaf et al., 2003).

La cáscara del psyllium es la piel más externa de la semilla que se elimina mediante un proceso mecánico con recuperación total de alrededor del 25 al 26%, teniendo una vida útil de solo 6 meses en condiciones de almacenamiento ordinarias y tradicionales (Verma y Mogra, 2013). Su contenido nutricional corresponde a 0,94% de proteínas,

Estudio de las propiedades funcionales del psyllium y de la goma xantana

4,07% de cenizas y 84,98% de los carbohidratos totales y el fraccionamiento de Osborne (basado en la solubilidad) produjo albúmina 35,8%, globulina 23,9% y prolamina 11,7% (Guo, Cui, Wang y Young, 2008).

Las propiedades de gelificación de los polisacáridos convierten el psyllium en una buena opción de uso en muchos campos, principalmente en las industrias farmacéutica y alimentaria (Hojjatoleslami, Raisi, Asadi, Mohammadian y Samanian, 2013). Su incorporación en fórmulas de alimentos y bebidas, en suplementos dietéticos y otros productos de consumo al nivel requerido para los efectos en la salud, encuentra desafíos por la acción de sus propiedades fisicoquímicas en sistemas acuosos, como el desarrollo de una alta viscosidad y su fuerte capacidad de gelificación (Liu et al., 2010).

Debido al tamaño fino de las partículas y la incapacidad en la penetración del agua por su rápida hidratación e hinchazón de la superficie, la harina de psyllium puro resiste a la humectación en alimentos o bebidas acuosas. La dilución tal vez sea posible cuando se utiliza las partículas en conjunto con grandes cantidades de materiales altamente solubles o polímeros dispersables en agua, como la sacarosa por ejemplo (Powell, Patel y Minn, 1982). Tras una agitación vigorosa, la dispersión de las partículas resulta en un material de característica grumosa, formado por grumos que contienen polvos secos en su interior mismo mojados en la superficie exterior y recubiertos de gel. Además, estos grumos tienden a flotar en la superficie del agua, convirtiendo el producto en una grande masa (Sander y Hayfield, 2001).

El conocimiento de las propiedades fisicoquímicas del psyllium es demasiado escaso para explicar su comportamiento en los sistemas acuosos y en el mecanismo de construcción del gel, todavía la creciente demanda de investigaciones en este campo posibilitan lograr una comprensión adecuada de cómo usarlo de manera eficiente (Guo, Cui, Wang, Goff y Smith, 2009).

Las combinaciones de harina/almidón con los hidrocoloides han sido ampliamente estudiadas en diferentes enfoques y usadas en la industria de alimentos desde los años 1950 (Casas-Alencáster y Pardo-García, 2005). Son utilizadas para mejorar el desempeño de procesos, la diversificación de aplicaciones, modificar las propiedades reológicas de los polímeros de proteínas como el gluten y más actualmente proporcionan el etiquetado “clean label” o etiqueta limpia, por evitar el uso de términos como almidón alimentario modificado (Rosell y Foegeding, 2007; BeMiller, 2011).

El almidón es un polisacárido vegetal de almacenamiento constituido por dos glucanos, la amilosa y la amilopectina. La amilosa es formada por unidades de glucosa unidas por enlaces α (1 \rightarrow 4) que originan una cadena lineal y la amilopectina es formada por unidades de glucosa unidas en enlaces α (1 \rightarrow 4) y α (1 \rightarrow 6) de estructura ramificada (Matta Júnior, 2015). Su origen es a partir de cereales (trigo, arroz y maíz) y tubérculos (patata, mandioca), además de otras fuentes como guisantes, lentejas, sorgo.

El almidón tiene una amplia gama de aplicaciones en los más diversos segmentos, como la industria alimentaria, química, farmacéutica, papelera, de construcción civil, textil, petrolera y muchas otras. En la industria alimentaria es lo más utilizado pues confiere funcionalidades distintas a los alimentos como viscosidad, cremosidad, estabilidad, adhesividad y formación de películas. Sus inúmeras aplicaciones están en los productos cárnicos, bebidas, sopas, salsas, lácteos y en panadería, bollería y pastelería, como ingrediente de diversos productos sin gluten, por ejemplo (Cargill, 2015).

La utilización del almidón con los hidrocoloides es más frecuente, pues se trata de un producto relativamente barato, abundante, no imparte ningún sabor notable o extraño en bajas concentraciones y es un ingrediente común de muchos alimentos, siendo cierto su uso con diferentes tipos de gomas (Saha y Bhattacharya, 2010). Almidones nativos generalmente no son utilizados debido a sus propiedades no ideales en los procesos, siendo algunas veces modificados químicamente o mezclado a hidrocoloides adecuados para superar las deficiencias encontradas (BeMiller, 2011).

2. OBJETIVO

El objetivo del presente estudio fue evaluar las diferentes propiedades de hidratación de mezclas de almidón de maíz con psyllium (PSY) y goma xantana (XAN), así como los parámetros de viscosidad y reología de las pastas y la textura y el color de los geles obtenidos con estas combinaciones de almidón e hidrocoloides. Para ello, se emplearon distintos niveles de sustitución del almidón (2, 5, 10, 100%).

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Materiales

Para la realización de los ensayos, se han empleado los siguientes materiales: almidón de maíz (Tereos, Syral Iberia SAU, Zaragoza, España), psyllium Vitacel P95

(Rettenmaier Iberica, Barcelona, España), goma xantana (Roko, Galicia, España) y agua destilada.

3.2. Métodos

3.2.1. Propiedades de Hidratación

En las propiedades de hidratación fueron evaluados los parámetros de capacidad de retención de agua en reposo (WHC), el volumen de hinchamiento (SV), la capacidad de retención de agua tras centrifugación (WBC), el índice de absorción de agua tras un calentamiento (WAI) y la estabilidad tras congelación y descongelación (FTS). Todos los ensayos de las propiedades de hidratación fueron llevados a cabo empleándose el 100% almidón como control y combinaciones de almidón con psyllium o goma xantana, en diferentes proporciones. Fue utilizada una muestra de cada concentración de psyllium o goma xantana en dos repeticiones.

La WHC fue determinada a partir de una suspensión control de 5 g ($\pm 0,1$ g) de almidón en 100 mL de agua destilada y sustitución del almidón por psyllium o goma xantana en niveles de 2, 5, 10 y 100%, por un período de reposo de 24 horas en temperatura ambiente. Con el peso de la muestra hidratada tras retirar el exceso de agua (W_f) y el peso de la muestra inicial seca (W_0), el resultado final fue obtenido a través de la Fórmula 1. El SV fue determinado por el volumen ocupado por la muestra hidratada en la probeta (V_f) y el peso de la muestra inicial seca (W_0) del análisis de WHC, utilizando la Fórmula 2.

$$\text{Fórmula 1: } \text{WHC} = \frac{W_f - W_0}{W_0} [=] \frac{g}{g_0}$$

$$\text{Fórmula 2: } \text{SV} = \frac{V_f}{W_0} [=] \frac{mL}{g}$$

La WBC fue determinada a partir de una suspensión control de 5 g ($\pm 0,1$ g) de almidón en 25 mL de agua destilada y sustitución del almidón por psyllium o goma xantana en los niveles de 2, 5, 10 y 100%. Las muestras fueron centrifugadas a una velocidad de 2000 rpm por 10 minutos en centrifuga (Bunsen Koch 1460, Madrid, España). El peso de la muestra hidratada tras retirar el exceso de agua (W_f) y el peso de la muestra inicial seca (W_0) fueron apuntados a fin de calcular la WBC a través de la Fórmula 3.

$$\text{Fórmula 3: } \text{WBC} = \frac{W_f - W_0}{W_0} [=] \frac{g}{g_0}$$

El WAI fue realizado dispersando 2,5 g de almidón en 30 mL de agua destilada como muestra control y sustitución del almidón por psyllium o goma xantana en los niveles de 2, 5, 10 y 100%. Las muestras fueron centrifugadas a una velocidad de 600 rpm,

empleándose un calentamiento (90 °C) por 15 minutos en centrífuga (Eppendorf ThermoMixer C, Hamburgo, Alemania). Terminado el tiempo de centrifugación, las muestras fueron inmediatamente transferidas para la centrífuga (Bunsen Koch 1460, Madrid, España) donde fueron centrifugadas a una velocidad de 3000 rpm por 10 minutos, sin calentamiento. El peso de la muestra final hidratada tras retirar el exceso de agua (W_f) y el peso de la muestra inicial seca (W_0) fueron obtenidos para el cálculo de la WAI empleándose la Fórmula 4.

Fórmula 4:
$$WAI = \frac{W_f - W_0}{W_0} [=] \frac{g}{g_0}$$

La determinación de la FTS fue realizada inicialmente de acuerdo con el proceso de la WBC. Las muestras fueron centrifugadas a una velocidad de 2000 rpm por 10 minutos en centrífuga (Bunsen Koch 1460, Madrid, España), congeladas a -20 °C durante 24 horas y tras el periodo de congelación, fueron descongeladas en temperatura ambiente por 2 horas antes de una nueva centrifugación a una velocidad de 2000 rpm por 10 minutos. El peso de la muestra hidratada tras retirar el exceso de agua (W_f) y el peso de la muestra inicial seca (W_0), el resultado final fue obtenido a través de la Fórmula 5.

Fórmula 5:
$$FTS = \frac{W_f - W_0}{W_0} [=] \frac{g}{g_0}$$

3.2.2. Comportamiento Viscoso

El comportamiento viscoso de las muestras de almidón 100% (control) almidón-psyllium y almidón-goma xantana en diferentes niveles de sustitución fue determinado utilizando el Rapid Visco Analyser (modelo RVA-4C, Newport Scientific Pty. Ltd., Warriewood, Australia). Fueron utilizados 3,5 g ($\pm 0,1$ g) de muestra en 25 g ($\pm 0,1$ g) de agua destilada. Para la muestra control, el almidón y el agua fueron pesados en el mismo recipiente de aluminio, mezclados manualmente utilizando paletas de plástico durante algunos segundos e inmediatamente puestos al ensayo en el equipo. Para las concentraciones de 2, 5 y 10%, los hidrocoloides fueron pesados en recipientes de aluminio separados del agua y mezclados vertiendo el polvo sobre el líquido con agitación manual. La mezcla tuvo un tiempo de hidratación de 30 minutos en reposo antes de añadir la cantidad de almidón correspondiente y ser puesta en el equipo para el ensayo. Con la concentración de 100% no fue posible la realización del ensayo, debido a la consistencia del gel.

En el ensayo, las muestras fueron sometidas a un ciclo térmico con las siguientes características: temperatura de 50 °C durante 1 minuto con un incremento a 95 °C a

una velocidad de 12 °C/minutos, manteniendo esta temperatura durante 2,5 minutos, posterior enfriamiento a 30 °C a una velocidad de -12 °C/minutos y durante 2 minutos. La velocidad de rotación de la pala se mantuvo a 160 rpm durante todo el experimento, a excepción de los primeros 10 segundos, con el objetivo de alcanzar la homogeneización de la muestra, y la velocidad empleada fue de 960 rpm. Las pruebas fueron realizadas con el almidón como control y una muestra de cada concentración de psyllium o goma xantana en dos repeticiones.

3.2.3. Propiedades Reológicas

Las propiedades dinámicas viscoelásticas y de flujo constante de los geles obtenidos del RVA fueron analizadas en un reómetro de esfuerzo controlado Thermo Scientific Haake RheoStress 1 (Thermo Fischer Scientific, Schevert, Alemania). El análisis de oscilatorio fue realizado utilizando platos de titanio paralelos (PP60Ti) con 3 mm de separación entre ellos y de superficie rugosa, donde las muestras estabilizadas a 50 °C fueron cubiertas con vaselina Panreac (Panreac Química SA, Castellar del Vallés, España).

Tras un periodo de estabilización de 500 segundos, se realizaron las mediciones viscoelásticas dinámicas: barridos de deformación a una frecuencia constante (1 Hz) para determinar la deformación máxima alcanzable por la muestra en un rango de tensiones variables, y barridos de frecuencia en un rango de 0.01–100 Hz a una deformación constante dentro del rango viscoelástico lineal, obteniendo los valores del módulo elástico o de almacenamiento (G'), del módulo viscoso o de pérdida (G'') y del factor de pérdida ($\tan \delta = G''/G'$) en función de la frecuencia (ω). Las medidas reológicas se evaluaron en duplicado tanto para el control cuanto para las diferentes concentraciones de psyllium e goma xantana, excluyendo la concentración de 100% pues debido a la consistencia del gel no fue posible realizar los ensayos.

3.2.4. Textura y color del gel

Las medidas de textura y color fueron realizadas en dos repeticiones, según el procedimiento realizado en el análisis del comportamiento viscoso. Los geles obtenidos en el RVA, todavía calientes fueron vertidos en recipientes de plástico cilíndricos de 100 mm de diámetro interno y 20 mm de altura y sometidos a un enfriamiento en frigorífico a 4 °C durante 24 horas. Tras las 24 horas de enfriamiento, los geles fueron mantenidos a la temperatura ambiente por 1 hora para posterior realización de los análisis de textura.

La determinación de las medidas de textura fueron evaluadas a temperatura ambiente mediante la utilización de un texturómetro TA.XT2i Texture Analyzer (Stable Micro Systems Ltd., Surrey, Reino Unido) y equipado con el software Texture Expert versión 1 para Windows. Una carga de 5 kg fue empleada para la calibración de la fuerza, una sonda cilíndrica de 50 mm de diámetro en un ciclo de compresión a una velocidad constante de 10 mm s^{-1} hasta una profundidad de muestra de 10 mm, seguido de un retorno a la posición original. Del análisis se obtiene una curva fuerza-tiempo que se obtiene la dureza que es la fuerza necesaria para alcanzar determinada deformación (pico de fuerza tras la compresión) y la pendiente (N/mm) que es la relación de la fuerza con la distancia obtenida en la gráfica. Las medidas no fueron realizadas para la concentración de 100% pues debido a la alta viscosidad del gel, no fue posible obtener una muestra homogénea como las demás, para similar evaluación en el texturómetro.

El color de los geles fue obtenido a través del espectrofotómetro Minolta CN-508i (Minolta Co., Ltd, Osaka, Japón), utilizando el iluminante estándar D65 con el observador estándar de 2° . Los resultados se expresaron en el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$, donde el parámetro L^* representa la luminosidad y a^* y b^* las coordenadas cromáticas.

3.2.5. Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizó con el software Statgraphics 18 (Statpoint Technologies, Inc., Warrenton, EE. UU.). Las diferencias entre los parámetros de los geles fueron estudiadas mediante análisis de varianza (ANOVA de una vía) y la diferencia mínima significativa por el método de Fisher (LSD), que se utilizó para describir las medias con intervalos de confianza del 95%.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Propiedades de Hidratación

Los resultados obtenidos para las propiedades de hidratación de las mezclas de almidón e hidrocoloides se muestran en la Tabla 1.

Evaluando de manera aislada los resultados para las muestras con hidrocoloides 100%, no hubo diferencias significativas del psyllium frente a la goma xantana en los ensayos de la WHC, de la WBC, de la FTS y del WAI, pero si en el SV donde el psyllium presentó un volumen de hinchamiento mayor que la xantana. Colliopoulos, Paul y Young (1984) explican que por la alta capacidad de hinchamiento del psyllium,

cuando se mezcla en agua debido a los arabinosilanos presentes en su composición, el hidrocoloide tiene una tendencia a flotar en la superficie del agua, permitiendo que sus partículas parcialmente disueltas se aglomeren en grandes masas resultando en un aumento del volumen. En comparación con la muestra control (almidón 100%), los hidrocoloides (100% psyllium o 100% goma xantana) presentaron resultados mayores en todas las propiedades de hidratación.

Tabla 1. Propiedades de hidratación del psyllium y de la goma xantana.

Muestra	WHC (g agua/g sólido)	SV (mL/g)	WBC (g agua/g sólido)	WAI (g agua/g sólido)	FTS (g agua/g sólido)
Control	0,90 ± 0,16 a	1,60 ± 0,00 a	0,75 ± 0,01 a	5,13 ± 0,04 b	0,81 ± 0,01 a
PSY 2%	1,49 ± 0,15 b	2,80 ± 0,01 b	1,51 ± 0,01 b	6,23 ± 0,04 c	1,58 ± 0,00 b
PSY 5%	1,79 ± 0,02 bc	3,19 ± 0,00 c	2,73 ± 0,01 c	5,21 ± 0,07 b	2,59 ± 0,07 c
PSY 10%	1,63 ± 0,10 b	3,20 ± 0,00 c	3,96 ± 0,07 e	7,08 ± 0,04 d	4,37 ± 0,31 d
PSY 100%	3,42 ± 0,06 d	5,20 ± 0,01 e	4,82 ± 0,01 f	11,99 ± 0,02 e	4,92 ± 0,06 e
XAN 2%	1,81 ± 0,01 bc	2,80 ± 0,01 b	1,41 ± 0,16 b	2,59 ± 0,88 a	1,57 ± 0,33 b
XAN 5%	2,08 ± 0,16 c	3,20 ± 0,01 c	3,07 ± 0,32 d	2,73 ± 0,06 a	2,92 ± 0,23 c
XAN 10%	2,12 ± 0,16 c	3,20 ± 0,01 c	5,00 ± 0,00 f	11,98 ± 0,01 e	4,94 ± 0,07 e
XAN 100%	3,64 ± 0,38 d	4,00 ± 0,00 d	4,98 ± 0,01 f	11,99 ± 0,01 e	4,99 ± 0,01 e

Valores medios ± SD (desviación estándar) seguidos por la misma letra en cada columna no fueron significativamente diferentes con un $p \leq 0,05$. PSY (Psyllium), XAN (goma xantana), WHC (Capacidad de retención de agua), SV (Volumen de hinchamiento), WBC (Capacidad de unión al agua), WAI (Índice de absorción de agua), y FTS (Estabilidad de congelación y descongelación).

La presencia del hidrocoloide también incrementó todas las propiedades de hidratación para las distintas combinaciones con almidón, cuando comparado con los valores obtenidos para el control y para prácticamente todas las proporciones empleadas. Se observa que en el ensayo del WAI a medida que aumenta el contenido de los hidrocoloides, principalmente el psyllium, hubo una tendencia al incremento de los valores frente al control, con excepción del 5% psyllium, que no presentó diferencia significativa respecto al control y las concentraciones de 2 y 5% de goma xantana que resultaron en valores más bajos que el control.

La adición de hidrocoloides puede mejorar la absorción de agua y consecuente aumento en la hinchazón y descomposición de los gránulos y en la cantidad de material exudado en la fase continua, pues contribuye con el aumento considerable de las fuerzas de cizallamiento ejercidas sobre los gránulos hinchados en la fase de agitación de una suspensión de almidón-agua (Christianson, Hodge, Osborne y Detroy, 1981).

Los niveles de 2 y 5% de goma xantana en el ensayo del WAI provocaron una disminución de la absorción del agua frente al control, mostrando que en bajos niveles

de sustitución del almidón por la xantana, la pequeña cantidad de la goma no es suficiente para incrementar la absorción del agua tras el calentamiento. Después de las etapas de calentamiento y centrifugación de las muestras, no fue posible separar el sobrenadante de los sólidos pues ha formado una mezcla viscosa. Por esta razón, la mezcla viscosa fue transferida para un recipiente de porcelana y seca en estufa a 130 °C por 24 horas para posterior pesaje de los sedimentos tras la evaporación del líquido y así determinar los resultados. Por lo tanto, el WAI fue medido indirectamente y los resultados pueden no reflejar la realidad del comportamiento de la absorción de agua por el almidón-goma xantana en estos niveles.

Cuando se comparan los dos hidrocoloides al nivel de sustitución del 100%, ellos solo presentan diferencias significativas en el parámetro de SV, donde el psyllium presenta un incremento de 23% respecto a la xantana. En la WHC, no hubo diferencias significativas con el empleo de 2% o 5% de los hidrocoloides al almidón, la utilización de goma xantana al 10% ha producido un efecto mayor en la retención de agua en el sistema frente al mismo porcentaje utilizado con el psyllium. En la WBC, las diferencias entre los hidrocoloides ocurrieron en los niveles de 5 y 10%, donde la goma xantana presentó un efecto 11% mayor frente al psyllium. En el WAI, la combinación del psyllium con el almidón tuvo un mayor incremento con los niveles de 2 y 10%, cuando comparados a los mismos porcentajes de goma xantana y al 10% el efecto fue 41% mayor que del psyllium y ninguna diferencia significativa fue observada entre ellos a los 100%.

En el estudio de Gularte y Rosell (2011), la presencia de diversos hidrocoloides agregados a diferentes niveles (1, 2, 3, y 4%) en almidones de maíz y patata indujeron el aumento de la hinchazón de sus gránulos, siendo que la goma guar y la goma xantana mostraron mayor efecto mismo a bajas concentraciones. La WHC también obtuvo los mejores resultados con estos dos hidrocoloides, donde la adición del 1% ha producido un aumento de 49 y 72% con la goma guar y la goma xantana, respetivamente, en el almidón de maíz. Con la adición del 2% de psyllium en almidón de maíz, Aprodu y Banu (2015) encontraron mayores valores para la WBC del psyllium frente a la fibra de pera y la avena, además de la capacidad de formación de geles. Así también ocurrió en el estudio de Cappa, Lucisano y Mariotti (2013) a una concentración del 0,4% de psyllium.

La FTS aumentó tanto para el psyllium cuanto para la goma xantana, hasta el porcentaje de 100% donde la xantana incrementa más que el psyllium. En bajas sustituciones del almidón por estos hidrocoloides la FTS fue más pequeña, pero mayor

en comparación al control. En el trabajo de Ferrero, Martino y Zaritzky (1993), la adición de goma xantana a los geles de harina de trigo y almidón de maíz ha disminuido la formación de sinéresis y evitó el desarrollo de una estructura esponjosa del gel relacionado con la retrogradación de la amilosa lixiviada tras la congelación, fato este también reportado por Christianson (1982). La goma xantana también presentó una disminución sobre la sinéresis y ayudo a prevenir cambios de textura en los geles de almidón de boniatos, tras el almacenamiento a la temperatura de 4°C con su uso a un nivel del 0,5% (Mali et al., 2003). En el nuestro trabajo solo fue empleado el almidón, así que no es posible esperar que los hidrocoloides tengan el mismo efecto cuando evaluados en una combinación harina/almidón, que pude retener más agua que el almidón solo.

Durante la congelación de un gel, en su matriz ocurre la creación de regiones ricas en almidón y con un contenido de agua que permanece parcialmente descongelada. El agua se cambia a cristales de hielo que forman una fase separada de los filamentos gruesos de almidón de la matriz. En la descongelación, el hielo se transforma nuevamente en agua que puede ser liberado fácilmente de la red polimérica, ocurriendo el fenómeno de sinéresis que deja el gel de almidón en forma de esponja (Ferrero, Martino y Zaritzky, 1994). El incremento de hidrocoloides al almidón minimiza el daño por congelación y descongelación en los geles pues se encuentran disueltos en la fase continua, reduciendo la reasociación de las moléculas de almidón y el agua disponible para formar cristales de hielo, así el daño de la red es menor y con menos sinéresis (Pongsawatmanit y Srijunthongsiri, 2008).

4.2. Comportamiento Viscoso

Los resultados del comportamiento viscoso de las muestras analizadas se muestran en las gráficas de la Figura 1.

El análisis del comportamiento viscoso es realizado a través de la interpretación de los parámetros obtenidos en grafica tras el ensayo de calentamiento/enfriamiento de la muestra en el equipo RVA (Figura 2).

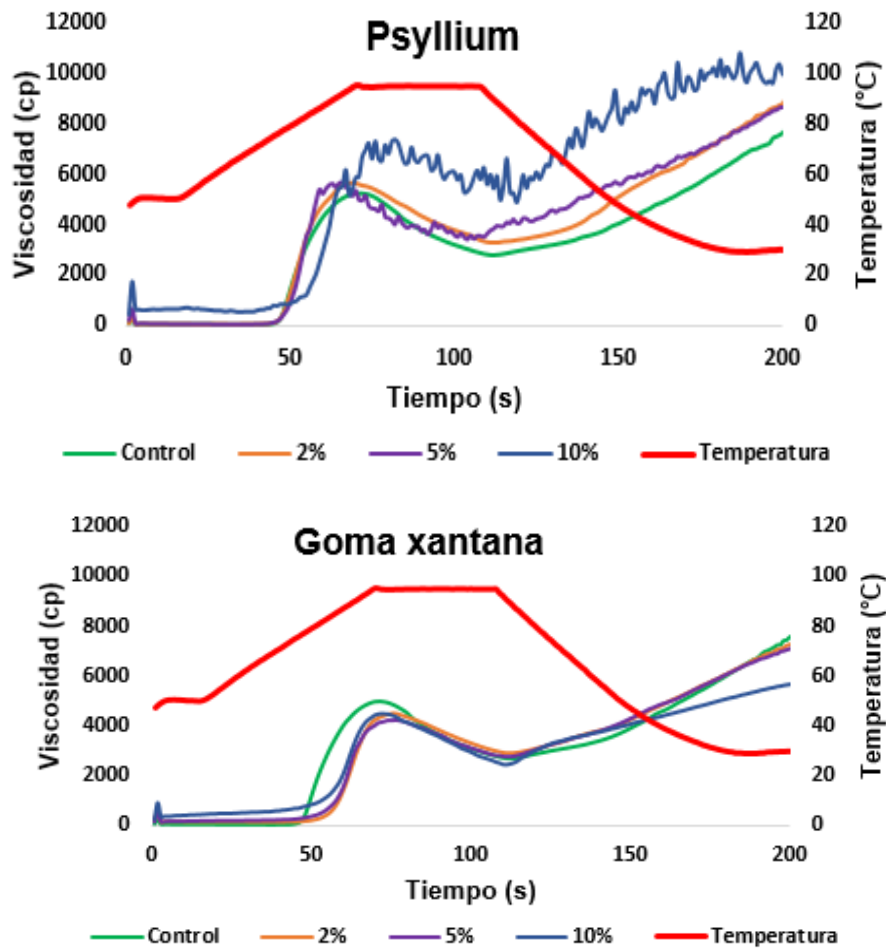


Figura 1. Comportamiento viscoso de muestras de almidón, psyllium, goma xantana y las diferentes combinaciones.

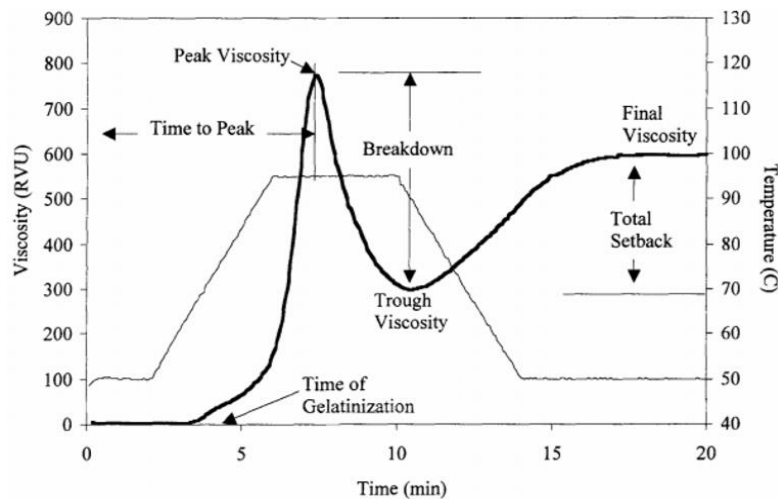


Figura 2. Parámetros del comportamiento viscoso en el RVA. Time of gelatinization (tiempo del inicio de la gelatinización), Time to Peak (tiempo necesario para alcanzar viscosidad máxima), Peak viscosity (pico de viscosidad máxima), Trough Viscosity (viscosidad de caída), Breakdown (rotura), Final viscosity (viscosidad final) y Total Setback (retrogradación total). Fuente: Higley, Love, Price, Nelson y Huber (2003).

Para los geles de psyllium, es posible observar que los niveles de 2 y 5% frente al control comparten el mismo tiempo y temperatura de gelatinización, han tenido un pico de viscosidad máxima próximos y presentaron un comportamiento similar en la retrogradación total, en la viscosidad de caída y la viscosidad final, pero con mayores valores. Cuanto al 10%, tanto el inicio de la gelatinización como la viscosidad máxima fueron realizados en tiempo y temperaturas más altas, siendo la adición del hidrocoloide la responsable por un aumento significativo de la viscosidad máxima y final, así como la retrogradación total frente al control.

Entre los niveles de sustitución del psyllium, la curva del comportamiento viscoso es muy similar en todos los parámetros del 2 al 5%, con una pequeña diferencia en el tiempo de la viscosidad de caída que fue más temprano al 5%. Ya al 10%, presentó una curva totalmente diferente frente a los demás niveles. Al realizar el ensayo, con el aumento de la concentración del psyllium, se observó que la viscosidad de la muestra aumentaba mismo antes de iniciar el ensayo, lo que pude justificar los ruidos (picos y bajadas) en la gráfica.

Para los geles de goma xantana, los niveles de 2, 5 y 10% frente al control presentaron un tiempo del inicio de la gelatinización más tardío y un pico de viscosidad máxima un poco más bajo. Los mismos resultados fueron observados en el trabajo de Lee, Baek, Cha, Park y Lim (2002) adicionando 0,6% de goma xantana al almidón de patata. La viscosidad de caída para los tres niveles fue relativamente similar y más temprana con relación al control y la adición del 10%, provocó una disminución de la viscosidad final, mientras que al 2 y 5% los resultados fueron muy similares al control. La adición de las tres concentraciones al almidón proporcionó el mismo comportamiento viscoso en casi toda la curva, pero al 10% la temperatura de gelatinización fue mayor y hubo una disminución de la retrogradación total y la viscosidad final.

Haciendo una comparación entre los dos hidrocoloides, es posible observar que el psyllium al 2% presenta una curva del comportamiento viscoso más significativo que la goma xantana para la misma concentración, así como para los otros dos niveles, pero la retrogradación y la viscosidad final de ambos al 2 y 5% es similar. Al 10%, el psyllium obtuvo una viscosidad muy alta y expresiva frente a la goma xantana, incluso las demás muestras. Cuanto a los resultados del comportamiento viscoso para el análisis de RVA con el empleo de 100% hidrocoloide (psyllium o xantana), no fue posible encontrar un comportamiento padrón. Esto puede estar relacionado a la alta viscosidad del psyllium y de la goma xantana en esta concentración, que dificulta la

realización correcta del ensayo, pues ni siempre fue posible alcanzar la velocidad de rotación deseada, no siendo posible obtener resultados concretos.

En mezclas de diferentes tipos de hidrocoloides en suspensiones de harina de trigo o almidón, la temperatura de gelatinización en el trabajo de Rojas, Rosell y Barber (1999) aumentó ligeramente con la adición del 0,5 % de goma guar, mientras que se observó una disminución al 1% y cuando se incluyeron κ -carragenina, alginato y xantana en esta misma concentración. Resultados similares de disminución fueron observados durante los ensayos de Alam, Siddiqui, Lutfi y Hasnain (2009) con la adición de goma guar y xantana a 0,8%.

En general, los cambios en la temperatura de gelatinización se atribuyen a interacciones entre los hidrocoloides, la amilosa y las moléculas de amilopectina de bajo peso molecular del almidón de la harina de trigo solubilizadas durante el proceso, y la disminución puede ocurrir por la lixiviación de la amilosa en el medio (Shi y BeMiller, 2002). La absorción de poca cantidad de agua del medio por los hidrocoloides hace con que ella sea más disponible para el almidón, causando así la reducción de la temperatura de gelatinización. Con esta acción, una mayor disponibilidad del almidón ocurre para las enzimas amilolíticas durante el proceso de cocción, siendo deseable en la producción de panes, por ejemplo (Alam, Siddiqui, Lutfi y Hasnain, 2009).

En los sistemas de almidón-hidrocoloide, los efectos sinérgicos en la viscosidad máxima se interpretan asumiendo que el sistema es bifásico, con el hidrocoloide ubicado en la fase continua. A medida que se reduce el volumen de la fase accesible al hidrocoloide, debido a la hinchazón de los gránulos de almidón durante la gelatinización, su concentración aumenta y consecuentemente resulta en el aumento en la viscosidad máxima de la mezcla (Alloncle, Lefebvre, Llamas, y Doublier, 1989). Para Christianson, Hodge, Osborne y Detroy (1981) y Chaisawang y Suphantharika (2006), este aumento de la viscosidad máxima puede hacer con que las fuerzas ejercidas sobre los gránulos hinchados sean mucho más grandes que las encontradas en las suspensiones de almidón-agua, resultando en la pérdida de integridad de los gránulos y la lixiviación de amilosa inhibida, reflejadas por la viscosidad de caída, y otros factores que proporcionan la disminución de la viscosidad final del gel.

Según Christianson, Hodge, Osborne y Detroy (1981), la adición de hidrocoloides a las suspensiones de almidón y agua puede contribuir al gran aumento de la viscosidad de la pasta cuando se calienta y la reducción de la tendencia a la retrogradación. Su presencia hace con que las fuerzas ejercidas sobre los gránulos en el campo de corte

sean mucho más grandes que las encontradas en suspensiones simples. Este aumento de las fuerzas afecta significativamente a la capacidad de los gránulos de almidón en hincharse libremente antes de su degradación física y en la cantidad de material exudado en el medio, así como también produce una alta viscosidad máxima (Rojas, Rosell y Barber, 1999).

En ensayos con la agregación de los hidrocoloideos a las suspensiones de almidón de yuca, un incremento en la viscosidad máxima de la pasta aumentó 49,8% cuando se utilizó carboximetilcelulosa y 35,7% con la goma xantana con una concentración del 0,45% (Leite, Nicoleti, Penna y Franco, 2012). Resultados similares con almidón de trigo fueron observados por Christianson, Hodge, Osborne y Detroy (1981), utilizando la misma concentración de goma xantana, goma guar y carboximetilcelulosa, siendo que la viscosidad máxima más alta fue con la goma guar, casi diez veces mayor que el control utilizado. Para Rojas, Rosell y Barber (1999), la goma guar también incrementó la viscosidad máxima, pero solo cuando se empleó al nivel del 1%.

4.3. Propiedades Reológicas

El carácter viscoelástico de las muestras se expone en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades reológicas de los geles de psyllium y goma xantana.

Muestra	G' (Pa)	G'' (Pa)	Tan δ
Control	1460 ± 0,07 a	73 ± 0,45 a	0,05 ± 0,00 ab
PSY 2%	1635 ± 0,01 a	75 ± 1,44 a	0,04 ± 0,00 a
PSY 5%	1575 ± 0,13 a	101 ± 0,35 ab	0,06 ± 0,00 bc
PSY 10%	1800 ± 0,18 a	177 ± 0,06 c	0,10 ± 0,00 d
XAN 2%	2550 ± 0,65 b	131 ± 0,29 b	0,05 ± 0,00 ab
XAN 5%	1970 ± 0,14 ab	98 ± 0,24 ab	0,05 ± 0,00 ab
XAN 10%	1640 ± 0,01 a	121 ± 0,28 b	0,07 ± 0,00 c

Valores medios ± SD (desviación estándar) seguidos por la misma letra en cada columna no fueron significativamente diferentes con un $p \leq 0,05$. PSY (Psyllium), XAN (goma xantana), G' (Módulo elástico o de almacenamiento), G'' (Módulo viscoso o de pérdida) y Tan δ (factor de pérdida).

Para el psyllium, su adición en los diferentes niveles al almidón no proporcionó diferencias significativas entre ellos frente al control para el módulo G', lo que indica que hasta 10%, el hidrocoloide tiene poca o ninguna influencia en la formación de la estructura del gel, siendo esa función realizada mayoritariamente por el almidón. Los resultados para el módulo G'' frente al control no presentaron diferencias significativas hasta 5% y aumentaron al 10%, indicando que hubo un incremento de la energía perdida por el gel. El factor de pérdida (tan δ) que relaciona los módulos G' y G'', se mantuvo igual en los niveles de 2 y 5% de psyllium y al 10% presentó un aumento, cuando comparados a la muestra control.

Para la goma xantana, su adición en los diferentes niveles al almidón para el módulo G' frente al control, mostró que al 2% hubo un aumento significativo, indicando una consecuente influencia del hidrocoloide en la estructura del gel haciéndolo más rígido, al 5% ninguna influencia, mientras que al 10% provocó la disminución del parámetro. Esto indica que un gel formado por concentraciones crecientes de xantana es débil, por esto, lo mejor es emplear la xantana en combinación con otro hidrocoloide que le pueda mejorar esta propiedad. Para el módulo G'' , los resultados no presentaron diferencias significativas entre ellos, pero con relación al control, hubo un aumento de los valores. El factor de pérdida se mantuvo igual en los niveles de 2 y 5% y al 10% presentó un aumento, cuando comparados a la muestra control.

Resultados similares para la goma xantana fueron encontrados por Wang et al. (2009), donde el módulo G' fue mayor que el módulo G'' y G' sólo presentó aumento a bajas concentraciones del hidrocoloide, en mezclas de la misma goma al almidón de maíz waxy frente al control. Ya los valores para el factor de pérdida ($\tan \delta$) disminuyeron conforme hubo el aumento de la goma xantana al almidón. Lo mismo ocurrió en el trabajo de Chaisawang y Suphantharika (2006), empleando goma xantana y goma guar en el almidón de tapioca, pues observaron que el módulo G' también fue mayor que el módulo G'' así como el aumento de las gomitas ha provocado un incremento de los valores G' . Los valores de $\tan \delta$ fueron más bajos que las del control (almidón de tapioca 100%), indicando que el comportamiento reológico de las mezclas de almidón de tapioca con goma xantana y guar son más sólidas frente al control, diferente de nuestro estudio, donde al 2 y 5% de goma xantana no presentaron diferencias significativas frente al control y al 10% el resultado fue mayor.

Según Clark y Ross-Murphy (1987), las propiedades reológicas tienen algunas clasificaciones que pueden ser utilizadas para caracterizar una dispersión, siendo las cuatro más tradicionales: la solución diluida, la solución concentrada, el gel débil y el gel fuerte. Para que un gel pueda ser clasificado como débil, hay que presentar comportamientos como el módulo $G' > G''$, fenómeno este que indica que el componente elástico ocupa una mayor proporción de la solución en comparación con el componente de viscosidad en el bajo esfuerzo aplicado, siendo ambos dependientes de la frecuencia y sin cruce entre los ellos, y el factor de pérdida que debe estar entre 0 y 1, ser menor o igual al control utilizado en el análisis (Farahnaky, Askari, Majzoobi y Mesbahi, 2010; Xu, Xu, Liu, Chen, Gong, 2013).

Basándose en estos conceptos, los geles de psyllium al 2 y 5% se clasifican como débiles y presentan una prevalencia del carácter elástico, debido la constancia de los

módulos G' y G'' y los factores de pérdida sin diferencias significativas frente al control. Al 10% todavía pueden ser considerados como geles débiles, pero el aumento del módulo G'' y el factor de pérdida indican una tendencia al carácter viscoso a medida que el hidrocoloide aumenta en el sistema con el almidón. La misma clasificación puede ser utilizada para los geles de goma xantana.

Comparándose los dos hidrocoloides, se observó que para el módulo G' la goma xantana tuvo un efecto mayor en los niveles de 2 y 5% y similar al psyllium al 10%. Para el módulo G'' , la goma xantana presentó un mayor valor con la adición del 2%, se igualó al psyllium al 5% y proporcionó un menor valor al 10%. En el factor de pérdida, sólo hubo diferencia significativa entre los hidrocoloides para el nivel del 10%, donde el psyllium tuvo un efecto mayor frente a la goma xantana. Estos resultados demuestran que la goma xantana en pequeñas concentraciones (2 y 5%) tiene una influencia más significativa cuando se agrega a los geles de almidón frente al psyllium, siendo que él tiene una mayor influencia al 10%, es decir, en mayores cantidades.

La obtención de geles y consecuente análisis de las propiedades reológicas no fue posible al 100% para los dos hidrocoloides. El polvo del psyllium por ser constituido de partículas de tamaño fino y con una incapacidad de penetración del agua, puede ser más diluido en conjunto con grandes cantidades de materiales altamente dispersables en agua como el almidón, pero su dispersión resulta en un gel muy grumoso, mojado en su superficie y con un interior conteniendo polvos secos que no permiten moldearlos con facilidad, resultando en superficies irregulares (Powell, Patel y Minn, 1982; Sander y Hayfield, 2001).

La goma xantana en solución se comporta como un polímero pseudoplástico que no tiene la capacidad de formar geles sola, pero cuando se mezcla con otros biopolímeros y por enlaces cruzados en presencia de metales iones, puede promover la estabilización del gel a través de efectos sinérgicos con las otras macromoléculas (Stokke, Christensen y Smidsrod, 1998; Bertrand y Turgeon, 2007). En concentraciones de 0,05-0,5g de goma xantana en 100g de proteína aislada de soja, Sanchez, Schmitt, Babak y Hardy (1997) observaron que la producción de geles con estructuras más rígidas a través de efectos sinérgicos entre las cadenas de proteínas y polisacáridos fue realizada a bajas concentraciones del hidrocoloide.

4.4. Textura y color del gel

Los resultados obtenidos para el color de las mezclas de almidón e hidrocoloides se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de color de los geles de psyllium y goma xantana.

Muestra	L*	a*	b*
Control	60,68 ± 0,51 cde	-2,63 a	-9,28 ab
PSY 2%	62,16 ± 0,56 e	-2,58 a	-8,07 bc
PSY 5%	60,67 ± 0,13 cde	-2,60 a	-6,61 cd
PSY 10%	59,43 ± 0,25 c	-1,83 b	-5,56 d
PSY 100%	34,46 ± 0,71 a	4,14 d	3,45 f
XAN 2%	59,69 ± 1,27 cde	-2,73 a	-9,71 a
XAN 5%	59,07 ± 1,43 c	-2,67 a	-9,58 ab
XAN 10%	61,5 ± 1,53 de	-2,76 a	-8,19 abc
XAN 100%	55,03 ± 0,29 b	-0,96 c	1,82 e

Valores medios ± SD (desviación estándar) seguidos por la misma letra en cada columna no fueron significativamente diferentes con un $p \leq 0,05$. PSY (Psyllium), XAN (goma xantana), L* (Luminosidad), a* y b* (Coordenadas cromáticas).

La luminosidad de los geles elaborados a partir del psyllium en los niveles de 2, 5 y 10%, no presentaron diferencias significativas entre ellos y frente a la muestra control, mientras que al 100%, el valor obtenido fue considerablemente inferior a los demás niveles y 43% menor respecto al control. En la coordenada cromática a*, fue posible observar que para porcentajes de 10% o más de psyllium los valores aumentaron. Lo mismo se pudo observar para el parámetro b*, pero en este caso, la presencia del psyllium incrementó los valores mismo con pequeñas cantidades del hidrocoloide.

En los geles elaborados a partir de la goma xantana, el valor obtenido de la luminosidad al 100% fue inferior a los demás y en los niveles de 2, 5 y 10% no fueron observadas diferencias significativas frente a la muestra control, pero entre ellos hubo una pequeña diferencia entre el 5 y 10%, siendo que el incremento de la goma aumentó la intensidad de la luminosidad. Para las coordenadas cromáticas a* y b*, los valores en los niveles de 2, 5 y 10% no se diferencian estadísticamente respecto al control, mientras que al 100% ocurrió un aumento en ambos parámetros, todavía más significativo para b*.

Comparando los geles de los hidrocoloides, es posible observar que hasta 10% de hidrocoloides añadidos no presentaron diferencias significativas respecto al control, en término de la luminosidad. Pero geles con el 100% de hidrocoloides presentaron valores inferiores para la luminosidad, cerca de 43% menos en caso del psyllium y de 9% menos para la goma xantana cuando se comparan al control. En la Figura 3 es posible observar que los geles con 100% de psyllium tienen un color mucho más oscuro que el de 100% goma xantana.

En la mayoría de los geles el almidón ha tenido un dominio de su color final, sólo donde no estaba presente, es decir, en las muestras con 100% de psyllium o goma xantana, fue que los hidrocoloides utilizados han tenido una influencia debido sus

diferentes estructuras moleculares y los pigmentos encontrados en la planta o microorganismo de manera natural y que se preservan todavía en el polvo, a pesar de las mínimas oxidaciones o degradaciones que pueden tener durante el proceso de obtención (García, 2018).

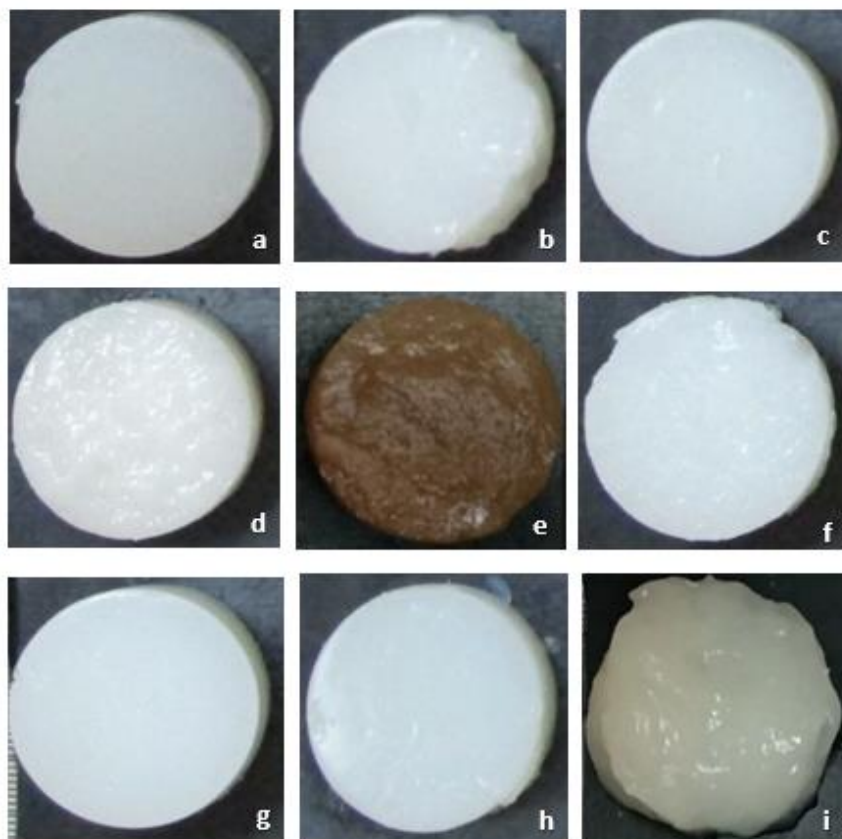


Figura 3. Geles de almidón, psyllium y goma xantana. (a) control, (b) PSY 2%, (c) PSY 5%, (d) PSY 10%, (e) PSY 100%, (f) XAN 2%, (g) XAN 5%, (h) XAN 10%, (i) XAN 100%.

Los resultados obtenidos en los ensayos de textura se muestran en la Tabla 4. Las texturas de los geles compuestos de almidón-hidrocoloide están, por supuesto, relacionados con sus comportamientos viscosos, además de factores como la naturaleza del almidón y del hidrocoloide y la combinación específica entre ellos (BeMiller, 2011).

Tabla 4. Resultados de textura de los geles de psyllium y goma xantana.

Muestra	Dureza (N)
Control	7,05 ± 1,22 d
PSY 2%	9,75 ± 1,27 e
PSY 5%	6,17 ± 0,13 cd
PSY 10%	3,83 ± 0,98 ab
XAN 2%	5,63 ± 0,85 bcd
XAN 5%	4,76 ± 0,04 bc
XAN 10%	2,52 ± 0,72 a

Valores medios ± SD (desviación estándar) seguidos por la misma letra en cada columna no fueron significativamente diferentes con un $p \leq 0,05$. PSY (Psyllium) y XAN (goma xantana).

La dureza de los geles de psyllium frente al control, tuvo un incremento de 28% con la adición del 2%, ninguna diferencia significativa al 5% y al 10% una disminución de 56%. Entre los niveles, fue posible observar una disminución de la dureza a medida que la adición del hidrocoloide fue aumentando, totalizando una diferencia de 61% del nivel más bajo al más alto. Con la adición de la goma xantana, la dureza de los geles no presentó diferencias significativas al nivel del 2% y una disminución de 32 y 64% con los niveles de 5% y 10%, respectivamente, frente al control. Así como la adición del psyllium al almidón, la goma xantana también presentó una disminución entre los niveles a medida que su concentración aumentó en el sistema, siendo que entre 2 y 5% no hubo diferencias significativas, pero entre 2 y 10% la disminución fue de 55%.

Resultados similares fueron encontrados por Liu y Xu (2019), donde fue observado que la dureza de los geles de almidón de patata disminuyó hasta 45 y 31% empleando gomas xantana y konjac, respectivamente, de acuerdo con el aumento de la concentración de los hidrocoloides (2.5, 5, 7.5 y 10%) y disminución de la cantidad de almidón. En el trabajo de Huang, Kennedy, Li, Xu y Xie (2007), el aumento de la concentración de goma konjac disminuyó la dureza de los geles de almidón de arroz cuando su concentración era más del 0,3%.

Comparando los hidrocoloides cuanto a la influencia en la dureza de los geles, la adición del psyllium al 2% fue más significativa que la goma xantana que no añadió ningún cambio al sistema. Al 10% no fue observada ninguna diferencia entre los hidrocoloides y los niveles de 2 y 5% para la goma xantana y el psyllium respectivamente, han mantenido las características iniciales de los geles, pues no se diferenciaron estadísticamente de la muestra control. Así, con la utilización del psyllium hasta el 5%, es posible presentar geles con una dureza mayor frente a la goma xantana.

La reducción de la dureza de los geles de psyllium y goma xantana a medida que fue aumentando la concentración de los hidrocoloides, puede significar que hubo una interferencia en la retrogradación del almidón, fenómeno este que provoca la fuerza de los geles. Según Rojas, Rosell y Barber (1999) y Huang, Kennedy, Li, Xu y Xie (2007), el retraso de la retrogradación de la amilosa ocurre a través de la formación de complejos entre las cadenas de amilosa del almidón y los hidrocoloides incorporados al sistema, limitando la disposición de la amilosa y provocando la reducción de la dureza que reduce la textura de los productos. Este proceso puede ser benéfico en la calidad de productos espesados con almidón y que necesitan de refrigeración por conferir estabilidad.

5. CONCLUSIONES

Tras analizar y discutir los resultados para el psyllium y la goma xantana y sus combinaciones con almidón y con el agua, se observaron diferencias considerables en los efectos de los hidrocoloides sobre las propiedades de los geles, dependiendo del nivel en que fueron utilizados. En las propiedades de hidratación, no hubo diferencias significativas entre los hidrocoloides al 100%, excepto el volumen de hinchamiento que en el psyllium fue 23% mayor que la goma xantana. Cuanto, a las incorporaciones junto al almidón, las mayores diferencias fueron observadas al 10%, donde la goma xantana presentó cambios más significativos que el psyllium.

El comportamiento viscoso del psyllium al 10% presentó un efecto mucho mayor frente a todos los otros niveles de incorporación al almidón, incluso a la goma xantana que, en la misma concentración, resultó en una viscosidad final más baja entre las muestras analizadas. Los hidrocoloides en los niveles más bajos (2 y 5%) tuvieron influencia en los geles frente al control. A través de las propiedades reológicas, los geles de psyllium y goma xantana son clasificados como débiles y con una prevalencia del carácter viscoso, siendo que la goma xantana influye en el sistema en menores concentraciones (2 y 5%) y el psyllium a partir del 10%. Los geles al 100% presentaron una dificultad en ser moldeados y analizados, debido a su estructura poco viscosa.

Los geles en general presentaron una reducción de la dureza frente al control debido la presencia de los hidrocoloides como interferentes en el fenómeno de la retrogradación de la amilosa. El psyllium hasta 5% presenta geles con mayor dureza, siendo que al 2% aumentó en 28% frente al control. Además, el almidón ha dominado el color de los geles hasta 10%, donde sólo al 100% hidrocoloides presentaron un color característico del producto.

El psyllium, tras observar los resultados disponibles en este trabajo y en la literatura científica, puede ser un buen ingrediente para utilizar como sustituto del gluten o de grasas en productos alimentarios, además de tener un comportamiento similar a la goma xantana, por lo que puede ser un sustituto natural de este aditivo.

6. AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos empiezan a Dios y a mi madre Maria Valdenir Marques, que me apoyan y me dan fuerzas cada día desde que empecé los trámites para la inscripción del curso en Brasil. Agradezco también la Universidad de Valladolid y el Banco de Santander por concederme la beca. Muchas gracias especialmente a mi tutor Manuel Gómez Pallarés por aceptarme en su grupo de investigación, ofreciéndome el tema del presente trabajo, así como la doctoranda Mayara Lopes da Silva Belorio que me ayudó

mucho durante toda la ejecución del trabajo. Por fin y no menos importante, un agradecimiento a mis compañeros de curso y ahora amigos Alba, Alberto, Diego, Elena, Laura y Lucía por el apoyo e incentivo durante mi jornada en España a lo largo de estos meses.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achayuthakan, P., y Supphantharika, M., (2008). Pasting and rheological properties of waxy corn starch as affected by guar gum and xanthan gum. *Carbohydrate Polymers*, 71, 9–17.
- Alam, F., Siddiqui, A., Lutfi, Z., y Hasnain, A. (2009). Effect of different hydrocolloids on gelatinization behaviour of hard wheat flour. *Trakia Journal of Sciences*, 7 (1), 1-6.
- Al-Assaf, S., Phillips, G. O., Williams, P. A., Takigami, S., Dettmar, P., y Havler, M. (2003). Molecular weight, tertiary structure, water binding and colon behaviour of ispaghula husk fibre. *Proceedings of the Nutrition Society*, 62, 211–216.
- Alloncle, M., Lefebvre, J., Llamas, G., y Doublier, J. L. (1989). A rheological characterization of cereal starch-galactomannan mixtures. *Cereal Chemistry*, 66, 90-93.
- Aprodu, I., y Banu, I. (2015). Influence of dietary fiber, water, and glucose oxidase on rheological and baking properties of maize based gluten-free bread. *Food Science and Biotechnology*, 24 (4), 1301-1307.
- BeMiller, J. N. (2011). Pasting, paste, and gel properties of starch–hydrocolloid combinations. *Carbohydrate Polymers*, 86, 386–423.
- Bertrand, M., y Turgeon, S. L. (2007). Improved gelling properties of whey protein isolate by addition of xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 21, 159-166.
- Cappa, C., Lucisano, M., y Mariotti, M. (2013). Influence of Psyllium, sugar beet fiber and water on gluten-free dough properties and bread quality. *Carbohydrate Polymers*, 98, 1657–1666.
- Cargill. (2015). O amido e suas propriedades para o setor alimentício. *Food Ingredients Brasil*, 35, 41-44.
- Casas-Alencáster, N. B., y Pardo-García, D. B. (2005). Análisis de perfil de textura y propiedades de relajación de geles de mezclas almidón de maíz ceroso entrecruzado-gelana. *Revista mexicana de ingeniería química*, 4, 107-121.
- Casas, K. G. O. (2016). Estudio de la interacción de hidrocoloides empleados en alimentos y su efecto en las propiedades reológicas y de textura sensorial e instrumental. Universidad Nacional de Colombia, p. 81.

- Chaisawang, M., y Suphantharika, M. (2006). Pasting and rheological properties of native and anionic tapioca starches as modified by guar gum and xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 20, 641-649.
- Chenlo, F., Moreira, R., Pereira, G., y Silva, C. (2009). Rheological modeling of binary and ternary systems of tragacanth, guar gum and methylcellulose in dilute range of concentration at different temperatures. *LWT- Food Science and Technology*, 42, 519–524.
- Christianson, D. D. (1982). Hydrocolloid interactions with starches. In: D. R. Lineback y G. E. Inglett. *Food Carbohydrates*, 399-419.
- Christianson, D. D., Hodge, J. E., Osborne, D., y Detroy, R. W. (1981). Gelatinization of wheat starch as modified by xanthan gum, guar gum, and cellulose gum. *Cereal Chemistry*, 58, 513-517.
- Clark, A. H., y Ross-Murphy, S. B. (1987). Structural and mechanical properties of biopolymer gels. *Advances in Polymer Science*, 83, 57-192.
- Colliopoulos, J. A., Paul, D. B., y Young, J. G. (1984). *Psyllium hydrophilic mucilloid composition*, 4,459,280.
- Farahnaky, A., Askari, H., Majzooobi, M., y Mesbahi, G. H. (2010). The impact of concentration, temperature and pH on dynamic rheology of Psyllium gels. *Journal of Food Engineering*, 100, 294–301.
- Ferrero, C., Martino, M. N., y Zaritzky, N. E. (1993). Stability of frozen starch pastes: Effect of freezing, storage and xanthan gum addition. *Journal of Food Processing and Preservation*, 17, 191-211.
- Ferrero, C., Martino, M. N., y Zaritzky, N. E. (1994). Corn starch-xanthan gum interaction and its effect on the stability during storage of frozen gelatinized suspensions. *Starch/Starke*, 46, 300-308.
- García, F. J. M. (2018). Efecto de derivados del alga gracilaria (harina y agar hidrolizado) sobre las propiedades del almidón. Universidad de Valladolid. p. 30.
- Guarda, A., Rosell, C. M., Benedito, C., y Galotto, M. J. (2004). Different hydrocolloids as bread improvers and antistaling agents. *Food Hydrocolloids*, 18, 241–247.
- Gularte, M. A., y Rosell, C. M. (2011). Physicochemical properties and enzymatic hydrolysis of different starches in the presence of hydrocolloids. *Carbohydrate Polymers*, 85, 237–244.
- Guo, Q., Cui, S. W., Wang, Q. Goff, H. D., y Smith, A. (2009). Microstructure and rheological properties of Psyllium polysaccharide gel. *Food Hydrocolloids*, 23, 1542-1547.

- Guo, Q., Cui, S. W., Wang, Q., y Young, J. C. (2008). Fractionation and physicochemical characterization of psyllium gum. *Carbohydrate Polymers*, 73, 35-43.
- Higley, J. S., Love, S. L., Price, W. J., Nelson, J. E., y Huber, K. C. (2003). The Rapid Visco Analyzer (RVA) as a tool for differentiating potato cultivars on the basis of flour pasting properties. *American Journal of Potato Research*, 80 (3), 195–206.
- Hojjatoleslami, M., Raisi, F., Asadi, M., Mohammadian, M., y Samanian, N. (2013). Rheological properties of the gum fractions from psyllium (*Plantago psyllium* L.). *Journal of Herbal Drugs*, 4 (2), 69-74.
- Huang, M., Kennedy, J. F., Li, B., Xu, X., y Xie, B. J. (2007). Characters of rice starch gel modified by gellan, carrageenan, and glucomannan: A texture profile analysis study. *Carbohydrate Polymers*, 69 (3), 411-418.
- Lee, M. H., Baek, M. H., Cha, D. S., Park, H. J., y Tim, S. T. (2002). Freeze-thaw stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide gum. *Food Hydrocolloids*, 16, 345-352.
- Leite, T. D., Nicoleti, J. F., Penna, A. L. B., y Franco, C. M. L. (2012). Effect of addition of different hydrocolloids on pasting, thermal, and rheological properties of cassava starch. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 32(3), 579-587.
- Liu, J., y Xu, B. (2019). A comparative study on texture, gelatinization, retrogradation and potential food application of binary gels made from selected starches and edible gums. *Food Chemistry*, 296, 100-108.
- Liu, W., Zhang, B., Wang, Q., Xie, Z., Yao, W., Gao, X., y Yu, L. (2010). Effects of sulfation on the physicochemical and functional properties of psyllium. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58 (1), 172-179.
- Makri, E. A., y Doxastakis, G. I. (2006). Study of emulsions stabilized with Phaseolus vulgaris or Phaseolus coccineus with the addition of Arabic gum, locust bean gum and xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 20, 114–1152.
- Mali, S., Ferrero, C., Redigonda, V., Beleia, A. P., Grossmann, M. V. E., y Zaritzky, N. E. (2003). Influence of pH and hydrocolloids addition on yam (*Dioscorea alata*) starch pastes stability. *LWT – Food Science and Technology*, 36 (5), 475–491.
- Matta Júnior, M. D. (2015). Características estruturais, físico-químicas e funcionais dos amidos de mandioca e de milho com diferentes teores de amilose oxidados por ozônio. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, p.122.
- Matuda, T. G., Chevallier, S., Filho, P. A., Le bail, A., y Tadini, C. C. (2008). Impact of guar and xanthan gums on proofing and calorimetric parameters of frozen bread dough. *Journal of Cereal Science*, 48, 741–746.

- Mikus, L., Valík, L., y Dodok, L. (2011). Usage of hydrocolloids in cereal technology. *Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 59 (5), 325–334.
- Milani, J. y Maleki, G. (2012). Hydrocolloids in food industry. Food industrial processes - methods and equipment, Dr. Benjamin Valdez (Ed.), 2-38.
- Pongsawatmanit, R., y Srijunthongsiri, S. (2008). Influence of xanthan gum on rheological properties and freeze–thaw stability of tapioca starch. *Journal of Food Engineering* 88, 137–143.
- Powell, D. R., Patel, V. K., y Minn, B. (1982). *Psyllium compositions*, 4,321,263.
- Rojas, J. A., Rosell, C. M., y Barber, C. B. (1999). Pasting properties of different wheat four-hydrocolloid systems. *Food Hydrocolloids*, 13, 27-33.
- Rosell, C. M., Santos, E., y Collar, C. (2009). Physico-chemical properties of commercial fibres from different sources: a comparative approach. *Food Research International*, 42, 176–184.
- Rosell, C. M., y Foegeding, A. (2007). Interaction of hydroxypropylmethylcellulose with gluten proteins: small deformation properties during thermal treatment. *Food Hydrocolloids*, 21, 1092-1100.
- Saguy, S., Singh, R. P., Johnson, T., y Fryer, P. J. (2013). Challenges facing food engineering. *Journal of Food Engineering*, 119 (2), 332-342.
- Saha, D., y Bhattacharya, S. (2010). Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: a critical review. *Journal of Food Scientists & Technologists*, 47 (6), 587-597.
- Sanchez, C., Schmitt, V.G., Babak, F., y Hardy, J. (1997). Rheology of whey protein isolate-xanthan mixed solutions and gels. Effect of pH and xanthan concentration. *Nahrung*, 41, 336-343.
- Sander, E. H., y Hayfield, M. N. (2001). *Psyllium hydrocolloid gum composition*, 6,312,730.
- Santeramo, F. G., Carlucci, D., De Devitiisa, B., Seccia, A., Stasi, A., Viscecchia, R., y Nardone, G (2018). Emerging trends in European food, diets and food industry. *Food Research International*, 104, 39-47.
- Shi, X., y BeMiller, J. N. (2002). Effects of food gums on viscosities of starch suspensions during pasting. *Carbohydrate Polymers*, 50, 7-18.
- Silva, V. L., Sereno, A. M., y Sobral, P. J. A. (2017). Food industry and processing technology: on time to harmonize technology and social drivers. *Journal of Food Engineering*, 10, 1–13.
- Stokke, B. T., Christensen, B. E., y Smidsrod, O. (1998). Macromolecular properties of xanthan. In: S. Dumitriu, *Polysaccharides: Structural diversity and Functional Versatility*, 433-472.

- Thakur, V. K., y Thakur, M. K. (2014). Recent trends in hydrogels based on psyllium polysaccharide: a review. *Journal of Cleaner Production*, 82, 1-15.
- Verma, A., y Mogra, R. (2013). Psyllium (*Plantago ovata*) husk: a wonder food for good Health. *International Journal of Science and Research*, 4, 1581-1585.
- Xu, L., Xu, G., Liu, T., Chen, Y., y Gong, H. (2013). The comparison of rheological properties of aqueous welan gum and xanthan gum solutions. *Carbohydrate Polymers*, 92, 516-522.
- Wang, B., Wang, L. J., Dong, L. Ozkan, N., Li, S. J., y Mao, Z. H. (2009). Rheological properties of waxy maize starch and xanthan gum mixtures in the presence of sucrose. *Carbohydrate Polymers*, 77, 472-481.
- Wang, L., Shen, Z., Mu, H., Lin, Y., Zhang, J., y Jiang, X. (2017). Impact of alkali pretreatment on yield, physico-chemical and gelling properties of high quality agar from *Gracilaria tenuistipitata*. *Food Hydrocolloids*, 70, 356–362.