

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LOS ALIMENTOS**



**ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS
DE DISTINTOS HIDROCOLOIDES EN UN SISTEMA DE
DIGESTIÓN *IN VITRO***

**Tesis para optar al grado de Ingeniera en Alimentos y Magíster en
Ciencias de los Alimentos**

NATALIA CAROLINA VERA CÉSPEDES

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Luis Puente D.

CO DIRECTORA DE TESIS

Dra. Loreto Muñoz H.

Santiago, Chile

2019

“Un científico en su laboratorio no es sólo un técnico: también es un niño que se enfrenta a fenómenos naturales que le impresionan como si fueran cuentos de hadas”.

Marie Curie (1867-1934)

DEDICATORIA

Dedicada a mis padres y abuelos.

AGRADECIMIENTOS

A mi maravillosa familia, por ser los principales promotores de mis sueños. Gracias infinitas a mis padres, sobre todo por la paciencia, el amor y el apoyo incondicional, por la confianza, los valores y principios inculcados, que sin duda alguna han hecho del camino recorrido hasta ahora una completa aventura. Gracias a mis abuelos por enseñarme de perseverancia, resiliencia y por sembrar en mi la semilla de la superación.

A mis amigos, en especial a Claudio y a mis queridas pequeñas, Ilse y Jesu, por ser los mejores amigos y compañeros con los que podría haber emprendido este largo camino desde los primeros días de nuestra carrera, gracias por tantos momentos valiosos. A Meli, Sebastián y Cata, por esas innumerables conversaciones de catarsis y deshago.

A mis directores, Luis Puente por haberme recibido como tesista, por su apoyo y buena disposición para realizar de la mejor manera este trabajo; y a Loreto Muñoz, por toda la confianza y oportunidades que me ha brindado desde el primer momento, por su entrega tanto personal como profesional, por sus consejos invaluable y por, sobre todo, muchísimas gracias por influir de manera tan positiva en mi formación como futura investigadora.

A mis compañeras de magíster, por el justo y necesario apoyo moral en los momentos de mayor locura.

A Lili, por ser una gran compañera de laboratorio, por su enorme ayuda y por acompañarme en este ajetreado y largo camino. Gracias por todas esas risas necesarias en medio del caos.

A Cami Mella, por la paciencia y la buena disposición para ayudarme y aconsejarme.

A Maka por su amistad fraternal desde tiempos inmemorables y a mi Negri por sus siempre tan certeros y sabios consejos.

A mis amigos “Mochileros”, por estar presente de una u otra manera en los mejores y peores momentos desde siempre, y por haber hecho de mi etapa universitaria un cúmulo de vivencias inolvidables.

A FONDECYT, por patrocinar esta investigación y otorgarme un espacio para aportar “un grano de arena” en el inmenso mundo de la ciencia.

A todos, gracias totales.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
1.1 Hidrocoloides	4
1.1.1 Antecedentes generales	4
1.1.2 Tipos de clasificación: Origen y estructura	5
1.1.3 Hidrocoloides de origen vegetal.....	8
1.1.4 Efectos nutricionales de los hidrocoloides como fibras dietarias	14
1.2 Hidrocoloides seleccionados	19
1.2.1 Pectina.....	19
1.2.2 Goma guar.....	23
1.2.3 Goma xanthan	26
1.2.4 Mucílago de semilla de chia	28
1.3 Proceso de digestión humana	30
1.3.1 Etapas de la digestión	30
1.3.2 Modelos para estudiar el proceso de digestión	38
1.3.2.1 Modelos <i>In vivo</i>	39

1.3.2.2 Modelos <i>In vitro</i> : Dinámicos y estáticos	40
1.3.3 Proceso de digestión de hidrocoloides como fibras dietarias	45
1.4 Hipótesis	50
1.5 Objetivos	50
1.5.1 Objetivo general	50
1.5.2 Objetivos específicos	50
CAPÍTULO 2: DESARROLLO EXPERIMENTAL	51
2.1 Materias primas	51
2.2 Caracterización de los hidrocoloides seleccionados	52
2.2.1 Capacidad de absorción de agua (WA _b C)	52
2.2.2 Capacidad de retención de agua (WHC) y aceite (OHC)	53
2.2.3 Solubilidad	54
2.2.4 Capacidad de adsorción de agua (WA _d C)	54
2.3 Protocolo de digestión <i>in vitro</i>	55
2.3.1 Preparación de fluidos digestivos simulados	55
2.3.2 Preparación de las dispersiones de hidrocoloides	57
2.3.2 Procedimiento de digestión <i>in vitro</i> estática	58
2.4 Análisis del comportamiento reológico	60
2.5 Medición de la distribución del tamaño de partículas	61
2.6 Análisis estadístico	61

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
3.1 Caracterización de los hidrocoloides (FDS).....	62
3.1.1 Capacidad de absorción de agua (WA_bC).....	64
3.1.2 Capacidad de retención de agua (WHC) y aceite (OHC).....	65
3.1.3 Solubilidad.....	68
3.1.4 Capacidad de adsorción agua (WA_dC).....	72
3.2 Análisis del comportamiento reológico.....	74
3.3 Medición de la distribución del tamaño de partículas.....	86
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES	93
CAPÍTULO 5: PERSPECTIVAS FUTURAS	95
CAPÍTULO 6: REFERENCIAS	96
ANEXOS	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura básica de la pectina: Cadena de ácido poligalacturónico parcialmente metilesterificado.	20
Figura 2. Esquema de la ruptura del esqueleto de una pectina mediante el mecanismo de β -eliminación.	21
Figura 3. Estructura de la goma guar: Unión entre dos unidades de D-manosa de la cadena principal y ramificación de una unidad de D-galactosa.	24
Figura 4. Estructura de la goma xanthan: Cadena de D-glucosa con cadena lateral de trisacáridos.	26
Figura 5. Estructura propuesta para el mucilago de semilla se chia.	28
Figura 6. Esquema de la cavidad oral y sus principales anexos.	32
Figura 7. Esquema del estómago humano y sus principales componentes.	34
Figura 8. Esquema de las secciones que conforman el intestino delgado.	37
Figura 9. Esquema de las secciones que conforman el intestino grueso.	38
Figura 10. Diagrama del procedimiento de digestión <i>in vitro</i> y sus condiciones.	59
Figura 11. Solubilidad de las FDS (%) en función de la temperatura (°C).	69
Figura 12. Viscosidad aparente de las FDS durante el proceso de digestión <i>in vitro</i> . ..	75
Figura 13. Distribución del tamaño de partículas de las FDS antes y durante la digestión <i>in vitro</i>	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los hidrocoloides según su origen y algunas categorías según estructura química.....	7
Tabla 2. Contenido de FDS en algunos hidrocoloides y su límite de uso en la mayoría de los productos alimenticios.	16
Tabla 3. Cuadro resumen de las ENT que pueden verse afectados positivamente por los hidrocoloides.	18
Tabla 4. Composición de las soluciones stock utilizadas en la elaboración de los fluidos de digestión simulados.	56
Tabla 5. Composición de los fluidos de digestión simulados: SSF, SGF y SIF.	57
Tabla 6. Concentración baja, media y alta para cada solución de hidrocoloide.	57
Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de las FDS seleccionadas.	62
Tabla 8. Parámetros obtenidos del ajuste de resultados a la Ley de la Potencia.	76
Tabla 9. Comportamiento de la distribución del tamaño de partículas de las FDS antes y durante la digestión <i>in vitro</i>	88

RESUMEN

Frente a la necesidad de mitigar y/o prevenir enfermedades asociadas a la ingesta de alimentos, es que el consumo de fibra dietaria, tanto soluble como insoluble, ha recibido especial interés por parte de investigadores, consumidores e industria alimentaria. En particular, la ingesta de fibra soluble se ha asociado a diferentes respuestas fisiológicas tales como, su capacidad para modular la respuesta glicémica como consecuencia del aumento de viscosidad de los alimentos a través del tracto digestivo.

La inclusión de fibra soluble como ingrediente dentro de formulaciones de alimentos han despertado el interés por estudiar estas fibras desde su estructural, la cual varía dependiendo de su fuente de obtención; hasta comprender los efectos que puede ocasionar el proceso de digestión humana sobre ellas.

De acuerdo con lo anterior, el objetivo principal de esta investigación fue comparar los cambios físicos producidos en algunos hidrocoloides (pectina, goma guar, goma xanthan y mucílago de chia) a través de la digestión gastrointestinal empleando un sistema de digestión *in vitro* estático, incluyendo la fase oral, gástrica e intestinal; mediante la evaluación de los cambios de viscosidad y distribución del tamaño de partículas. Puesto que se trata de hidrocoloides estructuralmente diferentes, la investigación consto de una etapa previa al proceso de digestión, donde se determinaron sus propiedades fisicoquímicas: capacidad de adsorción y absorción de agua, capacidad de

retención de agua y aceite y solubilidad, además de determinar la viscosidad aparente y distribución del tamaño de partículas. Cada hidrocoloide se estudió en concentraciones baja, media y alta, de acuerdo con su viscosidad.

La pectina destacó por su significativamente menor capacidad de absorción y retención de agua; y por su elevada solubilidad independiente de la temperatura. El mucílago por otra parte destacó por su elevada capacidad de retención de aceite, mientras que su solubilidad en función de la temperatura fue similar a la presentada por la goma guar. La goma xanthan destacó por su capacidad de adsorción de agua. Por otra parte, como era de esperar, todos los hidrocoloideos presentaron un comportamiento pseudoplástico en las diferentes concentraciones y etapas de la digestión, siendo el mucílago y la goma xanthan quienes no presentaron cambios significativos en su comportamiento reológico, manteniendo su viscosidad; mientras que la pectina la aumento. En cuanto a la distribución del tamaño de partículas, destacó el mucílago al presentar insignificantes diferencias en el tamaño de partículas durante la digestión.

En general, se observó que un aumento de concentración sólo incide en la viscosidad de las soluciones, pero no en la distribución del tamaño de partículas. Por otro lado, sobre los resultados tuvo mayor incidencia el tipo de hidrocoloide, que su concentración, fase digestiva, pH o fuerza iónica del medio. Siendo el mucílago, la fibra que presentó mayor resistencia física frente a la digestión, por lo que su efecto en la modulación de la digestión sería mayor.

ABSTRACT

Comparative study of the physical properties of different hydrocolloids in an in vitro digestion model

Faced with the need to mitigate and / or prevent diseases related to food intake, the consumption of dietary fiber, both soluble and insoluble, has received special interest from community scientific, consumers and food industry. In particular, the intake of soluble fiber has been associated with different physiological responses such as, its ability to modulate the glycemic response as the increase of the viscosity of the food through the digestive tract.

The inclusion of soluble fiber as an ingredient in new or improved food formulations, has aroused the interest to study these fibers from its structural composition, which varies depending on its source of production; to understand the effects that can be caused by the process of human digestion on them.

According to the above, the main objective of this research was to compare the physical changes produced in some hydrocolloids (pectin, guar gum, xanthan gum and chia mucilage) through gastrointestinal digestion by applying an in vitro digestion system static, including the oral, gastric and intestinal phase; evaluating changes in viscosity, particle size and microstructural characteristics. Since these are structurally different hydrocolloids, the research consisted of a stage prior to the digestion process, where the following physicochemical properties of the

hydrocolloids were determined: Adsorption, water and oil retention capacity, water absorption capacity and solubility. Each hydrocolloid was studied in low, medium and high concentrations, according to its viscosity.

Pectin was noted for its significantly lower water absorption and retention capacity; and for its high solubility independent of temperature. The mucilage on the other hand was noted for its high capacity for oil retention, while its solubility as a function of temperature was like guar gum. Xanthan gum stood out for its water adsorption capacity. On the other hand, as expected, all the hydrocolloids presented a pseudoplastic behavior in the different concentrations and stages of digestion, being the mucilage and the xanthan gum that did not present significant changes in their rheological behavior, maintaining their viscosity; while the pectin increased. Regarding the distribution of particle size, the mucilage stood out due to insignificant differences in particle size during digestion.

In general, it is observed that the increase in concentration only affects the viscosity of the solutions, but not in the particle size distribution. On the other hand, on the results, it had to do with the type of hydrocolloid, its concentration, digestive phase, pH or ionic strength of the medium. Being the mucilage, the fiber that presented greater physical resistance to digestion, so that its effect on the modulation of digestion would be greater.

INTRODUCCIÓN

Debido al alarmante aumento de personas que padecen enfermedades crónicas no transmisibles, como son las enfermedades cardiovasculares, diabetes tipo 2, sobrepeso y obesidad que aquejan tanto a países desarrollados como en vías de desarrollo como producto de cambios en los hábitos alimenticios y estilos de vida; la industria alimentaria tiene el desafío de desarrollar productos alimenticios más nutritivos y saludables, al tiempo que conservan características sensoriales y texturas satisfactorias (Hosni et al., 2017; OMS, 2003; Singh & Gallier, 2014).

Como consecuencia de lo anterior, tanto la industria como la investigación de alimentos se han enfocado en gran medida en desarrollar nuevos productos que contribuyan a incrementar la sensación de saciedad como una alternativa para disminuir su consumo excesivo. En este contexto, algunos ingredientes como las fibras y los polisacáridos han sido incorporados en alimentos, produciendo modificaciones en su volumen y composición, actuando como espesantes, agentes gelificantes, entre otras funciones; a la vez que cumplen su rol de fibra dietaria conduciendo a respuestas fisiológicas positivas como prologar la sensación de saciedad, disminución de glucosa en sangre, disminución de colesterol sanguíneo, etc. Esto es particularmente cierto para algunos hidrocoloides, que se han convertido en la base para una revolución en el desarrollo de alimentos (Aguilera, 2005; Redgwell & Fischer, 2005; Viebke et al., 2014).

Por otro lado, el aumento en el desarrollo de alimentos funcionales, especialmente aquellos que permiten regular la ingesta de calorías proporcionando mayores respuestas de saciedad, ha incrementado el interés en comprender cómo la estructura de los alimentos y el diseño de la matriz influyen en las tasas de digestión y biodisponibilidad de los nutrientes. Para este efecto, se han utilizado diversos sistemas *in vivo* e *in vitro*, donde los segundos intentan simular los eventos fisicoquímicos y fisiológicos que ocurren en el tracto gastrointestinal humano, presentando ciertas limitaciones para lograrlo, según el modelo que se emplee, dado que en algunos casos la evolución de las condiciones *in vivo* no son consideradas debido a su complejidad. Este tipo de metodologías se han propuesto como métodos alternativos a los estudios *in vivo*, que requieren una mayor inversión de tiempo y económica, sin mencionar las restricciones éticas por las que se rigen (Gidley, 2013; Lucas-González et al., 2018; Singh & Gallier, 2014). Sin embargo, se ha llegado a la conclusión que para obtener una descripción completa del efecto de un alimento o componente específico considerando todo el conjunto de factores de la digestión humana, es necesario integrar ambos estudios (Gidley, 2013).

De acuerdo con lo antes expuesto, la relevancia de esta investigación radica en conocer y entender el comportamiento físico, en particular la viscosidad y distribución del tamaño de partículas, a nivel gastrointestinal de diferentes hidrocoloides con un alto contenido de fibras solubles (FDS), considerando las etapas más relevantes de la digestión humana, tales como la fase oral, gástrica

e intestinal; partiendo de la base de las implicancias que tendrían las propiedades fisicoquímicas de estos polisacáridos en su comportamiento.

Si bien esta investigación no se complementa con un estudio *in vivo*, la información resultante podría ser utilizada como guía para la inclusión adecuada de estas fibras, como ingredientes, en formulaciones de alimentos dependiendo de los beneficios que se requieran obtener.

CAPÍTULO 1

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Hidrocoloides

1.1.1 Antecedentes generales

Los cambios en el estilo de vida, la creciente conciencia del vínculo entre la dieta y la salud, y las nuevas tecnologías de procesamiento de alimentos han impulsado un rápido aumento en el consumo de comidas preparadas, alimentos novedosos y el desarrollo de alimentos con alto contenido de fibra y bajos en grasa; donde los hidrocoloides han desempeñado un importante rol como ingrediente dentro de la industria alimentaria (AACC, 1995; Li et al., 2016).

La denominación “hidrocoloide” viene dada por un grupo heterogéneo de polímeros de cadena larga (polisacáridos y proteínas) con alto peso molecular (10 o más unidades monoméricas), que se caracterizan por su capacidad para formar soluciones viscosas y/o geles al ser dispersados parcial o totalmente en agua; es decir, producen una dispersión intermedia entre una verdadera solución y una suspensión, con las propiedades de un coloide. Esta característica depende de la cantidad de grupos hidroxilo (-OH) que posee el polímero, es así, como la presencia de un gran número de -OH aumenta notablemente su afinidad por las moléculas de agua, por lo que son compuestos hidrófilos (Li et al., 2016; Phillips & Williams, 2000).

Estos polisacáridos son uno de los aditivos alimentarios más importantes al ser utilizados en muchas formulaciones de alimentos para diversos propósitos, como espesantes, agente gelificantes, agentes espumantes, recubrimientos comestibles, emulsionantes, estabilizantes, etc. Una de las principales razones de su uso es la capacidad que tienen para unirse al agua y modificar las propiedades de los alimentos, por ejemplo, propiedades reológicas por ende sus propiedades sensoriales (Karaman et al., 2014; Li et al., 2016).

Si bien todos los hidrocoloides son capaces de modificar la consistencia e impartir adherencia a las dispersiones acuosas, solo algunos biopolímeros además tienen la capacidad de formar geles (Saha & Bhattacharya, 2010). Estos biopolímeros abundan en la naturaleza como componentes estructurales, de almacenamiento u otros componentes funcionales de tejidos de plantas y animales (Li et al., 2016).

1.1.2 Tipos de clasificación: Origen y estructura

Tradicionalmente, los hidrocoloides de acuerdo a su origen o procedencia, se pueden clasificar en tres categorías: (i) naturales, que pueden presentar tanto la estructura de un polisacárido (agar, alginato, carragenina, quitosano, pectina, almidón, celulosa, gomas), como la de una proteína (gelatina); adicionalmente este tipo de hidrocoloides pueden ser categorizados como se muestra en la Tabla 1; (ii) semisintéticos, cuando son sintetizados a partir de la modificación de hidrocoloides naturales, no presentan toxicidad y en comparación con los sintéticos poseen una mayor probabilidad de experimentar crecimiento

microbiano; y (iii) sintéticos, cuando son sintetizados por completo a partir de materiales derivados del petróleo, no son tóxicos, no permiten el crecimiento microbiano y se limitan principalmente al uso como emulsionante en aceite en agua (Li et al., 2016; Phillips & Williams, 2000).

Tal como se muestra en la Tabla 1, dentro de los hidrocoloides naturales, los hay derivados de animales y derivados de vegetales. Los provenientes de animales generalmente son capaces de formar emulsiones de agua en aceite; además de ser en algunos casos precursores de alergias, y ser susceptibles al crecimiento bacteriano y rancidez. Por otra parte, los hidrocoloides provenientes de vegetales (origen botánico y algas) se utilizan principalmente como emulsiones de aceite en agua y tienen la ventaja de ser económicos, fáciles de manejar y no presentar toxicidad, pero a su vez poseen las desventajas de ser requeridos en gran cantidad para ser eficaces como emulsionantes y ser susceptibles al crecimiento microbiano (Li et al., 2016; Torres et al., 2012).

Otro enfoque práctico utilizado para su clasificación es de acuerdo a su estructura química, como se puede observar en la Tabla 1 (Li et al., 2016).

Tabla 1. Clasificación de los hidrocoloides según su origen y algunas categorías según estructura química.

Clasificación	Ejemplos
<u>Origen</u>	
Botánico (vegetal)	
• <i>Árboles</i>	Celulosa
• <i>Plantas</i>	Almidón, pectina, celulosa
• <i>Semillas</i>	Goma guar, goma tara.
• <i>Tubérculos</i>	Konjac mannan.
Algas	
• <i>Algas rojas</i>	Agar, carragenina.
• <i>Algas marrones</i>	Alginato
Microbiano	Goma xanthan.
Animal	Gelatina, caseinato, quitosano.
Semi sintético	Metil celulosa, metil etil celulosa,
Sintético	Copolímeros de acrilato
<u>Estructura química</u>	
Glucano	Almidón, goma de cebada, goma de avena.
Galactomanano	Goma guar, goma se semilla de albahaca.
Galacturonano	Pectina
Glucomanano	Alginato
Proteína	Gelatina

Fuente: Li et al. (2016)

1.1.3 Hidrocoloides de origen vegetal

Si bien los alimentos vegetales proporcionan una gama de componentes dietarios esenciales, los hidrocoloides o polisacáridos derivados vegetales son particularmente importantes como fuente de carbohidratos de la dieta humana, incorporándose también aportes limitados por parte de fuentes fúngicas y algales (Lovegrove et al., 2017).

Estos polisacáridos de origen vegetal se pueden dividir en dos clases, ambas muy importantes en la dieta y salud humana. La primera clase corresponde al almidón disponible, una de las principales fuentes de energía en todas las dietas, quien además es fácilmente digerible en el intestino delgado. Y la segunda clase corresponde al almidón resistente (RS) y polisacáridos de la pared celular (o polisacáridos no amiláceos, NSP), principales componentes de la fibra dietaria, quienes pueden ser parcialmente digeribles o no digeribles; además, de ser fermentados por la microbiota intestinal en el colon (Lovegrove et al., 2017).

De acuerdo con lo anterior, los hidrocoloides de origen vegetal se pueden clasificar conforme a su potencial de digestibilidad de la siguiente manera:

- **Polisacáridos digeribles**

El almidón es el principal carbohidrato de reserva en las plantas y tiene dos componentes principales, la amilosa y la amilopectina, ambos polímeros de unidades de α -D-glucosa, que se encuentran en el almidón en una relación entre 20-30% y 70-80%, respectivamente. Esta relación es la que determina

el grado de digestibilidad, dado que las cadenas lineales de amilosa forman una única estructura helicoidal que se empaqueta predominantemente dentro de las regiones amorfas del granulo de almidón, regiones que son susceptibles a la hidrolisis de la enzima amilasa; mientras que la ramificada amilopectina, es menos susceptible a la amilasa debido a su compacto empaquetamiento de cadenas helicoidales dobles que se sitúan en las regiones semi-cristalinas del almidón. Por tanto, los almidones en estado nativo (crudo) al ser ricos en amilosa poseen un grado de digestibilidad mayor y un menor grado de cristalinidad (Bahaji et al., 2014; Fu et al., 2015; Lovegrove et al., 2017).

La selección del tipo de almidón se basa en la aplicación o producto a elaborar, aunque comúnmente se utiliza para gelificar o engrosar (aumentar de tamaño). Estas propiedades se pueden observar al calentar los gránulos de almidón entre 55-70°C en exceso de agua, lo que provoca una transición de fase denominada gelatinización. Este fenómeno consiste en la hinchazón de los gránulos, la descomposición del almidón cristalino para conformar regiones amorfas y la lixiviación de amilosa, lo que se traduce en el aumento de viscosidad y la conformación de un gel (Aguirre et al., 2011; Fu et al., 2015).

La digestión del almidón (carbohidratos) por efecto de la α -amilasa, secretada por el páncreas y las glándulas salivales, provoca su degradación a glúcidos más simples con la capacidad de atravesar la pared digestiva o ser absorbidos

en el intestino. De esta manera, los carbohidratos forman parte importante del metabolismo oxidativo y de la función gastrointestinal, siendo el almidón parte imprescindible del suministro de carbohidratos en la dieta humana (Butterworth et al., 2011; Lovegrove et al., 2017).

- **Polisacáridos no digeribles**

Esta clasificación comprende a todos los polisacáridos no amiláceos (NSP) que son capaces de resistir la digestión en el intestino delgado y son fermentados en mayor o menor grado a nivel de intestino grueso por acción de la microbiota presente en el colon produciéndose como resultado ácidos grasos de cadena corta. Estos polisacáridos constan de una larga cadena, las cuales difieren entre sí en el número y tipo de unidades monoméricas, enlaces entre monómeros, ramificaciones y orden dentro de la cadena. Ejemplos de NSP son la celulosa, hemicelulosa, pectinas, gomas y mucílagos (Tungland & Meyer, 2002).

La importancia tecnológica de este tipo de polisacáridos dentro de la industria alimentaria radica principalmente en las siguientes propiedades funcionales (Cui et al., 2006; Li & Nie, 2016; Saha & Bhattacharya, 2010):

- i. *Espesante*: La capacidad para aumentar la viscosidad es la característica clave por la que los hidrocoloides son utilizados como emulsionantes, estabilizantes y agentes de relleno en alimentos. Esta propiedad se

obtiene al sobrepasar la concentración crítica del hidrocoloide, exhibiendo un comportamiento no newtoniano; es decir, la viscosidad varía con la temperatura y la tensión de corte aplicada, dejando de ser constante.

El efecto espesante producido depende del tipo de hidrocoloide utilizado, su concentración, sistema alimentario en el que se utiliza, pH y temperatura del sistema. Producto de esta característica estos polisacáridos se pueden encontrar en sopas, salsas, aderezos para ensaladas, entre otros.

- ii. *Gelificante (solidificación)*: En general todos los hidrocoloides pueden espesar un sistema alimentario, pero hay algunos que además poseen la capacidad de formar geles; es decir, formar una dispersión coloidal en una matriz sólida (fase continua), por ejemplo, el agar, alginato, carragenina y pectina.

La textura de estos geles está vinculada a la cantidad de moléculas que forman una zona de unión; puesto que, mientras más moléculas haya en esta zona, más rígido será el gel. Otro parámetro importante que puede influir en la textura de los geles es la temperatura, influencia que a su vez es dependiente de las fuerzas moleculares no covalentes como los enlaces de H y las interacciones hidrofóbicas. Algunas aplicaciones de estos polisacáridos como agentes gelificantes es en mermeladas y jaleas.

- iii. *Emulsionante*: Tienen la capacidad de promover la formación de emulsiones y mantener la uniformidad de esta mezcla al reducir su tensión interfacial. Esto permite retardar la precipitación de partículas sólidas dispersas y la coalescencia de gotas de aceite, y evitan la sinéresis de los sistemas de gel que contienen aceite, así como la agregación de partículas dispersas. El emulsionante más conocido es la goma arábica, seguida por la pectina y los galactomananos. Su aplicación como emulsionante se puede observar en elaboraciones de yogurt, helados y mantequilla.

En cuanto a términos de carga iónica, los hidrocoloides de origen vegetal en su estado natural pueden ser neutros o polielectrolitos, presentando diferencias entre sí en sus propiedades, siendo las más relevantes las siguientes:

- **Neutros**

Los polisacáridos neutros simplemente se hidratan alcanzando una forma completamente extendida, generando viscosidad a través del enmarañamiento del mismo polímero, un ejemplo de ello son los galactomananos (Zied et al., 2012).

- **Polielectrolitos**

Una de las teorías propuestas para intentar explicar diferencias observadas en las propiedades entre los polielectrolitos y los polímeros neutros, es la expuesta por Dobrynin et al. (1995), quien menciona que las cadenas de polielectrolitos se pueden representar como una cadena de burbujas electrostáticas, las cuales al repelerse entre sí dan como resultado una cadena totalmente extendida de burbujas. Esta cadena es esencialmente independiente de las interacciones electrostáticas de la burbuja y depende únicamente de las interacciones termodinámicas entre el polímero neutro presente y el disolvente.

En el caso de los polisacáridos aniónicos, la presencia de ácidos carboxílicos en su composición, hacen que sus propiedades de hinchamiento dependan en gran parte del pH y de la fuerza iónica del medio, un ejemplo de ello es la pectina (Zied et al., 2012). Estos polisacáridos al igual que los hidrocoloides neutros generan una viscosidad máxima cuando alcanzan su hidratación completa en agua; sin embargo, también pueden desarrollar una viscosidad adicional por asociación con iones mono y divalentes. Por ejemplo, si alguno de estos hidrocoloides es dispersado en una bebida láctea, algunos iones de calcio liberados de las micelas de leche podrían inducir a la formación de geles durante la acidificación en el estómago, formando grumos y aumentando su volumen, por ende, contribuirían a la prolongación de la sensación de saciedad (Aimutis et al., 2006).

1.1.4 Efectos nutricionales de los hidrocoloides como fibras dietarias

Además de los atributos funcionales y tecnológicos de las fibras dietarias, se ha reconocido que una dieta rica en fibra aporta beneficios sustanciales para la salud, llevando a la conciencia industrial y pública que la fibra dietaria es un ingrediente importante en una dieta saludable (Brownlee, 2011; Li et al., 2016; Phillips & Williams, 2000; Viebke et al., 2014). Es así como la American Dietetic Association y European Food Safety Authority recomiendan la incorporación de fibra en la dieta, sugiriendo un consumo en adultos sobre 25 g/día (Association, 2008; EFSA Panel on Dietetic Products, 2010; National-Research-Council, 2005).

En este sentido, los beneficios para la salud y las propiedades fisiológicas de las fibras dietarias son difíciles de predecir sobre la base de sus estructuras por sí solas. Sin embargo, si es posible sobre la base de sus propiedades fisicoquímicas como la capacidad de retención de agua y/o aceite, viscosidad, capacidad de intercambio catiónica, distribución del tamaño de partículas, entre otros (Tunland & Meyer, 2002).

La fibra dietaria representa la fracción de carbohidratos capaz de resistir la acción de enzimas endógenas presentes en el estómago e intestino delgado, produciendo a su vez un efecto beneficioso para la salud (Gidley & Yakubov, 2018; Zhou et al., 2018). Convencionalmente, esta fracción se ha clasificado de acuerdo con su solubilidad provocando efectos específicos, tal como se menciona a continuación:

- **Fibra insoluble (FDI)**

Estas fibras se caracterizan por su baja densidad y su incapacidad para formar soluciones al ser mezcladas con agua (Dikeman et al., 2006).

Las fibras insolubles, como la celulosa y la lignina, en su mayoría no son fermentables por la microflora colónica, pero sí son capaces de disminuir la densidad del material intestinal, aumentar su volumen y disminuir su tránsito a través del intestino (Alarcón García et al., 2013; D. Mudgil & Barak, 2013).

De acuerdo con Brownlee (2011), estos efectos serían mayores cuando se utiliza fibra con mayor capacidad de retención de agua.

- **Fibra soluble (FDS)**

El aspecto de fibra dietaria de los hidrocoloides alimentarios ha sido reconocido durante mucho tiempo debido a su alto contenido de fibra soluble, como se muestra en la Tabla 2, por lo que la utilización de estos ingredientes en formulaciones alimentarias no sólo se debe a sus características tecnológicas, sino también por sus efectos asociados a su rol como fibra dietaria soluble (Viebke et al., 2014).

Tabla 2. Contenido de FDS en algunos hidrocoloides y su límite de uso en la mayoría de los productos alimenticios.

Hidrocoloide	Fibra Soluble (%)	Límite de Uso (%)	Viscosidad
Goma guar	80-95	1,5	Alta
Pectina	80-95	2	Alta
Goma xanthan	80-95	1	Baja
Carragenina	80-90	1,5	Alta

Fuente: Viebke et al. (2014)

Diversos estudios han demostrado que la saciedad está estrechamente relacionada con el efecto que las fibras solubles tienen a nivel gastrointestinal debido a su capacidad para aumentar la viscosidad de la digesta (Clark & Slavin, 2013; Dikeman et al., 2006; Gidley, 2013; Logan et al., 2015). H. Fabek and Goff (2015), además de reducir los niveles de glucosa en el plasma, lo cual es de particular importancia debido a las elevadas tasas de crecimiento en la cantidad de personas que padecen diabetes tipo 2.

Si bien, el mecanismo aún no se conoce con exactitud, de acuerdo con lo reportado por Hrvoje Fabek (2011) se presume que la viscosidad induce a:

- I. Minimizar la difusión de nutrientes a través de la membrana intestinal, producto del efecto que tiene sobre la mucosa. Si bien estos efectos de disminución en la absorción pueden ser beneficiosos para reducir la absorción de energía, también es posible que reduzcan la biodisponibilidad de minerales y vitaminas.

- II. Formación de una barrera protectora frente a pH extremos y enzimas hidrolíticas, al aumentar el volumen de los polisacáridos viscosos.
- III. Sensación de saciedad prolongada por más tiempo al retardar el vaciado gástrico.

Además de los efectos nutricionales antes mencionados, los hidrocoloides podrían tener otros efectos fisiológicos beneficiosos, como son la disminución de los niveles de colesterol asociados a una mejora en la salud cardiovascular, reducción de la presión arterial, aumento de la inmunidad gastrointestinal y mejora de la salud del colon. (Hrvoje Fabek, 2011; Li & Nie, 2016). Las principales enfermedades crónicas no transmisibles y el rol fisiológico y mecanismos de los hidrocoloides se resumen brevemente en la Tabla 3.

Tabla 3. Cuadro resumen de las ENT que pueden verse afectados positivamente por los hidrocoloides.

ENT*	Factor de riesgo	Rol de los hidrocoloides	Mecanismo
Obesidad	Ingesta total de energía	Aumentar saciedad	Distensión gástrica y tiempo de residencia
Diabetes	Cantidad de glucosa en sangre	Captación de glucosa y ralentizar la digestión de almidón	Residencia gástrica, difusión y efectos barrera
Enfermedades cardiovasculares	Nivel de colesterol y lípidos en sangre	Reducción de la reabsorción de sales biliares, ralentizar y limitar la digestión lipídica	Efectos de barrera y difusión, productos de fermentación
Cáncer de colon	Dieta baja en fibra	Suministro de sustratos para la fermentación de carbohidratos en el colon	Tasa y extensión de la densidad de fermentación, tamaño de partícula

(*) ENT: Enfermedades crónicas no transmisibles.

Fuente: Gidley (2013)

1.2 Hidrocoloides seleccionados

Con el fin de estudiar los posibles cambios físicos de las fibras dietarias solubles (FDS) durante su digestión, se eligieron cuatro fibras de diferentes orígenes, por ende, sus estructuras difieren entre sí otorgándoles determinadas propiedades fisicoquímicas, lo que incidiría en su comportamiento a nivel gastrointestinal.

Por esto, previa investigación fue necesario conocer los aspectos más importantes de cada fibra seleccionada, exponiéndose a continuación sus principales particularidades, principalmente en cuanto a su estructura y propiedades fisicoquímicas, presentándose de manera resumida en el Anexo 1.

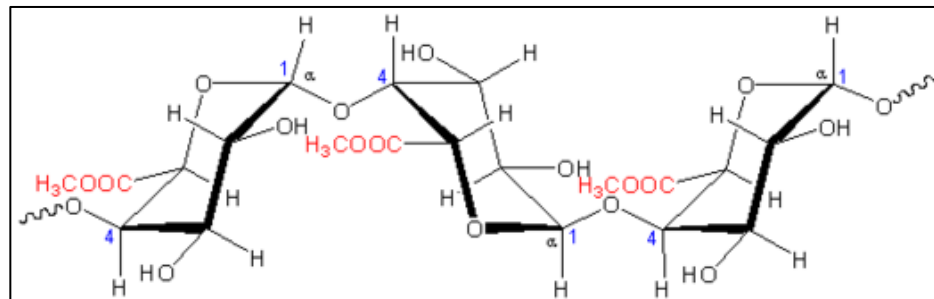
1.2.1 Pectina

La pectina es un heteropolisacárido que se distribuye ampliamente en el tejido vegetal, donde se asocia frecuentemente con otros componentes de la pared celular, como la celulosa, hemicelulosa y lignina. No obstante, la principal fuente de obtención son las frutas debido a su gran contenido, por lo que la pectina comercial en su mayoría se obtiene mediante extracción ácida del orujo de manzana (15% pectina) y cáscara de limón o naranja (~ 30% de pectina); para su posterior utilización en la industria alimentaria como agente gelificante y espesante (Lopes da Silva & Rao, 2006; May, 2000; Wüstenberg, 2014).

Independiente de la fuente y método de obtención, las pectinas tienen en común la estructura lineal de su esqueleto, el cual es considerado poliurónico dado que

su principal componente (cerca del 70% p/p) son unidades monoméricas de ácido α -D-galacturónico (pKa: 3,5) con enlaces α -(1 \rightarrow 4). A su vez, en estas unidades los grupos carboxilo (-COOH) presentan un grado variable de esterificación por metanol en el C₅, dando paso al grupo -COOCH₃ (Figura 1), siendo el grado de metilación (DE) la variable entre pectinas de diferentes orígenes, es decir, el número de moles de etanol por 100 moles de ácido galacturónico (Soriano, 2004; Wüstenberg, 2014).

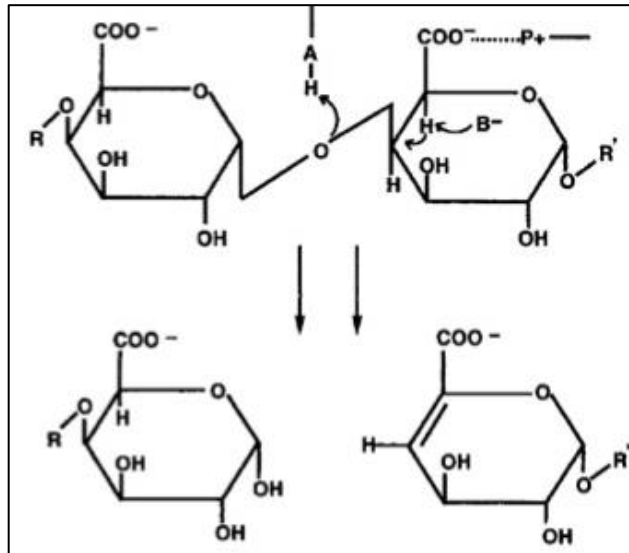
Figura 1. Estructura básica de la pectina: Cadena de ácido poligalacturónico parcialmente metilesterificado.



Fuente: Chaplin (2001)

En general, las pectinas son estables a pH 3,5 - 4 degradándose lentamente fuera de este rango, dado que, en condiciones neutras o alcalinas el esqueleto homogalacturónico se despolimeriza mediante el mecanismo de β -eliminación, un proceso en el que los enlaces glucosídicos del esqueleto en la posición C₄ de las unidades de ácido galacturónico metilado se separan (Soriano, 2004), como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Esquema de la ruptura del esqueleto de una pectina mediante el mecanismo de β -eliminación.



Fuente: Soriano (2004)

De acuerdo con el criterio de que las pectinas difieren en el DE, estas se pueden clasificar en los siguientes dos grandes grupos:

- **Pectinas de alto metoxilo (HM)**

Estas pectinas presentan un DE superior al 50% (típicamente entre 55-75%) y un contenido de metoxilo igual o mayor al 7% (Wüstenberg, 2014).

Para inducir la gelificación, las pectinas HM requieren una baja actividad de agua debido a los altos niveles de azúcar (55-85% de sólidos solubles) y un pH ácido de 2,5 - 3,8. Esta gelificación es resultado de la disminución de la repulsión electrostática causada por los enlaces de H entre grupos carboxilo no disociados y grupos de alcohol secundarios junto con interacciones

hidrófobas entre grupos de éster metílico; por ende, mientras mayor es el DE y menor es el pH mejor es la capacidad para gelificar. Es importante mencionar, que estos geles presentan una textura firme a valores pH inferiores a 3,5, de lo contrario no es posible su formación y sólo proporciona viscosidad (BeMiller, 2019c).

Las pectinas HM se utilizan principalmente como agentes gelificantes en productos a base de frutas, especialmente en la fabricación de mermeladas y conservantes de frutas. Otras aplicaciones incluyen postres de leche, preparaciones de frutas con yogurt, jugos de frutas, entre otros (Lopes da Silva & Rao, 2006).

- **Pectinas de bajo metoxilo (LM)**

Estas pectinas contrario a las de alto metoxilo, presentan un DE inferior al 50% (típicamente entre 20-45%) y un contenido de metoxilo inferior al 7%. Esta estructura hace que sean poco solubles en agua y altamente solubles en presencia de sal sódica y potásica, dado que los iones monovalentes del sodio y el potasio se unen electrostáticamente a la cadena principal de las pectinas, mientras que los cationes divalentes están involucrados en la gelificación de las pectinas (Wüstenberg, 2014).

A diferencia de las pectinas HM, las LM pueden gelificar en un rango de pH más amplio de 2,5 - 6 y en concentraciones más bajas de azúcar (6-65%),

pero requieren la presencia de cationes, que en el área de alimentos generalmente son incorporados como calcio. Como el calcio reacciona con unidades de ácido galacturónico desesterificadas, un menor pH y DE aumenta la capacidad de gelificar, tornando más sensible a la pectina frente al calcio (BeMiller, 2019c; Wüstenberg, 2014).

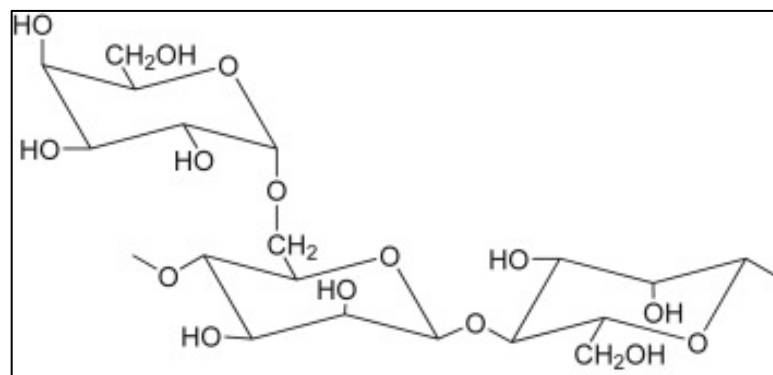
Las pectinas LM se utilizan en preparaciones de geles con un bajo nivel de sólidos disueltos, y su interés se debe a su bajo contenido calórico. Su aplicación en la industria alimentaria es diversa, incluyendo mermeladas y jaleas con bajo contenido de azúcar, postres lácteos donde generalmente no se necesita la adición de sal de calcio, geles de frutas utilizados en helados, entre muchas otras (Lopes da Silva & Rao, 2006).

1.2.2 Goma guar

La goma guar se obtiene a partir del endosperma de las semillas de la planta guar (*Cyamopsis tetragonolobus*), originaria de la India y Pakistan (Mubarak, 2000). Este endosperma contiene entre un 52-58% de fibra soluble y un 26-32% de fibra insoluble, en su conjunto el endosperma corresponde el 34-40% del peso seco de la semilla, el cual mediante un proceso de molienda es separado de los demás componentes de la semilla, como la cáscara (16-18%) y el germen (43-46%) (Deepak Mudgil et al., 2014; Wüstenberg, 2014).

Este hidrocoloide consiste principalmente en polisacáridos de galactomananos no iónicos (75-85%), puesto que se compone por una cadena principal lineal constituida por unidades de D-manosa con enlaces β -(1 \rightarrow 4) y unidades de D-galactosa unidas a ella mediante enlaces glucosídicos α -(1 \rightarrow 6), en una proporción molecular de 1,8:1, respectivamente (Mubarak, 2000; Wüstenberg, 2014), como se observa en la Figura 3. Estas unidades de galactosa y manosa son los constituyentes de la porción de galactomanano del endosperma de la semilla de la planta guar (Mubarak, 2000).

Figura 3. Estructura de la goma guar: Unión entre dos unidades de D-manosa de la cadena principal y ramificación de una unidad de D-galactosa.



Fuente: (BeMiller, 2019a)

Debido a esta estructura altamente ramificada es que la goma guar posee una buena solubilidad en agua fría, disolviéndose por completo y formando fuertes enlaces de H, presentando una alta capacidad de retención de agua y viscosidad incluso a bajas concentraciones exhibiendo un comportamiento pseudoplástico.

Sin embargo, su viscosidad se puede reducir irreversiblemente con temperaturas superiores a 90°C en un ambiente con pH neutro, o bien, al exponerse a un calor moderado en sistemas ácidos con pH inferior a 3,5, produciéndose la descomposición del galactomanano. No obstante, las soluciones de goma guar son estables frente a la congelación y descongelación a pH entre 2-10, producto de su comportamiento no iónico (BeMiller, 2019a; Deepak Mudgil et al., 2014; Wüstenberg, 2014).

Al no gelificar, su principal uso es como formador de cuerpo, estabilizante y ligador de agua. Específicamente en la industria alimentaria se utiliza como aglutinante y espesante en helados, postres lácteos, sopas, salsas y productos de panadería, dado que puede controlar la textura al influir en la cristalización y en la prevención de la sinéresis en estos productos (Wüstenberg, 2014).

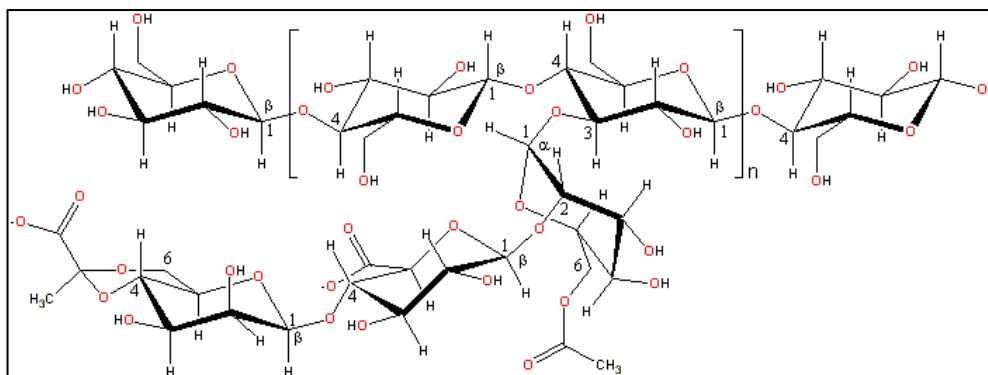
Durante el paso a través del tracto digestivo los enlaces β -(1→4) del esqueleto principal no se rompen, mientras que los enlaces α -(1→6) de las cadenas laterales se rompen parcialmente, manteniéndose la capacidad de retención de agua (Wüstenberg, 2014). Pese a esto, la concentración de goma guar en la ingesta no debe superar el 1% p/p, dado que su alta viscosidad no sólo puede interferir en las propiedades nutricionales del alimentos, sino también en las propiedades fisicoquímicas y sensoriales (Deepak Mudgil et al., 2014).

1.2.3 Goma xanthan

Este hidrocólido se obtiene como resultado de la fermentación aeróbica de soluciones de glucosa o sacarosa con cultivos puros de *Xanthomonas campestris* o *phaseoli*. Debido a la alta viscosidad que exhibe la goma xanthan, la concentración de azúcar en la fermentación no debe exceder el 5% (Ünal, 2015).

Estructuralmente, la goma xanthan es un polisacárido con una larga cadena principal de D-glucosa con enlaces β -(1 \rightarrow 4) y un gran número de cadenas laterales de trisacáridos, con una proporción molecular de D-glucosa, D-manosa y ácido D-galacturónico de 3:3:2, respectivamente. La distribución de la cadena lateral es de tal forma que dos unidades de D-manosa son separadas por un ácido D-galacturónico; donde los ácidos pirúvicos unidos a la mitad de las manosas terminales en C₄ y C₆ (Figura 4), junto con los grupos carboxilo de las cadenas laterales hacen que la molécula sea aniónica (Wüstenberg, 2014).

Figura 4. Estructura de la goma xanthan: Cadena de D-glucosa con cadena lateral de trisacáridos.



Fuente: (Chaplin, 2018)

Como se muestra en la Figura 4, en la conformación de la goma xanthan la cadena lateral de trisacárido se encuentra alineada con el esqueleto de la goma estabilizando la conformación global mediante interacciones no covalentes, principalmente enlaces de H. En solución, las cadenas laterales se enrollan alrededor del esqueleto protegiendo los enlaces β -(1 \rightarrow 4), y al exponerse a temperatura experimentan una transición conformacional, que se piensa está asociado al cambio de un estado rígido a baja temperatura a un estado más flexible y desordenado a altas temperaturas. Sin embargo, la presencia de cantidades bajas de sal mantiene la conformación rígida y ordenada de la goma xanthan (BeMiller, 2019b; Sworn, 2000).

Esta goma es estable en un amplio rango de pH entre 3-10; además, tiene la capacidad de desarrollar viscosidades altas incluso a bajas concentraciones, ser estable en presencia de sales y/o ácidos, soluble tanto en agua fría como caliente, es compatible con todos los demás hidrocoloides utilizados en alimentos (goma guar, pectinas, etc) y es muy resistente a la acción enzimática (amilasas, proteasas, pectinasas y celulasas) (Wüstenberg, 2014).

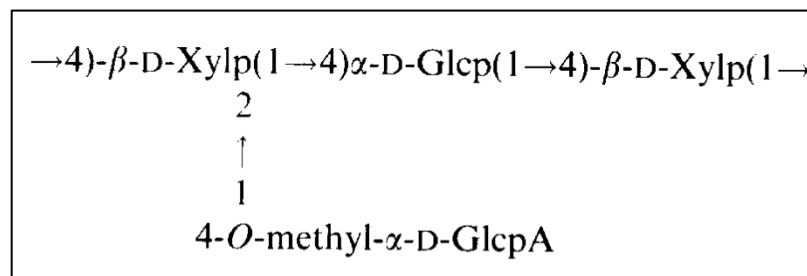
En general, las soluciones de goma xanthan al exhibir propiedades viscoelásticas de un gel débil, su principal aplicación en el área de alimentos es en aderezos, salsas y como estabilizante (Sworn, 2000; Wüstenberg, 2014).

1.2.4 Mucílago de semilla de chia

El mucílago proviene de las semillas de la planta chia (*Salvia hispánica L.*), originaria de México y norte de Guatemala, que al ser sumergidas en agua forman inmediatamente a su alrededor una “cápsula” de gel firme y transparente con características de gel débil y propiedades pseudoplásticas. Este mucílago aislado tiene la capacidad de retener hasta 30 veces su peso en agua y formar soluciones viscosas incluso a bajas concentraciones (0,05% p/p). Dicho polisacárido se compone esencialmente de fibra soluble y corresponde aproximadamente al 6% de la semilla de chia (Fernandes & Salas-Mellado, 2017; Muñoz et al., 2012; Segura-Campos et al., 2014).

Lin et al. (1994) han propuesto que la estructura del mucílago de chia corresponde a un tetrasacárido compuesto por dos residuos de β -D-xylopiranosilo, un residuo de α -D-glucopiranosilo y una rama lateral compuesta por un residuo de ácido 4-O-metil- α -D-glucopiranosilurónico, tal como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Estructura propuesta para el mucilago de semilla se chia.



Fuente: Lin et al. (1994)

Este mucílago podría utilizarse en la industria alimentaria como estabilizante de espuma, agente de suspensión, emulsionante, adhesivo o aglutinante debido a sus excepcionales cualidades como: su gran capacidad de retención de agua y aceite, buenas propiedades emulsionantes y estabilizantes, siendo resistente a fuerzas de cizallamiento, fuerzas iónicas y temperatura lo que permitiría su aplicación en diversos productos en la industria alimentaria. Además, puede actuar como sustituto de grasa debido a su capacidad para hidratarse y desarrollar viscosidad, contribuyendo a la estructura de alimentos bajos en grasa mejorando aspectos sensoriales (Fernandes & Salas-Mellado, 2017; Salgado-Cruz et al., 2013; Timilsena et al., 2016).

1.3 Proceso de digestión humana

1.3.1 Etapas de la digestión

Para entender las etapas que componen el proceso de digestión humana, es necesario tener presente que el concepto digestión hace referencia al proceso de descomponer las estructuras y matrices de los alimentos, para permitir la liberación de nutrientes individuales que pueden ser absorbidos a través de la pared del tracto gastrointestinal (GIT) (Singh & Gallier, 2014). Para ello, la digestión implica dos procesos principales que ocurren de manera simultánea: (i) la transformación mecánica, mediante la cual los trozos más grandes de alimentos se descomponen en partículas más pequeñas; y (ii) la transformación enzimática, mediante la cual diferentes enzimas descomponen las macromoléculas en moléculas más pequeñas facilitando su absorción en el torrente sanguíneo (Lucas-González et al., 2018).

De este modo, la matriz alimentaria actúa como un regulador en la liberación de nutrientes a medida que se va desintegrando durante el proceso de digestión, influyendo por tanto, en la digestibilidad y biodisponibilidad de los nutrientes (Chang, 2019). Dada esta relación entre la matriz de un alimento y su forma de descomposición a través del GIT, es necesario entender el proceso por el que pasan los alimentos durante su digestión para diseñar alimentos con propiedades específicas que satisfagan las necesidades del mercado (Norton et al., 2007).

El GIT representa la interfaz más grande entre nuestro cuerpo y el medio ambiente, al estar conformado por la cavidad oral, el esófago, el estómago, el intestino delgado (duodeno, yeyuno e íleon), el intestino grueso (colon ascendente, transverso y descendente), el recto y el ano (Singh & Gallier, 2014; Verhoeckx et al., 2015). Sin embargo, las principales etapas o fases del GIT son las siguientes:

- **Fase oral**

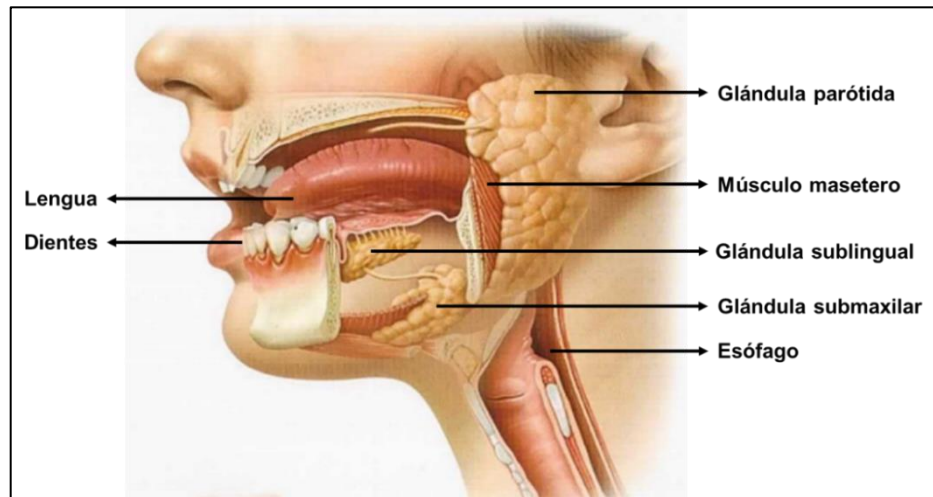
El objetivo principal de esta fase es transportar el alimento a través de la boca hasta la faringe y preparar un bolo con los criterios necesarios para ser tragado. Este proceso es particularmente importante ya que la percepción sensorial de la textura de los alimentos ocurre principalmente a partir de las sensaciones derivadas durante el procesamiento oral de los alimentos y se relaciona con la degradación progresiva del producto durante la masticación (Malone et al., 2003).

Los alimentos ingresan al sistema digestivo a través de la primera unidad del GIT, la boca; donde principalmente los sólidos y semisólidos comienzan su digestión al ser procesados mecánica y bioquímicamente (Singh & Gallier, 2014). Es así, cómo a través del proceso mecánico de la masticación ejercida en conjunto por los dientes y músculos faciales, los alimentos se van desintegrando en pequeñas partículas a la vez que se van mezclando con saliva, dando inicio a: (i) la digestión química por acción de la α -amilasa

cuando se trata de alimentos con almidón, hidrolizándose parcialmente las moléculas de amilosa y amilopectina; (ii) al enfriamiento o calentamiento de los alimentos hasta alcanzar la temperatura corporal (37°C); y (iii) a la formación del bolo alimenticio (Brownlee, 2014; Singh & Gallier, 2014).

La saliva corresponde a un fluido biológico complejo que contiene enzimas salivales como la α -amilasa y anhidrasa carbónica. Este fluido secretado por las glándulas salivales que se encuentran alrededor de la boca, como se muestra en la Figura 6, se encarga de lubricar los alimentos facilitando su masticación y posterior deglución (Singh & Gallier, 2014).

Figura 6. Esquema de la cavidad oral y sus principales anexos.



Fuente: Chaplin (2001)

Si bien, el tiempo de residencia de los alimentos depende de su naturaleza, los alimentos sólidos y semisólidos son desintegrados hasta alcanzar un tamaño lo suficientemente pequeño como para ser tragados fácilmente;

mientras que los líquidos tienden a tragarse rápidamente, mezclándose ligeramente con saliva (Singh & Gallier, 2014).

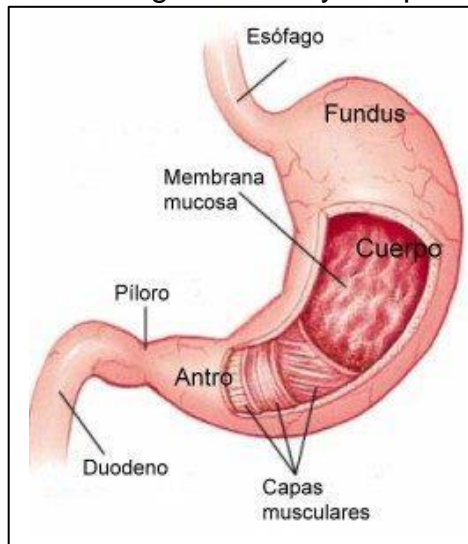
Esta fase determina la estructura física y propiedades del bolo alimenticio; lo que a su vez será determinante en la variabilidad de su comportamiento digestivo subsiguiente (Gidley, 2013).

- **Fase gástrica**

Al finalizar la fase oral, el bolo alimenticio es transportado a través del esófago hasta el estómago, donde comienza la fase gástrica de la digestión. (Verhoeckx et al., 2015).

El estómago es un órgano muscular en forma de J, compuesto por cuatro partes: fundus, cuerpo, antro y píloro, como se muestra en la Figura 7. Las principales funciones de este órgano son: (i) almacenar temporalmente los alimentos en forma de bolos alimenticios, (ii) propiciar un ambiente ácido que inhiba el crecimiento microbiano, (iii) liberar gradualmente su contenido hacia el intestino delgado a través del píloro y (iv) procesar los bolos alimenticios mediante la adición de jugos gástricos y movimientos peristálticos de tal manera que facilite su digestión y absorción a nivel de intestino delgado (Aken, 2010; Brownlee, 2014).

Figura 7. Esquema del estómago humano y sus principales componentes.



Fuente: Bembibre (2010)

En estado de ayuno, el estómago se encuentra en reposo y los jugos gástricos poseen un pH basal entre 1-3, los cuales luego de la ingesta de alimentos y dependiendo de la composición de estos, aumentan a pH 5,5 - 7 una vez que hacen su ingreso al estómago, mientras que las capas musculares del estómago, encargadas de controlar el movimiento gástrico, se relajan y aumenta el volumen intraluminal dentro del estómago permitiendo una mayor ingesta de alimentos. A medida que los bolos alimenticios continúan ingresando al estómago, la distensión gástrica promueve una mayor relajación de los músculos. Luego, por contracción en el antro y el cuerpo del estómago comienzan los movimientos peristálticos que mezclan los alimentos sólidos ingeridos con los jugos gástricos, descomponiéndolos en partículas más pequeñas por acción mecánica, química y enzimática, dando origen a

una pasta cremosa y homogénea denominada quimo; mientras que los líquidos ingeridos son liberados en el duodeno a través del píloro. Finalmente, una vez que el estómago se ha vaciado por completo vuelve a su estado basal, proceso que dura alrededor de 150 minutos (Brownlee, 2014; Singh & Gallier, 2014; Verhoeckx et al., 2015).

Los jugos gástricos debido a su contenido de pepsina son capaces de digerir parcialmente las proteínas, rompiendo los enlaces peptídicos obteniéndose aminoácidos y péptidos más pequeños; mientras que su contenido de lipasa hidroliza alrededor del 10-30% los lípidos ingeridos en ácidos grasos libres y diacilgliceroles (Embleton & Pouton, 1997; Singh & Gallier, 2014).

Finalmente, durante el vaciado gástrico aumenta la frecuencia de las contracciones peristálticas en paralelo al aumento de los casos de relajación del píloro permitiendo el paso de los líquidos al duodeno, mientras que al mismo tiempo se tienden a devolver las partículas más grandes al estómago. Este proceso de vaciado es mediado principalmente por hormonas peptídicas gastrointestinales, como la grelina y el péptido similar al glucagón (GLP-1), siendo la primera el péptido primario que da cuenta de la sensación de apetito al estimular fuertemente las contracciones y el vaciado gástrico, mientras que el segundo péptido es liberado luego de ingerir alimentos promoviendo la sensación de saciedad al inhibir la tasa de vaciado gástrico (Brownlee, 2014; Hellström et al., 2006).

- **Fase intestinal**

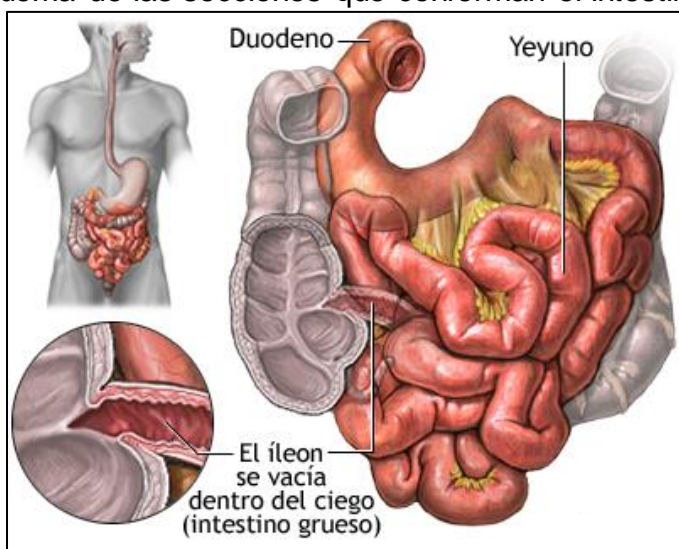
Al finalizar la fase gástrica, el quimo resultante es transportado gradualmente al intestino delgado, el cual consta de tres partes comenzando por el duodeno, seguido por el yeyuno y finalizando en la unión íleocecal, como se muestra en la Figura 8. Es aquí donde se produce la principal digestión, liberación y transformación de nutrientes, siendo además el principal sitio de absorción de los productos finales de la digestión debido a su motilidad y gran superficie resultante de tres niveles de plegamiento anatómico (Chater et al., 2015).

La digestión intestinal es mediada casi en su totalidad por las secreciones exocrinas del páncreas y del hígado. Particularmente, la primera secreción contiene muchas enzimas, como tripsina, lipasa, amilasa pancreática y proteasa; además de contener iones bicarbonato que neutralizan el bajo pH del quimo gástrico entrante, aumentando el pH a valores entre 5-7. Mientras que la segunda secreción contiene sales biliares, fosfolípidos, colesterol, bilirrubina y electrolitos (Chater et al., 2015; Verhoeckx et al., 2015).

En esta fase, la digestión comienza en el duodeno, donde las enzimas digestivas descomponen aún más las proteínas, los lípidos y el almidón, mientras que los ácidos biliares emulsionan y estabilizan los productos de la hidrólisis lipídica formando micelas. Los nutrientes producidos son absorbidos principalmente por los enterocitos presentes en el yeyuno y, en menor medida, en el íleon. Los péptidos, por su parte, pueden seguir degradándose

por acción de las proteasas antes de ingresar al torrente sanguíneo o al sistema linfático; mientras que los nutrientes solubles en agua como algunas vitaminas, son principalmente liberados al torrente sanguíneo, teniendo como destino final el hígado (Singh & Gallier, 2014; Verhoeckx et al., 2015).

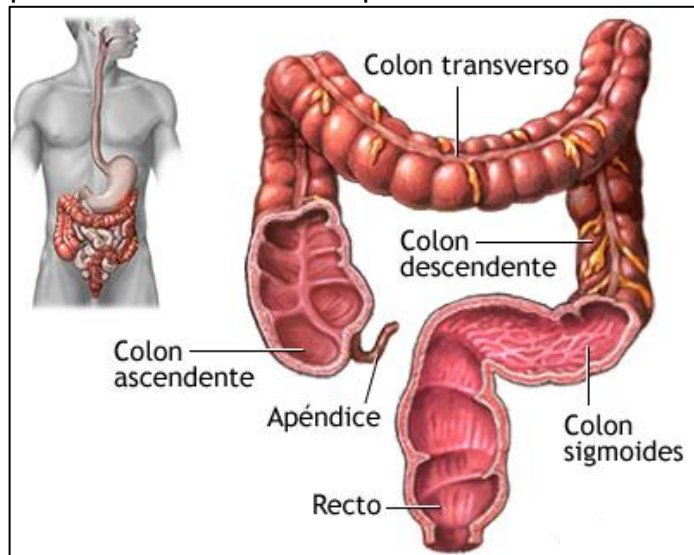
Figura 8. Esquema de las secciones que conforman el intestino delgado.



Fuente: ADAM (2018)

Al finalizar la absorción de nutrientes en el intestino delgado, los compuestos no digeridos continúan su camino hacia el intestino grueso, constituido por el colon ascendente, transverso y descendente como se muestra en la Figura 9. Las principales particularidades del intestino grueso son que su función primordial es la absorción de agua y que concentra la mayor densidad poblacional de bacterias de todo el GIT, la cual puede ser modulada a través de la dieta (Wong et al., 2012).

Figura 9. Esquema de las secciones que conforman el intestino grueso.



Fuente: ADAM (2018)

De acuerdo con Wong et al. (2012) y Singh and Gallier (2014), los compuestos no digeridos son utilizados como fuente de combustible metabólico en la fermentación bacteriana, produciéndose ácidos grasos de cadena corta, principalmente acetato, propionato y butirato, que posteriormente son absorbidos en el colon.

1.3.2 Modelos para estudiar el proceso de digestión

El interés por comprender un proceso tan complejo como la digestión humana mediante diferentes modelos de digestión se ha incrementado debido al vínculo existente entre el desarrollo de alimentos y la salud. En consecuencia, comprobar la eficacia de alimentos o bien de sistemas recientemente desarrollados de administración basados en alimentos (para encapsular, proteger o liberar

componentes específicos), depende directamente de la disponibilidad de modelos de digestión que simulen con precisión los complejos eventos fisicoquímicos y fisiológicos que transcurren en el GIT (Bornhorst et al., 2016; Hur et al., 2011). En base a esto, es posible estudiar el comportamiento de los alimentos durante su digestión mediante la utilización de modelos que pueden ser de tipo *in vivo* o *in vitro*, cada uno con ciertas ventajas y desventajas, detalladas a continuación (Bornhorst et al., 2016).

1.3.2.1 Modelos *In vivo*

De acuerdo con Marcano et al. (2015) y Bornhorst et al. (2016), los modelos *in vivo* son aquellos donde se utilizan animales o humanos como objeto de estudio, entregando resultados más precisos, por lo que son considerados como los métodos “estándar de oro” para resolver interrogantes relacionadas con la dieta, pero desafortunadamente son técnicas con bastantes limitaciones de tipo ética y económicas, así como de tiempo de duración.

La ventaja que ofrecen los enfoques *in vivo* es que los resultados son directamente aplicables al consumo humano. Sin embargo, las variaciones entre individuos pueden conducir a grandes diferencias en las respuestas, lo que hace que la interpretación de los datos sea aún un desafío. Además, la mayoría de los estudios *in vivo* en humanos se centran en las mediciones de punto final, sin considerar los procesos individuales de descomposición o absorción producidos

durante la digestión. Pese a que el conocimiento específico de los mecanismos de digestión puede ser más útil que sólo las mediciones de punto final, rara vez se obtienen durante los estudios *in vivo* debido al muestreo y las limitaciones éticas (Bornhorst et al., 2016; Marcano et al., 2015).

1.3.2.2 Modelos *In vitro*: Dinámicos y estáticos

Idealmente, la digestión de alimentos debiera estudiarse *in vivo* en humanos, pero no siempre es posible desde el punto de vista ético y económico (Bohn et al., 2018). Una alternativa útil a estos complejos métodos son los modelos simples de digestión *in vitro*, donde se simulan las condiciones fisiológicas del GIT, considerando la presencia de enzimas digestivas y sus concentraciones, pH, tiempo de digestión, concentraciones de sales, entre otros factores (Marcano et al., 2015; Verhoeckx et al., 2015).

No es de extrañar que estos modelos sean a menudo utilizados por la comunidad científica para predecir resultados de la digestión *in vivo*. Sin embargo, esto depende de la complejidad de los modelos *in vitro* y su sintonía para responder preguntas específicas relacionadas con la fisiología humana (Bohn et al., 2018; Marcano et al., 2015).

Los modelos *in vitro* en comparación con los *in vivo*, poseen las ventajas de ser menos costosos, es posible obtener resultados en un menor tiempo, son menos laboriosos, no cuentan con restricciones éticas, es posible analizar grandes

cantidades de alimentos y estudiar los mecanismos de los procesos, contrario a las mediciones de punto final de los métodos *in vivo*. Además, permiten la reproducibilidad de ensayos, la elección de condiciones controladas y un fácil muestreo en los sitios de interés. (Bornhorst et al., 2016; Minekus et al., 2014). Por el contrario, dentro de las desventajas está la difícil misión de simular con precisión el complejo entorno fisicoquímico del GIT, puesto que los valores fisiológicos, por ejemplo, del pH o concentraciones de enzimas, pueden variar considerablemente entre diferentes individuos. Además, los tiempos específicos, el pH, el contenido y concentración de enzimas, presencia o ausencia de fuerzas físicas, varían entre cada modelo *in vitro*, lo que dificulta la comparación de resultados entre diferentes estudios (Bornhorst et al., 2016). Debido a esta compleja situación, es que Minekus et al. (2014) a través de Infogest, grupo conformado por un red internacional de investigadores, provenientes de 32 países, orientados a la realización de investigaciones básicas multidisciplinarias relacionadas con la digestión de alimentos, centrados en tres principales objetivos científicos: i) identificar los componentes alimentarios beneficiosos/perjudiciales para la salud, ii) demostrar el efecto de estos componentes beneficiosos y por último, iii) promover la armonización de los modelos de digestión utilizados actualmente; han propuesto un método *in vitro* estandarizado facilitando la comparación de resultados entre diferentes grupos de investigación (Verhoeckx et al., 2015).

Estos sistemas de simulación han permitido evaluar la influencia de las condiciones de digestión y llevar a cabo estudios sobre el efecto positivo o negativo de la estructura de los alimentos, su composición, factores dietéticos y procesamiento de alimentos sobre la bioaccesibilidad de nutrientes y compuestos bioactivos, para establecer el valor nutricional de los alimentos, contribuyendo a mejorar la formulación o diseño de ellos (Verhoeckx et al., 2015).

El desarrollo de sistemas *in vitro* van desde sistemas estáticos únicos hasta sistemas multi-compartimentales y dinámicos, difiriendo entre sí en diferentes parámetros, pudiendo incluir la fase oral, gástrica y/o intestinal; y en algunos casos simular la fermentación que ocurre en el intestino grueso, dependiendo del propósito del estudio (Lucas-González et al., 2018). Otras variaciones importantes entre modelos es la composición química de las soluciones digestivas utilizadas en cada fase, perfil de flujo, magnitud y dirección de tensiones aplicadas, entre otros (Hur et al., 2011).

- **Modelos *in vitro* dinámicos**

Los principales factores que se abordan de diferentes maneras en los diseños de los sistemas dinámicos son la geometría (alineación horizontal y/o vertical del diseño gastrointestinal), la bioquímica (secreciones digestivas agregadas a los compartimentos del modelo a lo largo del tiempo) y las fuerzas físicas (simuladas mediante rodillos o agua). En el caso de algunos modelos más avanzados se ha incluido una geometría diseñada para representar el fundus

y el antro del estómago, y/o el duodeno; haciendo posible la simulación de las fuerzas físicas ejercidas a través del GIT y la modificación de las condiciones en cada compartimento conforme va transcurriendo el tiempo, tal como ocurre *in vivo* (Lucas-González et al., 2018).

Al momento de diseñar un modelo dinámico es necesario considerar las diferentes formas, tamaños y orientaciones de los distintos compartimentos del GIT, siendo lo más relevantes el gástrico y el intestinal. Para que estos diseños sean fisiológicamente relevantes, deben estar además correctamente programados mediante el ingreso de información clave en el software asociado como, por ejemplo, el tiempo de vaciado gástrico, el cual dependerá en gran medida de las propiedades del alimento (viscosidad, estructura), la evolución del pH, por mencionar algunos. De esta manera, se estará considerando que las condiciones fisicoquímicas de los diferentes compartimentos evolucionan en el tiempo como ocurre *in vivo* (Dupont & Mackie, 2015; Verhoeckx et al., 2015).

- **Modelos *in vitro* estáticos**

Los sistemas de digestión *in vitro* estáticos, también conocidos como métodos bioquímicos, pretenden simplificar un proceso fisiológico altamente complejo y dinámico en el que la peristalsis, la secreción de enzimas, el vaciamiento gástrico y los procesos de absorción, entre otros; tienen una gran influencia en el destino de la desintegración de los alimentos (Egger et al., 2017). Dicha

simplicidad radica en que estos modelos utilizan un conjunto único de condiciones iniciales (pH, concentraciones de enzimas, sales biliares, etc.) en cada fase gastrointestinal simulada, las que a su vez están condicionadas por el propósito del estudio, composición de la muestra y/o componentes del alimento estudiado (Lucas-González et al., 2018; Minekus et al., 2014; Verhoeckx et al., 2015).

No obstante, a pesar del potencial de estos métodos simplistas, con frecuencia no logran reproducir de manera precisa las condiciones *in vivo* más complejas, donde el entorno bioquímico está cambiando continuamente y los parámetros físicos como el corte y las fuerzas de molienda pueden tener un gran impacto en la descomposición de partículas de alimentos y la liberación de nutrientes (Golding & Wooster, 2010; Lucas-González et al., 2018); así mismo, tampoco es posible evaluar la cinética de transporte, ni la absorción de nutrientes. Por otro lado, estos modelos carecen de mucosa intestinal y movimientos peristálticos, incluyendo todos sus procesos reguladores, en particular el control hormonal y nervioso (Verhoeckx et al., 2015).

A pesar de sus desventajas, los modelos estáticos han sido utilizados para abordar temas tan diversos como la digestibilidad y bioaccesibilidad y, en menor grado, para evaluar el desarrollo de la viscosidad o la gelificación a nivel gástrico (Marcano et al., 2015). Ha sido tal su uso, que el 89% de los sistemas *in vitro* realizados han sido de tipo estáticos, viéndose necesaria la

estandarización de un método, acción que fue realizada por Infogest, quienes propusieron un método armonizado con parámetros y condiciones definidas, considerando tres fases o etapas sucesivas: oral, gástrica e intestinal. En cada fase el alimento debe ser incubado por un tiempo, temperatura, pH y fluido digestivo simulado determinado (Lucas-González et al., 2018; Minekus et al., 2014).

1.3.3 Proceso de digestión de hidrocoloides como fibras dietarias

Independiente de la definición de fibra dietaria, es importante señalar que este término engloba un amplio espectro de compuestos, con estructuras moleculares y propiedades fisicoquímicas diferentes. Si bien la ingesta de fibra se ha asociado con resultados positivos frente a diversas enfermedades crónicas no transmisibles, la acción exacta a través de la cual producen estos efectos aún no se ha logrado determinar del todo. Sin embargo, se sabe que las fibras pueden alterar la velocidad de digestión dependiendo de su composición química y propiedades físicas, como la viscosidad (Brownlee, 2014; Lamghari El Kossori et al., 2000).

A grandes rasgos, las fibras son capaces de mantener su forma polimérica durante la digestión al ser resistentes a la degradación enzimática; por tanto, su comportamiento a través del tracto gastrointestinal depende de sus propiedades poliméricas, ejerciendo influencia en diversos aspectos como la velocidad de paso de la ingesta, residencia gástrica, velocidad de la digestión, posible

liberación de micronutrientes y productos finales de la fermentación en el intestino grueso (Gidley, 2013).

Si bien los efectos y comportamientos de las fibras están dados en gran parte por su composición, también influyen las condiciones a las que son sometidas. Es así, como en cada una de las principales etapas del GIT se presentan los siguientes panoramas:

- **Digestión oral**

La fibra dietaria juega un rol clave en la textura de alimentos de origen vegetal y en aquellos donde han sido añadidas, lo que a nivel GIT se traduce en un mayor tiempo de residencia del alimento en la boca, producto de un aumento en la cantidad de veces que éste es masticado. Dicho tiempo de residencia, además se correlaciona con un aumento en la viscosidad del bolo alimenticio, influyendo en sus propiedades adhesivas y lubricantes, por lo tanto, las fibras pueden determinar la estructura física y las propiedades del material del bolo alimenticio formado (Brownlee, 2014; Gidley, 2013).

- **Digestión gástrica**

En esta fase, el comportamiento de mezcla, dilución y transporte de los alimentos en el estómago viene dado por las propiedades que los hidrocoloides le otorgan al bolo alimenticio (Gidley, 2013). En general, mientras mayor sea la viscosidad y la solubilidad de los hidrocoloides en agua,

o su capacidad para formar geles, mayor es el tiempo de vaciamiento gástrico. Por ejemplo, algunos hidrocoloides al tener la característica de gelificar en las condiciones ácidas del estómago aumentan el tiempo de vaciado gástrico, prolongan el tiempo de suministro de nutrientes y aumentan la sensación de saciedad (Brownlee, 2014; Gidley, 2013; Lamghari El Kossori et al., 2000).

- **Digestión intestinal**

Puesto que la estructura física de los alimentos estimula los músculos que controlan el movimiento peristáltico, la inclusión de hidrocoloides en la dieta tiende a modificar la velocidad de paso de los alimentos y su digestión enzimática. Este aumento en la viscosidad tiene a su vez un efecto encapsulante, lo que restringe el acceso de las enzimas al sustrato inhibiendo directamente la actividad enzimática a través de la unión específica del sitio (Tharakan et al., 2010). Como consecuencia, la absorción de nutrientes en el intestino delgado se prolonga, dando lugar a una fase prolongada de retroalimentación hormonal desde el duodeno, íleon terminal y colon, lo que lleva a un retraso en el vaciamiento gástrico, conocido como freno ileal, limitando las pérdidas de nutrientes hacia el intestino grueso (Brownlee, 2011; Chater et al., 2015; Gidley, 2013).

No solo la absorción de nutrientes derivados de los alimentos puede verse afectada por los hidrocoloides, sino que también, la reabsorción y el reciclaje

de sales biliares se ve limitada, pasando directo al intestino grueso para ser parcialmente excretadas, por lo que para su reposición mediante biosíntesis se recurre al colesterol, disminuyendo su contenido en la sangre (Brownlee, 2011; Gidley, 2013).

Otro rol potencial asociado a la ingesta de hidrocoloides, es la estimulación de las funciones inmunitarias, beneficiando el potencial protector de la barrera del moco intestinal (Brownlee, 2011).

- **Intestino grueso**

Finalmente, los macronutrientes que resisten la digestión en el estómago e intestino delgado pasan hacia el intestino grueso, donde el ambiente es dominado por la presencia de grandes cantidades de bacterias y caracterizado por una velocidad de paso más lenta (Gidley, 2013).

La fibra dietaria al ser el principal componente del peso seco de la digesta que llega al ciego, desempeña un papel importante en la cantidad y diversidad de bacterias que habitan en el intestino grueso. Esto se debe a que las bacterias requieren de enzimas para romper los enlaces sacáridos de las fibras, afectando la dinámica de la población de la microflora intestinal; de esta manera, la presencia de cualquier fibra fermentable (ejemplo: pectinas), conducen a un aumento en los niveles de bifidobacterias y lactobacilos en la microflora, bacterias encargadas de fermentar polisacáridos principalmente a acetato, propionato y butirato (Brownlee, 2011; Topping & Clifton, 2001).

Por otro lado, la estructura química de los hidrocoloides es importante para determinar la velocidad y los productos de fermentación. En general, los hidrocoloides mientras mayor es su solubilidad, mayor es su velocidad de fermentación, mientras que cuanto más condensados estén los sólidos en el intestino grueso, más lenta será su fermentación (Gidley, 2013).

En base a lo antes mencionado, la presente investigación tuvo como objetivo estudiar comparativamente los efectos de la digestión sobre las propiedades físicas de hidrocoloides (FDS) estructuralmente diferentes, sometiéndolos a un sistema de digestión *in vitro* estático con condiciones controladas, simulando la etapa oral, gástrica e intestinal del sistema digestivo humano.

1.4 Hipótesis

Los hidrocoloides (FDS) capaces de formar soluciones viscosas a bajas concentraciones poseen la aptitud de mantener sus características físicas y propiedades reológicas a través del proceso de digestión humana, conservando sus propiedades funcionales.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Estudiar y evaluar comparativamente los cambios físicos producidos durante la digestión de algunos hidrocoloides mediante el estudio de un sistema de digestión *in vitro*.

1.5.2 Objetivos específicos

- Caracterizar cuatro hidrocoloides estructuralmente diferentes (mucílago de semilla de chia, pectina, goma xanthan y goma guar) en función de su capacidad de adsorción y absorción de agua, capacidad de retención de agua, aceite y solubilidad.
- Evaluar comparativamente los cambios de viscosidad producidos en cada etapa del proceso de digestión *in vitro* para cada hidrocoloide estudiado.
- Analizar comparativamente el grado de fragmentación y/o agregación ocurridos en cada hidrocoloide durante el proceso de digestión *in vitro*.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Materias primas

Los hidrocoloides utilizados en este estudio fueron la goma guar (G4129, Sigma-Aldrich), goma xanthan (G1253, Sigma-Aldrich), pectina de manzana de alto metoxilo (93854, Sigma-Aldrich) y mucílago de semilla de chia (Benexia, Functional Product Trading S.A.). Este último se extrajo hidratando la semilla con agua destilada en una proporción de 1:40 a temperatura ambiente (25°C), con agitación constante durante 2 horas. Luego, la suspensión acuosa se extendió sobre una bandeja de secado y expuso a una temperatura de 50°C durante toda la noche. Una vez deshidratada la suspensión, el mucilago se obtuvo separándolo de la semilla mediante un tamiz de malla 40 (Muñoz et al., 2012).

Para llevar a cabo los ensayos de digestión *in vitro* se utilizaron las enzimas α -amilasa de saliva humana (EC 3.2.1.1, Type XIII-A, A1031, Sigma-Aldrich), pepsina de mucosa gástrica porcina (EC 3.4.23.1, P6887, Sigma-Aldrich) y pancreatina de páncreas porcino (EC 3.1.1.3, P7545, actividad 8xUSP, Sigma-Aldrich) (Minekus et al., 2014). Además, se utilizó extracto de bilis porcino (B8631, Sigma-Aldrich); y soluciones de HCl 1M (480791, Merck) y NaOH 1M (106469, Merck).

En cuanto a la preparación de los fluidos digestivos se utilizó HCl 6N (110164, Merck) y las siguientes sales: KCl (104936, Merck), KH_2PO_4 (104873, Merck), NaCl (102378, Merck), NaHCO_3 (106329, Merck), $\text{MgCl}_2(\text{H}_2\text{O})_6$ (105833, Merck) y $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ (159504, Merck).

2.2 Caracterización de los hidrocoloides seleccionados

La caracterización de la pectina, goma xanthan, goma guar y mucilago de semilla se chia se realizó mediante de la determinación en triplicado de las siguientes propiedades fisicoquímicas: Capacidad de absorción y adsorción de agua, capacidad de retención de agua y aceite, solubilidad.

2.2.1 Capacidad de absorción de agua (WA_bC)

La capacidad de absorción de agua se determinó de acuerdo al método AACC 88-04 (AACC, 1995). Para ello muestras de 0,1 g de cada hidrocoloide fueron hidratadas con agua destilada bajo constante agitación hasta llegar a su punto de saturación (aproximadamente 5 ml). Luego, para obtener los valores de WA_bC , se dispusieron nuevamente 0,1 g de cada hidrocoloide, pero esta vez en 4 tubos distintos, a los cuales se les adicionó $\pm 0,1$ ml y $\pm 0,5$ ml respecto de los 5 ml de saturación. Al cabo de 2 minutos de agitación, las soluciones fueron centrifugadas en una centrífuga digital (modelo DSC-200SD, marca Digisystem Laboratory Instruments Inc.) a 2000 x g durante 10 minutos. Una vez transcurrido el tiempo, el sobrenadante fue descartado y las muestras hidratadas fueron

pesadas. Posteriormente, el promedio de agua absorbida fue determinado y WA_{bC} se calculó de acuerdo con la Ecuación 1, expresándose como g de agua absorbida por g de muestra.

$$WA_{bC} = \frac{W_s - 0,1}{0,1} \quad (1)$$

Donde, W_s es el peso de las muestras hidratadas sin sobrenadante.

2.2.2 Capacidad de retención de agua (WHC) y aceite (OHC)

La capacidad de retención de agua y aceite se determinó de acuerdo al método descrito por Timilsena et al. (2016). Para ello se prepararon soluciones de 0,25 g de cada hidrocólide en 10 ml de agua destilada o aceite comercial de girasol (densidad: 0,92g/ml; Natura Oil, Chile) respectivamente, las cuales se mantuvieron bajo agitación constante durante 2 horas. Finalizado el tiempo, las soluciones se dejaron reposar una noche a temperatura ambiente (25°C) para una completa hidratación. Posteriormente, las soluciones se centrifugaron a 1600 x g por 10 minutos, el sobrenadante se descartó y las muestras residuales fueron pesadas. Finalmente, WHC y OHC se calcularon de acuerdo con la Ecuación 2, expresándose como g de agua absorbida (g de aceite) por g de muestra.

$$WHC / OHC = \frac{W_s - W_0}{W_0} \quad (2)$$

Donde, W_s es el peso del residuo sin sobrenadante y W_0 es el peso de la muestra inicial.

2.2.3 Solubilidad

La solubilidad se determinó siguiendo el método descrito por Cortés-Camargo et al. (2018). Primero se prepararon soluciones al 1% p/p de cada hidrocoloide en un volumen de 10 ml de agua destilada y se mantuvieron bajo agitación por 30 minutos a 30, 60, 70 y 80°C en un baño termorregulado (modelo NB-304, marca N-Biotek). Posteriormente, las soluciones fueron centrifugadas a 2000 x g durante 15 minutos. Del sobrenadante obtenido, se extrajeron alícuotas de 3 ml, las cuales que fueron secadas a 125°C durante una noche en una estufa de aire por convección (modelo BOV-V70F, marca BioBase). Una vez deshidratadas las alícuotas sus pesos fueron registrados y la solubilidad fue calculada mediante la Ecuación 3, expresándose los resultados como porcentaje.

$$\% \text{ Solubilidad} = \frac{W_f}{W_i} * \frac{10}{3} * 100 \quad (3)$$

Donde, W_f es el peso final de la alícuota y W_i es el peso inicial del hidrocoloide.

2.2.4 Capacidad de adsorción de agua (WA_dC)

La capacidad de adsorción de agua se determinó introduciendo 0,1 g de cada hidrocoloide en un desecador a temperatura ambiente (25°C) con una humedad relativa del 98% regulada por una solución saturada de sulfato de potasio. Una vez que las muestras alcanzaron peso constante, se pesaron y la adsorción se obtuvo por diferencia de pesos, expresándose como g de agua por g de muestra (Segura-Campos et al., 2014).

2.3 Protocolo de digestión *in vitro*

Para poder estudiar comparativamente los cambios físicos producidos en los hidrocoloides seleccionados durante su respectiva digestión, se realizaron ensayos de digestión *in vitro* simulando la fase oral, gástrica e intestinal, siguiendo el modelo estandarizado de digestión *in vitro* estático para alimentos propuesto por el grupo de investigadores Infogest.

2.3.1 Preparación de fluidos digestivos simulados

De acuerdo con el protocolo armonizado de digestión *in vitro* estático de Infogest descrito por Minekus et al. (2014), para simular los fluidos gastrointestinales incorporados en el proceso de digestión de los hidrocoloides se preparó fluido salival simulado (SSF), fluido gástrico simulado (SGF) y fluido intestinal simulado (SIF), ajustando sus valores pH a 7, 3 y 7, respectivamente.

Estos fluidos digestivos simulados fueron elaborados a partir de soluciones stock con una concentración específica de electrolitos para cada una de las etapas de digestión *in vitro* basadas en datos humanos *in vivo*, las cuales se presentan en detalle en la Tabla 4; donde se muestran las concentraciones de las distintas sales constitutivas de las soluciones stock para los fluidos simulados oral, gástrico e intestinal.

Tabla 4. Composición de las soluciones stock utilizadas en la elaboración de los fluidos de digestión simulados.

Componentes	Concentración (mol/L)	Concentración en cada solución stock (%v/v)		
		SSF	SGF	SIF
KCl	0,5	3,02	1,38	1,36
KH ₂ PO ₄	0,5	0,74	0,18	0,16
NaHCO ₃	1	1,36	2,5	8,5
NaCl	2	-	2,36	1,92
MgCl ₂ (H ₂ O) ₆	0,15	0,1	0,08	0,22
(NH ₄) ₂ CO ₃	0,5	0,012	0,1	-
HCl	6	0,018	0,26	0,14
H ₂ O	-	94,75	93,14	87,7
Total		100	100	100

Fuente: Minekus et al. (2014)

Finalmente, para completar la elaboración de estos fluidos simulados, fue necesario adicionar enzimas, CaCl₂ y agua a las soluciones stock. Como se muestra en la Tabla 5, el SSF se constituyó con solución stock de SSF, α -amilasa de saliva humana, CaCl₂ 0,3M y agua destilada; el SGF se constituyó con solución stock de SGF, pepsina de mucosa gástrica porcina, CaCl₂ 0,3M, HCl 1M y agua destilada; y finalmente el SIF se elaboró a partir de solución stock de SIF, pancreatina de páncreas porcino, extracto de bilis porcino, CaCl₂ 0,3M, NaOH 1N y agua destilada.

Es importante mencionar que para evitar la precipitación de CaCl₂ y la inactivación de las enzimas, se adicionaron directamente en cada etapa digestiva sobre la mezcla compuesta por la solución stock correspondiente y la dispersión de hidrocoloide.

Tabla 5. Composición de los fluidos de digestión simulados: SSF, SGF y SIF.

Componentes	Composición en %		
	SSF	SGF	SIF
Solución stock	70	75	55
α -amilasa	10	-	-
Pepsina	-	20	-
Pancreatina	-	-	25
Bilis	-	-	12,5
CaCl ₂ 0,3M	0,5	0,05	0,2
HCl 1M	-	2	-
NaOH 1N	-	-	0,75
H ₂ O	19,5	2,95	6,55
Total	100	100	100

Fuente: Minekus et al. (2014)

2.3.2 Preparación de las dispersiones de hidrocoloides

Las muestras de cada hidrocoloide (FDS) fueron dispersadas en agua destilada a temperatura ambiente (25°C) en concentraciones baja, media y alta en triplicado, tal como se indica en la Tabla 6. Posteriormente se sometieron a agitación constante durante 2 horas.

Tabla 6. Concentración baja, media y alta para cada solución de hidrocoloide.

Hidrocoloide	Concentración (% p/p)		
	Baja	Media	Alta
Pectina HM	1	2	4
Goma guar	1	2	3
Goma xanthan	0,3	0,5	1
Mucilago de chia	0,3	0,5	1

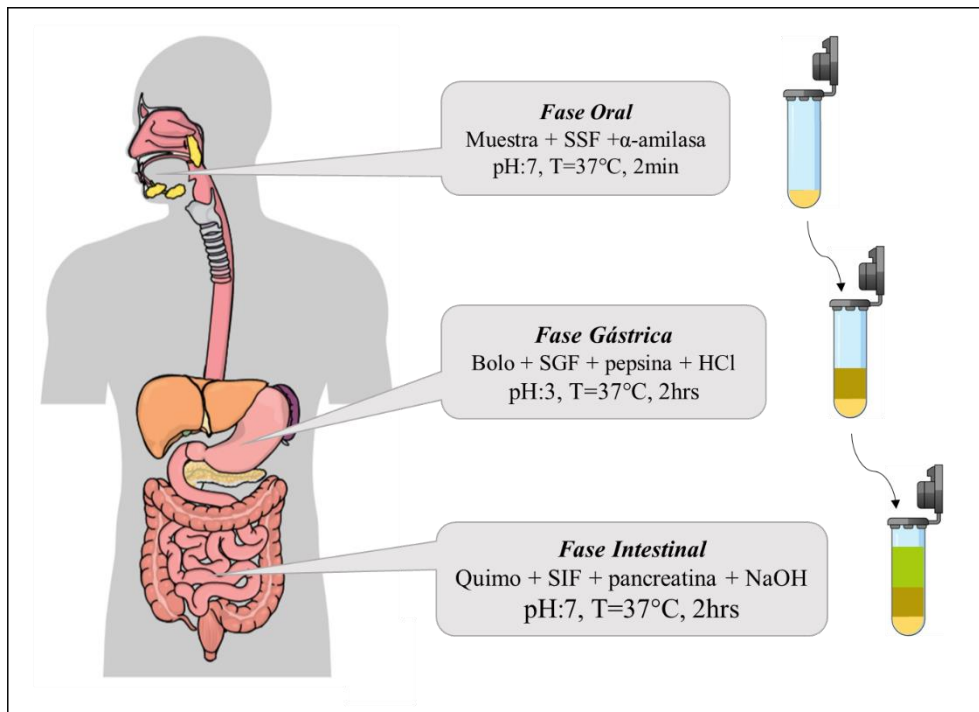
2.3.2 Procedimiento de digestión *in vitro* estática

Una vez preparadas las soluciones stock para cada uno de los fluidos digestivos simulados y las dispersiones de hidrocoloides (muestras), se procedió en triplicado y de manera secuencial como se muestra en la Figura 10 y explica a continuación (Minekus et al., 2014):

- *Fase oral:* Dentro de un tubo Falcon de 50 ml se mezclaron 5 ml de cada muestra con 3,5 ml de solución stock de SSF, 0,5 ml de solución de α -amilasa de saliva humana (1500 U/ml preparada en solución stock de SSF), 0,025 ml de CaCl_2 0,3 M y 0,975 ml de agua destilada, para obtener una relación final de 50:50 v/v, llegando a un volumen total de 10 ml. Luego, el bolo de la fase oral se ajustó a pH 7 e incubó durante 2 minutos a 37°C en un baño termostático con agitación constante.
- *Fase gástrica:* Sobre el bolo resultante de la fase oral se adicionó 7,5 ml de solución stock de SGF, 2 ml de solución de pepsina de mucosa gástrica porcina (2000 U/ml preparada en solución stock de SGF), 0,01 ml de CaCl_2 0,3M, 0,2 ml de HCl 1M para ajustar el pH a 3 y 0,3 ml de agua destilada, obteniéndose así una relación de 50:50 v/v, llegando a un volumen final de 20 ml. Luego, la mezcla se incubó nuevamente a 37°C durante 2 horas con agitación constante.
- *Fase intestinal:* Una vez terminada la fase gástrica, a la digesta resultante se adicionó 11 ml de solución stock de SIF, 5 ml de solución de pancreatina (800

U/ml preparadas en solución stock SIF), 0,04 ml de CaCl_2 0,3 M, 0,15 ml de NaOH 1 M para ajustar el pH a 7,0, 1,31 ml de agua destilada y por último, se adicionaron 2,5 ml de solución de extracto de bilis porcino preparado en solución stock de SIF, obteniéndose una relación final de 50:50 v/v y volumen total de 40 ml. Finalmente, la mezcla se incubó a 37°C durante 2 horas con agitación constante.

Figura 10. Diagrama del procedimiento de digestión *in vitro* y sus condiciones.



Una vez concluida cada una de las fases digestivas de la simulación *in vitro*, las muestras digeridas fueron enfriadas rápidamente a una temperatura de -5°C introduciéndolas en un baño de hielo, deteniendo la digestión, para luego realizar los análisis respectivos durante el mismo día.

2.4 Análisis del comportamiento reológico

El comportamiento reológico de las muestras antes y después de cada etapa de digestión se evaluó mediante una prueba de cizallamiento constante utilizando un reómetro rotacional (modelo RheolabQC, marca Anton Paar GmbH, Austria) (Alpizar-Reyes et al., 2018), equipado con un cilindro concéntrico de doble separación y un dispositivo de temperatura Peltier a 37°C, simulando la temperatura corporal. La viscosidad aparente y la velocidad de deformación para cada muestra se determinó en triplicado, aplicando un rango de cizallamiento creciente de 0,1 a 100s⁻¹ con 60 puntos.

Los datos obtenidos fueron ajustados al modelo de Ostwald-de Waele, también conocido como Ley de la Potencia (Ecuación 4), para así determinar el índice de comportamiento de flujo (n) e índice de consistencia (k) (León-Martínez et al., 2011).

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

Donde, η es la viscosidad aparente (Pa·s), k es el índice de consistencia (Pa·s⁻¹), $\dot{\gamma}$ es la velocidad de corte (s⁻¹) y n es el índice de comportamiento de flujo (adimensional).

2.5 Medición de la distribución del tamaño de partículas

La distribución del tamaño de partículas fue determinada para cada dispersión de hidrocoloide antes y después de cada etapa de la digestión *in vitro*, en sextuplicado, mediante un analizador de partículas por difracción láser (Mastersizer 2000, marca Malvern Instrument), con un software Malvern versión 5.6 integrado; utilizando agua a una temperatura ambiente de 25°C, como solvente. Los índices de refracción utilizados fueron 1,330 para el agua y 1,333 para los hidrocoloides.

Finalmente, los resultados se expresaron como $d(0,1)$, $d(0,5)$ y $d(0,9)$, correspondientes a los diámetros máximos del 10, 50 y 90% de las partículas en el volumen total, respectivamente (Noort et al., 2010).

2.6 Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software Statgraphics Centurion XV.I. Los resultados obtenidos en triplicado y sextuplicado, se analizaron mediante ANOVA multifactorial, utilizando el test de Tukey con un nivel de confianza del 95%; mientras que la comparación entre medias se realizó mediante ANOVA de una vía.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de los hidrocoloides (FDS)

La capacidad de absorción de agua (WA_bC), capacidad de retención de agua y aceite (WHC, OHC), capacidad de adsorción de agua (WA_dC) obtenidas para la pectina HM, goma guar, goma xanthan y mucílago de chia se presentan en la Tabla 7; y la solubilidad se expone gráficamente en la Figura 11.

Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de las FDS seleccionadas.

FDS	WA_bC^*	WHC*	OHC*	WA_dC^*
	<i>g H₂O/g muestra</i>	<i>g H₂O/g muestra</i>	<i>g aceite/g muestra</i>	<i>g H₂O/g muestra</i>
Pectina HM	1,51 ± 0,29 a	0,31 ± 0,1 a	2,51 ± 0,06 b	0,42 ± 0,01 a
Goma Xanthan	50,25 ± 0,42 b	39,65 ± 0,1 c	1,76 ± 0,08 a	0,65 ± 0,02 b
Goma Guar	50,19 ± 0,46 b	39,84 ± 0,2 c	1,73 ± 0,05 a	0,48 ± 0,01 c
Mucilago	50,12 ± 0,54 b	33,62 ± 0,6 b	9,06 ± 0,36 c	0,41 ± 0,01 a

(*) WA_dC : Capacidad de adsorción de agua; WA_bC : Capacidad de absorción de agua; WHC/OHC: Capacidad de retención de agua/aceite. Las letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo con el test de Tukey.

Como se observa en la Tabla 7, la pectina HM arrojó valores significativamente más bajos de WA_bC y WHC, en comparación con las demás FDS, quienes a su vez entre ellas no presentaron diferencias significativas. En cuanto a los resultados obtenidos para OHC, la goma xanthan y la goma guar, sin diferencias significativas entre ellas, presentaron los valores menores, seguidos por la

pectina HM y en último lugar, con un valor significativamente más alto, destacó el mucílago de chia. Por otro lado, los resultados más bajos de WA_dC obtenidos por la pectina HM, goma guar y mucílago de chia fueron bastante similares entre sí, a diferencia de la goma xanthan quien presentó un valor significativamente superior.

En los últimos años, la utilización de diferentes polímeros, especialmente fibras dietarias, ha ido en aumento en diversos procesos industriales con el fin de obtener determinadas propiedades en los productos alimenticios finales. Esto se debe principalmente a sus reconocidas propiedades como estabilizantes, espesantes, emulsionantes y agentes gelificantes (Torres et al., 2012). Además de su importancia tecnológica, las fibras tienen un rol importante como constituyentes de la digestión, induciendo a respuestas tanto locales como sistemáticas (Rana et al., 2011). Dichas funcionalidades de las fibras en los alimentos se explicarían por sus propiedades fisicoquímicas, las que a su vez pueden variar considerablemente según su procedencia, por ende, en su peso molecular, composición química, secuencia de monosacáridos, conformación, configuración, tamaño de partículas (Salarbashi & Tafaghodi, 2018).

3.1.1 Capacidad de absorción de agua (WA_bC)

De acuerdo con la Tabla 7, la goma xanthan, la goma guar y el mucilago de chia exhibieron valores de WA_bC similares entre sí y significativamente mayores al 1,51 g H₂O/g muestra observado en la pectina HM ($p < 0,05$). Estos elevados valores de WA_bC, con una magnitud cercana a los 50 g H₂O/g muestra, fueron incluso mayores a los reportados anteriormente por Segura-Campos et al. (2014) con un 44,08 g H₂O/g muestra para el mucílago y por Sciarini et al. (2009) con un 25,77 g H₂O/g muestra para la goma xanthan y un 27,33 g H₂O/g muestra para la goma guar.

La capacidad de absorción de agua es una propiedad fundamental en la textura de los alimentos, la cual depende tanto de la cantidad como de la naturaleza de los sitios disponibles para unirse a las moléculas de agua (Betancur-Ancona et al., 2003; Chau & Huang, 2004). De acuerdo con esto, el comportamiento de las tres fibras con los valores más altos de WA_bC podría deberse principalmente a la presencia de estructuras ramificadas; mientras que el factor decisivo para la ligera variación de WA_bC entre ellas sería producto de las diferentes estructuras helicoidales y lineales de la goma guar, goma xanthan y mucilago de chia (Li et al., 2016).

Por otro lado, el bajo valor de WA_bC de la pectina HM podría deberse a que esta fibra no es estable en soluciones acuosas, ya que depende de diversos factores como: su estructura química, tamaño, temperatura de trabajo y propiedades del

disolvente (pH, fuerza iónica, presencia de co-solutos), sufriendo diferentes modificaciones; por ejemplo, degradación por efecto del aumento de temperatura. Al comparar la pectina HM con las demás fibras, esta posee un peso molecular más bajo y no presenta ramificaciones en su estructura, lo que explicaría su menor WA_bC (Axelos & Branger, 1993; Lopes da Silva & Rao, 2006).

Según Mackie et al. (2016), se ha demostrado que en las fibras esta propiedad fisicoquímica tiene implicancias fisiológicas con importantes beneficios relacionados con la salud y nutrición, por tanto, de acuerdo con los resultados obtenidos la goma xanthan, goma guar y mucílago de chia tendrían una mayor incidencia en las respuesta fisiológicas que la pectina HM.

3.1.2 Capacidad de retención de agua (WHC) y aceite (OHC)

Al observar la Tabla 7, se puede apreciar que la goma guar y la goma xanthan exhibieron los WHC más altos, con valores aproximados cercanos a los 40 g H_2O/g muestra, siendo también mayores a los 25 g H_2O/g muestra reportados por Timilsena et al. (2016) para la goma guar y a los 10 g H_2O/g muestra reportados por Sarkar et al. (2018) para la goma xanthan. Mientras que el mucilago presentó un valor de WHC levemente inferior de 33,6 g H_2O/g muestra, similar a los 35,2 g H_2O/g muestra reportado por Lazaro et al. (2018). Por último, la pectina HM fue la fibra que exhibió el menor valor de WHC con 0,31 g H_2O/g muestra, siendo incluso bastante inferior al 3,8 g H_2O/g muestra reportado por

Boulos et al. (2000). Estos resultados serían reflejo de sus diferentes estructuras y pesos moleculares, donde se puede observar claramente que un alto WHC se asocia a polímeros con un mayor peso molecular y con cadenas altamente ramificadas que poseen grupos hidrofílicos que permiten la oclusión del agua dentro de la estructura del polisacárido (Boulos et al., 2000).

El WHC puede variar en función del grupo funcional de las fracciones del polisacárido que son hidrofílicos, así como también del equilibrio hidrofílico-hidrofóbico de los aminoácidos que conforman la fracción de proteína que puede estar presente en las fibras; o bien, depender de las fracciones de lípidos y carbohidratos que pueden estar asociados a la parte proteica (Jauregui et al., 1981; Sarkar et al., 2018). En este caso, al tratarse de DSF con la particularidad de ser altamente hidrofílicos, el agua es capaz de mantenerse en los sitios hidrofílicos dentro de la misma fibra o ubicarse dentro de los espacios vacíos en la estructura molecular.

De acuerdo con lo expuesto por Cortés-Camargo et al. (2018), la importancia de un elevado WHC radica en que esta característica permitiría utilizar la fibra como modificador de textura, estabilizante y/o agente espesante; por tanto, conforme con los resultados obtenidos la goma xanthan y la goma guar serían las más propicias si se desea modificar reológicamente una matriz alimenticia.

Por su parte, los valores de OHC expuestos en la Tabla 7 muestran que la goma xanthan y la goma guar obtuvieron, sin diferencias significativas entre ellas, los valores más bajos con magnitudes cercanas a los 1,7 g aceite/ g muestra, resultados que son cercanos al 1,1 y 1,8 g aceite/ g muestra, reportados por Sarkar et al. (2018), respectivamente. A estas fibras les siguió la pectina HM con un valor de 2,5 g aceite/ g muestra, similar al 2,59 g aceite/ g muestra reportado por Rodríguez-Gutiérrez et al. (2014), para la pectina cítrica HM. Y por último, el mucílago de chia fue la fibra que exhibió la magnitud más alta de OHC con un 9,1 g aceite/ g muestra, algo inferior a los 11,67 g aceite/ g muestra reportados por Segura-Campos et al. (2014).

Los valores de OHC obtenidos por la goma xanthan y la goma guar son atribuidos a la ausencia de proteína en su estructura, a la cantidad de grupos de hidrofílicos y a su capacidad para formar geles a bajas concentraciones, sitios donde es posible retener el aceite (Cortés-Camargo et al., 2018).

En cuanto al mucílago, la diferencia entre el valor de OHC obtenido y el reportado podría estar dada en gran medida a diferencias en el proceso de extracción del mucílago de la semilla de chia. Sin embargo, estos elevados valores podrían estar relacionados con la presencia de cadenas no polares de los residuos de proteínas solubles (aproximadamente el 11% p/p del mucílago) extraídos de las semillas de chia junto con el mucílago (Segura-Campos et al., 2014).

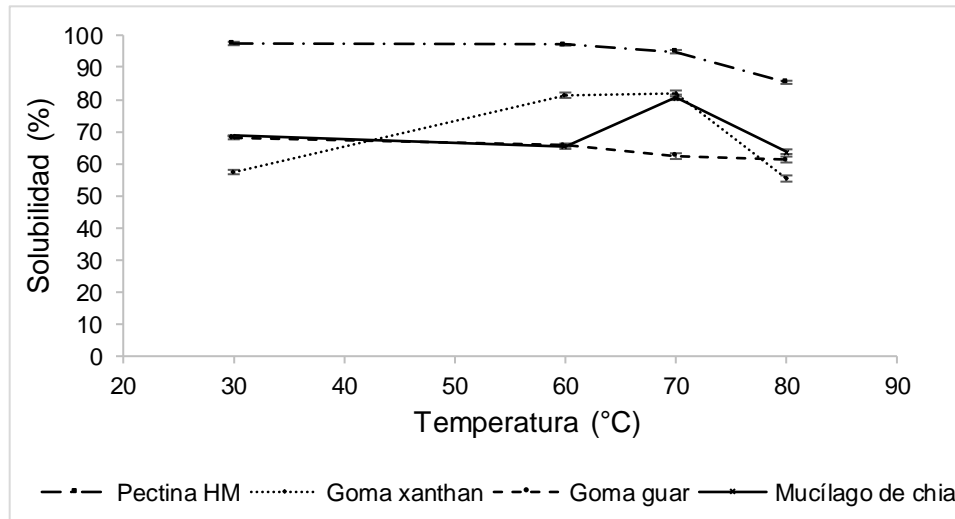
Dado que el OHC es una propiedad funcional que hace referencia al atrapamiento físico de aceite por moléculas como los lípidos y las proteínas, se podría presumir que el mucílago tiene una mayor presencia de estas moléculas debido a los resultados obtenidos.

Conforme a lo expuesto por Cortés-Camargo et al. (2018) y Darwish and El-Sohaimy (2018), una elevada retención de aceite (grasa) se traduce en roles importantes en el procesamiento de alimentos, por tanto el mucílago y en menor grado la pectina de alto metoxilo, serían las fibras indicadas cuando se busque la retención del sabor dentro de una matriz alimentaria y el aumento de la sensación en boca de la misma.

3.1.3 Solubilidad

En esta investigación se evaluó el efecto de una temperatura creciente (30, 60, 70 y 80°C) sobre la solubilidad en agua de la pectina, goma guar, goma xanthan y mucilago de chia, expresándose los resultados como la cantidad de gramos de fibra disuelta en 100 ml de disolvente (%). Los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 11.

Figura 11. Solubilidad de las FDS (%) en función de la temperatura (°C).



Los análisis estadísticos arrojaron que, tanto la goma xanthan como el mucílago dependen significativamente de la temperatura ($p < 0,05$), mientras que la pectina HM y la goma guar no mostraron una dependencia significativa, siendo la pectina HM la fibra que mostró una mayor solubilidad independiente de la temperatura trabajada. Estos resultados concuerdan con lo expuesto por Brown (2010), quien menciona que la solubilidad es una propiedad que puede verse influenciada por diversos factores, entre ellos la temperatura; y que dependiendo de la naturaleza de la fibra, es posible que un aumento en la temperatura permita la disolución de una mayor cantidad del soluto en un solvente, siendo incluso posible llegar a la sobresaturación de la solución si las temperaturas son muy elevadas (Brown, 2010).

Lo antes expuesto se puede apreciar claramente en la Figura 11, donde un aumento en la temperatura desde 60 a 70°C produjo un incremento en la solubilidad de la goma xanthan y el mucílago, pese a que la magnitud de este incremento varió entre muestras con un 0,68% y 23,28%, respectivamente. Este comportamiento podría deberse a la descomposición de los enlaces de H entre las moléculas del mismo polisacárido como consecuencia de un aumento en la temperatura, provocando así la exposición de los grupos OH al agua, aumentando la solubilidad (Sciarini et al., 2009). Adicionalmente se observó que, al sobrepasar los 70°C, la solubilidad de la goma xanthan y del mucílago comienzan a disminuir, alcanzando un máximo de $81,9\% \pm 0,9$ y $80,7\% \pm 0,9$, respectivamente. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Sciarini et al. (2009) y Capitani et al. (2013), quienes obtuvieron valores de solubilidad cercanos al 78% para la goma xanthan y 83% para el mucilago, respectivamente. Este decaimiento probablemente se debe al efecto gelificante asociado a algunos polisacáridos a dicha temperatura (Capitani et al., 2013; Sciarini et al., 2009).

Pese a que una mayor solubilidad se asocia con una mayor ramificación en la estructura polimérica (Sarkar et al., 2018), la pectina HM con una estructura lineal mostró una solubilidad superior a las demás fibras en todas las temperaturas aplicadas, exhibiendo un valor máximo de $97,4\% \pm 0,5$ a los 30°C y un mínimo de $85,3\% \pm 0,5$ a los 80°C. Su elevada solubilidad se debe a la cantidad total de unidades de ácido galacturónico en su estructura, otorgándole una naturaleza de polielectrolito fuerte con un cadena principal cargada negativamente, haciendo

posible que su solubilidad sea mayor; por tanto, polisacáridos con estructura de polielectrolito, serían más solubles que los polisacáridos neutros (Razavi et al., 2016; Salarbashi & Tafaghodi, 2018). Esto concuerda con la Figura 11, donde los polisacáridos aniónicos (goma xanthan, pectina HM y mucílago) presentaron una mayor solubilidad que la goma guar.

En particular la goma guar presentó una solubilidad máxima intermedia en comparación con las demás fibras, con un valor de $68\% \pm 0,5$ a los 30°C , lo que coincide con el cerca del 70% reportado por Sciarini et al. (2009). De acuerdo con Cerqueira et al. (2011); Kontogiorgos (2019); Pollard et al. (2007) y Razavi et al. (2014), este comportamiento se debe a que la proporción de manosa:galactosa (M:G) en polisacáridos galactomananos varía considerablemente dependiendo de su fuente, causando cambios significativos en la solubilidad. En general, mientras mayor es el contenido de ramificaciones de galactosa en el galactomanano, mayor es su solubilidad en agua y menor es la tendencia a formar geles como resultado de las interacciones sinérgicas. Un ejemplo, de sustitución media de galactosa es la goma guar, con una relación de 1,8:1 (M:G), donde la presencia de cadenas laterales de galactosa mantienen a las principales cadenas de manosa lo suficiente como para poder evitar interacciones intermoleculares, proporcionando un impedimento estérico, disminuyendo la cantidad de grupos OH disponibles para la formación de enlaces de H inter y entre cadenas.

Otros factores que pueden incidir en la solubilidad son el pH y los cationes presentes; además, en soluciones que normalmente presentan viscosidad, como es el caso de las fibras, esta propiedad puede verse influenciada por otros factores como el tamaño molecular, la forma y conformación del polímero, incidiendo en su capacidad de auto-asociarse a través de interacciones entre cadenas (Chesson, 2006; Cortés-Camargo et al., 2018). Esto se puede ver claramente en la Figura 11, donde las fibras presentaron diferencias en la solubilidad influenciadas principalmente por su composición estructural.

3.1.4 Capacidad de adsorción agua (WA_dC)

De acuerdo con los resultados de WA_dC expuestos en la Tabla 7, las fibras presentaron diferencias significativas entre ellas ($p < 0.05$), siendo la goma xanthan la que presentó el valor más alto con 0,65 g H₂O/g muestra, seguida por la goma guar con un valor significativamente menor con una magnitud de 0,48 g H₂O/g muestra. Ambos valores obtenidos concuerdan con los 0,64 g H₂O/g muestra y 0,5 g H₂O/g muestra, extrapolados a partir de las isothermas de adsorción de agua reportadas por Torres et al. (2012) para estas fibras, respectivamente.

Por su parte la pectina HM y el mucilago fueron las fibras que, sin arrojar diferencias significativas entre ellas, presentaron los valores más bajos de WA_dC con 0,42 y 0,41 g H₂O/ g muestra, respectivamente. El WA_dC de la pectina HM

concuerta con lo reportado previamente en la bibliografía, encontrándose dentro del rango de adsorción entre 0,3-0,42 g H₂O/g muestra expuesto por Einhorn-Stoll et al. (2015); mientras que el valor obtenido por el mucílago es prácticamente igual al 0,405 g H₂O /g muestra reportado por Velázquez-Gutiérrez et al. (2015) donde se evaluó el mucilago de chia liofilizado a la misma temperatura ambiente (25°C) que en esta investigación. Por otra parte, Segura-Campos et al. (2014) reportó un valor inferior de 0,27 g H₂O/g muestra, este menor WA_dC puede deberse al método de extracción del mucilago utilizado, donde se aplicó temperatura (50°C), menor tiempo de hidratación de la semilla (30 min) y liofilización.

En general, los resultados obtenidos serían producto de la estructura química y composición de cada una de las FDS (Torres et al., 2012). En cuanto a la goma xanthan su mayor higroscopia o WA_dC se puede explicar por la presencia de ácidos glucurónicos y ésteres del ácido acético en su estructura, lo que le otorga una mayor polaridad, por ende, una elevada afinidad por el agua (Torres et al., 2012). En el caso de la goma guar se debe a que es un polímero conformado por monómeros de manosa y galactosa, carentes de grupos ácidos o iónicos en su estructura, por lo que las moléculas de agua se unen mediante enlaces de H a grupos OH presentes en la molécula de esta fibra (Deepak Mudgil et al., 2014; Torres et al., 2012). Respecto a la pectina, el resultado se puede atribuir a su compleja estructura, puesto que al tratarse de una pectina de alto metoxilo la

cantidad de grupos OH disponibles es baja; mientras que la cantidad de grupos metoxilos con característica hidrófoba es mayor (Tsami et al., 1992).

Puesto que la capacidad de adsorción de agua es definida como la capacidad de una estructura para adsorber espontáneamente agua al exponerse a una atmósfera de humedad relativa constante (Segura-Campos et al., 2014), esta propiedad es un factor relevante en la humedad, textura y calidad de los productos alimenticios (Brown, 2010). Según este criterio, el mucílago sería la fibra más idónea para incluir en una matriz alimentaria donde la humedad juega un rol importante en términos de calidad, como es el caso de los productos horneados donde se desea mantener una baja humedad, dado que un aumento de ella disminuye la calidad de los productos, modificando su textura.

3.2 Análisis del comportamiento reológico

Los resultados obtenidos al evaluar la viscosidad aparente y el comportamiento de flujo de las digestiones *in vitro* de diferentes FDS en concentraciones baja, media y alta a 37°C se presentan en la Figura 12, mientras que el índice de consistencia (k) y de comportamiento de flujo (n) ajustados a la Ley de la Potencia (R^2 : 0,855 -1) se exponen en la Tabla 8.

Figura 12. Viscosidad aparente de las FDS durante el proceso de digestión *in vitro*.

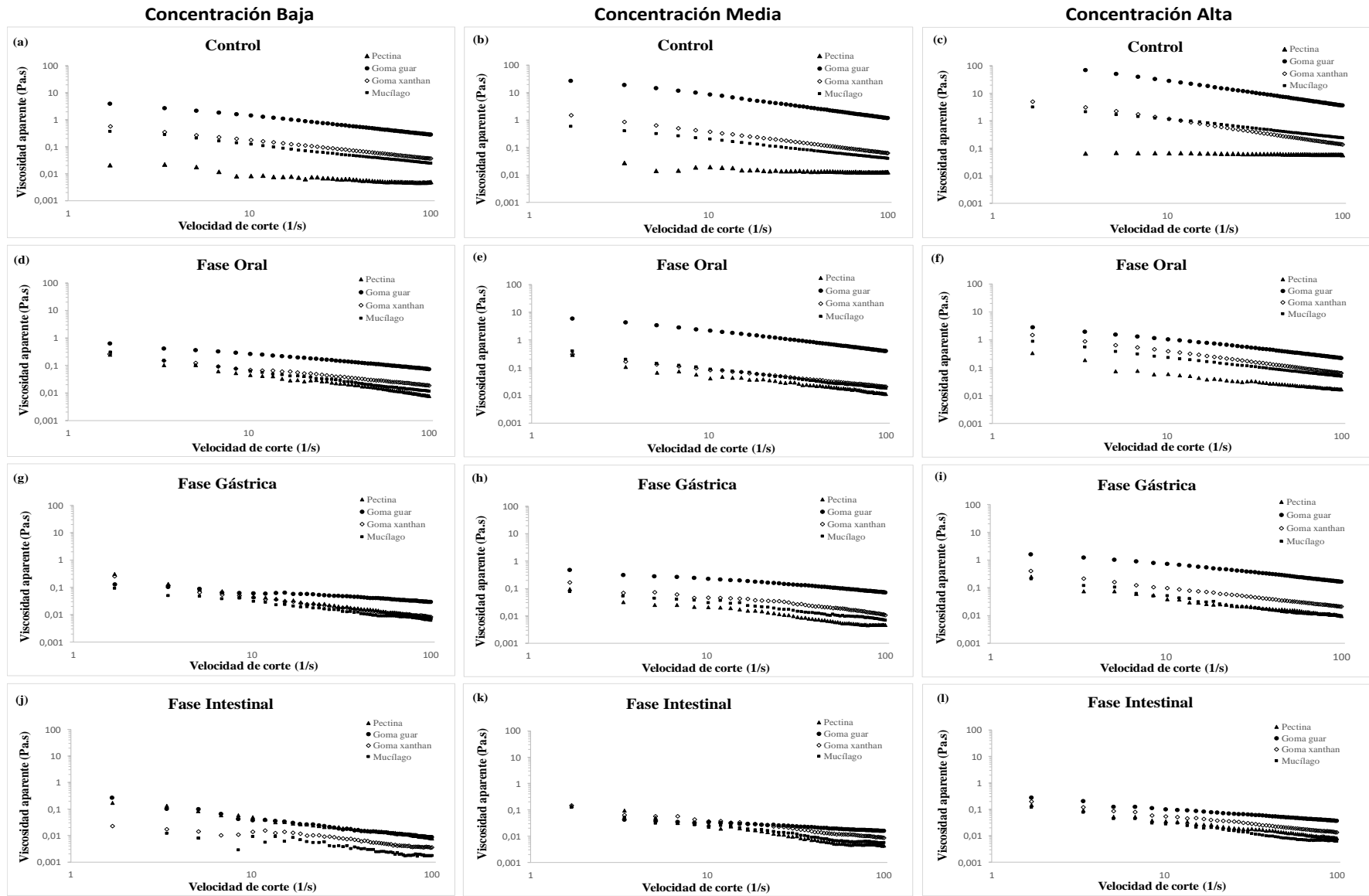


Tabla 8. Parámetros obtenidos del ajuste de resultados a la Ley de la Potencia.

FDS	C* (%)	Control (Antes de digerir)			Después de digerir								
					Oral			Gástrica			Intestinal		
		<i>n</i>	<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>R</i> ²
Pectina HM	1	0.656 a	0.025 c	0.9202	0.236 b	0.381 b	0.9876	0.315 b	0.149 c	0.9910	0.249 a	0.255 a	0.9923
	2	0.785 a	0.032 b	0.6863	0.293 a	0.463 b	0.9775	0.387 a	0.130 b	0.9756	0.163 b	0.179 a	0.9754
	4	0.937 a	0.078 b	0.9846	0.312 b	1.145 c	0.9565	0.301 a	0.227 c	0.9721	0.334 b	0.183 a	0.9931
Goma guar	1	0.318 b	6.632 a	0.9967	0.466 a	0.888 a	0.9969	0.636 a	0.163 bc	0.9736	0.744 a	0.160 a	0.9844
	2	0.171 c	54.798 a	0.9177	0.291 a	10.925 a	0.9953	0.531 a	0.647 a	0.9868	0.672 a	0.072 a	0.9823
	3	0.116 c	215.998 a	0.9681	0.350 ab	4.546 a	0.9952	0.394 a	2.845 a	0.9920	0.556 a	0.289 a	0.9923
Goma xanthan	0.3	0.319 b	0.844 b	0.9994	0.399 a	0.318 b	0.9976	0.249 bc	0.254 ab	0.9880	0.333 a	0.074 b	0.9063
	0.5	0.219 bc	2.283 b	0.9998	0.376 a	0.391 b	0.9983	0.379 a	0.226 b	0.9710	0.351 b	0.185 a	0.9888
	1	0.081 d	9.479 b	0.9076	0.208 c	2.441 b	0.9506	0.314 a	0.507 b	0.9980	0.355 b	0.270 a	0.9960
Mucílago	0.3	0.306 b	0.592 bc	0.9978	0.224 b	0.308 b	0.9970	0.201 c	0.320 a	0.9903	0.178 a	0.069 b	0.9406
	0.5	0.309 b	0.960 b	0.9989	0.363 a	0.235 b	0.9963	0.320 a	0.096 b	0.9839	0.337 b	0.130 a	0.9733
	1	0.339 b	5.173 b	0.9302	0.429 a	0.230 c	0.9991	0.379 a	0.180 c	0.9801	0.278 b	0.160 a	0.9836

(*) Concentración en porcentaje de las diferentes soluciones de hidrocoloides.

Donde, *k* corresponde al índice de consistencia y *n* al comportamiento de flujo. Y las letras muestran diferencias significativas entre las FDS para una concentración

De acuerdo con la Figura 12, se puede observar en términos generales que todas las dispersiones mostraron un comportamiento de flujo similar en las diferentes concentraciones y etapas de digestión evaluadas, exhibiendo un comportamiento no newtoniano; donde, la viscosidad aparente disminuyó conforme la velocidad de cizallamiento o corte fue aumentando, fenómeno que también se conoce como pseudoplasticidad ($n < 1$) o comportamiento de adelgazamiento por cizalla (Gómez-Díaz & Navaza, 2003).

Como era de esperar, las fibras sin digestión (Figura 12a, b, c) mostraron una relación directamente proporcional entre la concentración y la viscosidad (Gómez-Díaz & Navaza, 2003). Esto se refleja con un aumento en el coeficiente de consistencia (k) a medida que aumenta la concentración (Tabla 8). Este comportamiento se explica dado que, a una mayor concentración de sólidos aumenta la restricción del movimiento intermolecular en la zona de congestión molecular, producto de las fuerzas hidrodinámicas, resultando en un aumento de la viscosidad (Lazaro et al., 2018). Bajo este contexto, al comparar las diferentes fibras sin digestión, la goma guar fue quien presentó mayor viscosidad en todas las concentraciones, seguida por la goma xanthan y el mucílago de chia, quienes no arrojaron diferencias significativas entre sí y, por último, con una viscosidad significativamente menor al resto de las fibras, se situó la pectina HM.

En particular, el índice de comportamiento de flujo (n) y el coeficiente de consistencia (k) obtenidos para la goma guar y goma xanthan, previo proceso de

digestión, reflejaron un aumento en la pseudoplasticidad conforme aumentó la concentración, dado que al disminuir n aumentó k . Este comportamiento es similar al observado por Marcotte et al. (2001), quien reportó que la disminución de la viscosidad al aplicar una fuerza de cizalla es un comportamiento típico de estas gomas producto de su asociación intermolecular. En el caso de la goma guar los valores obtenidos de n y k , concuerdan con los reportados anteriormente por Cevoli et al. (2013), mientras que los de la goma xanthan y pectina HM concuerdan con Marcotte et al. (2001); sin embargo los obtenidos para el mucílago de chia fueron inferiores a los reportados por Lazaro et al. (2018), esto se debería a diferencias en la metodología de digestión *in vitro*, así como a diferencias de pH.

En cuanto al proceso de digestión de las diferentes FDS, al comparar la viscosidad aparente de cada una de ellas en las distintas fases digestivas con su respectivo control (Figura 12), se pudo observar que en general la pseudoplasticidad o comportamiento de adelgazamiento por cizalla depende directamente de la concentración, tal como ocurre en el control; sin embargo, a pesar de que las fibras mantienen su comportamiento pseudoplástico, sus viscosidades aparentes disminuyen consecutivamente en cada fase, desde la oral a la intestinal. Esta disminución de la viscosidad se debe principalmente al aumento del volumen total producido por la incorporación secuencial de los fluidos digestivos simulados y en menor grado, y dependiendo de la fibra, a los cambios de pH y/o a la adición de sales biliares; y no sería posible atribuirlo a la

acción de enzimas. Este comportamiento fue similar al descrito previamente por Fabek et al. (2014) y Tamargo et al. (2018).

A nivel oral, la tendencia presentada por las FDS antes de ser digeridas se mantiene, dado que no se produjo una modificación en el comportamiento pseudoplástico y la goma guar sigue siendo la fibra con mayor viscosidad, seguida por la goma xanthan, el mucílago y la pectina HM.

Excepcionalmente, la goma guar a diferencia de las otras fibras, al poseer una carga iónica neutra no se vio afectada por la fuerza iónica del medio; sin embargo, a medida que aumenta su concentración, las condiciones de pH que simulan el ambiente gástrico y duodenal (fase intestinal) produjeron un cambio significativo en el comportamiento reológico, al disminuir notoriamente su viscosidad. Este comportamiento se corrobora al observar una drástica disminución de k durante el proceso de digestión al comparar la concentración más baja (1% p/p) con la más alta utilizada (3% p/p) (Tabla 8), concordante con lo reportado por H. Fabek et al. (2014). Por otro lado, también se observó un notable aumento de n y una marcada disminución de k al comparar la fase gástrica con la intestinal en cualquiera de las concentraciones estudiadas, resultados que coinciden con Dartois et al. (2010). De acuerdo con los estudios previos relacionados con la estabilidad de la goma guar bajo condiciones ácidas y alcalinas reportados por Marcotte et al. (2001), D. Mudgil et al. (2012) y Zhang et al. (2005), el comportamiento observado en esta investigación posiblemente se deba a que la

presencia de ácidos fuertes (como HCl) o álcali podría generar a una despolimerización parcial de la goma guar provocando una disminución en el grado promedio de polimerización, disminuyendo el tamaño de las moléculas de goma guar y, por tanto, su peso molecular, traduciéndose en una baja alineación molecular dentro de la dispersión, disminuyendo su viscosidad. Por otro lado, de acuerdo con lo reportado por Wang et al. (2000), el cambio en el comportamiento reológico de la goma guar frente a un pH ácido, no sería atribuible a la degradación de este galactomanano, sino que sería más probable asociarlo a un cambio en la interacción entre agua-goma guar y entre las mismas moléculas de esta fibra, lo que posiblemente se debería a la débil protonación de los grupos hidroxilo presentes en la goma guar y a la formación de moléculas de agua producto de una elevada concentración de iones H^+ , lo que reduciría la frecuencia de enlaces de H inter e intramolecular, resultando en una menor asociación de las moléculas con el agua y entre ellas.

Similar a la goma guar, pero en menor grado, el comportamiento de flujo de la goma xanthan se vio modificado por cambios en el pH y el entorno iónico, pese a que esta última fibra es estable en un amplio rango de pH (Anexo 1), observándose a nivel intestinal una notable disminución de la viscosidad, al disminuir k desde la fase gástrica a la intestinal (Tabla 8), a la vez que mantiene un comportamiento pseudoplástico. De acuerdo con lo reportado por H. Fabek et al. (2014), Sworn (2000), Brunchi et al. (2016) y Wyatt and Liberatore (2009) respecto del efecto del pH sobre el comportamiento reológico de esta fibra, es

posible que debido a la naturaleza aniónica de la goma xanthan se pudiera esperar cierta sensibilidad por parte de la viscosidad frente a variaciones de pH, pudiendo dar lugar a cambios en la densidad de carga de este polímero, influyendo en las asociaciones entre las mismas moléculas de la goma xanthan. Según estos autores, los cambios de densidad de carga se podrían deber a que la reducción de pH, especialmente por la adición de soluciones fuertemente ácidas como el HCl, posiblemente inducirían: i) una hidrólisis acelerada de las soluciones de goma xanthan, perdiéndose grupos de ácido pirúvico vinculados a la manosa terminal de las cadenas laterales de trisacáridos; y a ii) una conversión progresiva de los grupos carboxilato desde su forma ionizada a la no ionizada ($\text{COO}^- + \text{H}^+ = \text{COOH}$); en otras palabras, los resultados obtenidos en esta investigación podrían deberse a la protonación de los grupos carboxilatos presentes en las cadenas laterales, disminuyendo la carga de las cadenas de goma xanthan, por tanto se reduciría la repulsión electrostática entre las cadenas laterales del polímero, aumentando la flexibilidad de la cadena principal, modificando la conformación molecular desde una estructura helicoidal ordenada a una desordenada y altamente extendida que puede ser descrita como hélice rota o imperfecta, tornándolas parcialmente flexibles y permitiendo la estabilidad de esta fibra en condiciones ácidas mediante la autoagregación de las cadenas de goma xanthan mediante la formación de enlaces de H, minimizando la probabilidad de despolimerización, lo que según estos autores permitiría mantener su peso molecular y su solubilidad en el medio acuoso. Lo antes

mencionado, sería una posible explicación del porque disminuyó la viscosidad aparente. Esta disminución de la viscosidad sería además fomentada por el aumento de volumen total producto de la incorporación secuencial de los fluidos digestivos simulados.

Por su parte el mucílago de chia, no presentó cambios significativos en su comportamiento reológico entre las diferentes fases digestivas para una misma concentración, pero si los mostró a medida que aumentó su concentración; esto puede observarse claramente al comparar las diferentes concentraciones en la fase gástrica (Figura 12g, h, i). Esta capacidad para mantener prácticamente sin modificaciones su comportamiento reológico hace suponer que es capaz de mantener su solubilidad e interacción intermolecular a través del proceso de digestión, siendo resistente frente a cambios de pH y a la acción enzimática propios del proceso de digestión, tal como lo reportó Lazaro et al. (2018). En particular, en la fase intestinal, la concentración más baja de mucílago de chia mostró una viscosidad menor, reflejada en un valor de k menor en comparación con las concentraciones media y alta (Tabla 8), esto podría deberse a que una baja concentración de esta fibra posiblemente pueda estar relacionada con un grado de enmarañamiento menor cuando se trata de un gran volumen total asociado a esta fase digestiva simulada, modificando probablemente su interacción intermolecular (Tamargo et al., 2018). Por lo tanto, es posible que la ligera disminución de la viscosidad del mucilago sea por el efecto dilución que se produce durante el proceso de digestión y no a la degradación enzimática, puesto

que, estudio previos han demostrado que las fibras solubles son capaces de conservar su forma polimérica tanto en el estómago como en el intestino delgado. Otro posible factor que podría incidir en el comportamiento reológico observado para el mucílago puede que se relacione con la presencia de una pequeña cantidad de proteínas solubles liberadas durante la extracción del mucílago (H. Fabek et al., 2014; Tamargo et al., 2018).

En cuanto a la pectina HM, pese a que a nivel oral presentó la menor viscosidad en todas las concentraciones estudiadas, a nivel gástrico e intestinal aumentó su viscosidad, a pesar del factor dilución asociado a la adición secuencial de los fluidos digestivos simulados. Este cambio en el comportamiento reológico fue similar al observado por Logan et al. (2015), donde la pectina de naranja de HM presentó una viscosidad aparente significativamente más alta al finalizar la fase intestinal, atribuyéndolo posiblemente a la sensibilidad de esta fibra frente a los cambios de pH debido a su alto DE, mostrando un comportamiento típico de un polielectrolito, entre la fase gástrica e intestinal. De acuerdo con los estudios reportados por Zhang et al. (2005), Hua et al. (2018), Yoo et al. (2006) y Logan et al. (2015), donde se evaluaron los efectos del pH sobre el comportamiento reológico de la pectina HM; el aumento de la viscosidad aparente observada en la Figura 12 entre las fases digestivas antes mencionadas, posiblemente podría deberse a que una disminución de pH desde un valor neutro, donde esta pectina presenta un alto grado de ionización, a un pH ácido (pH: 3) inferior al pKa de esta fibra (Anexo 1), donde la pectina HM se presenta mayormente en su estado no

ionizado, provocaría la contracción de las cadenas del polielectrolito debido a la disminución de las repulsiones electrostáticas intermoleculares, por lo que las moléculas de pectina HM se encontrarían menos solubles y tenderían a generar interacciones intermoleculares mediante la formación de enlaces de H, conduciendo a una agregación entre las moléculas de pectina, lo que aumentaría el volumen y peso molecular de esta fibra en dilución; adicionalmente, en la fase intestinal, un aumento en la concentración de sal, al incluir sales biliares, podría contribuir a proteger las cargas iónicas presentes a lo largo de la cadena de la fibra disminuyendo las fuerzas repulsivas entre las cargas dando como resultado una disminución en el volumen hidrodinámico de esta fibra en solución acuosa.

Como era de esperarse, todas las fibras estudiadas proporcionaron viscosidad a nivel gastrointestinal; dado que, las concentraciones bajas de cada fibra se encontraban sobre la concentración crítica necesaria para generar viscosidad. En el caso de la goma guar, es posible observar esta capacidad en concentraciones sobre 0,3% p/p (D. Mudgil et al., 2012); la goma xanthan por su parte, requiere concentraciones sobre 0,01% p/p y la pectina sobre 0,2% (Brunchi et al., 2016). Esta capacidad que poseen las fibras para generar viscosidad, se ha relacionado estrechamente con su capacidad para absorber agua, dependiendo inicialmente en gran medida de la concentración, pero conforme avanza la digestión este comportamiento reológico se torna independiente (D. Mudgil & Barak, 2013).

Finalmente, considerando el panorama general de los resultados obtenidos y que la mayoría de las respuestas fisiológicas asociadas a las FDS serían consecuencia de su capacidad para disminuir su solubilidad, observándose un aumento de la viscosidad; o bien, consecuencia de su capacidad para mantenerla, no modificando significativamente la viscosidad a través del GIT (Chesson, 2006); sería conveniente considerar a la pectina, la goma xanthan y el mucílago de chia, cuando se busque modificar el proceso digestivo al poseer características reológicas capaces de controlar los movimientos de la digesta a través del sistema digestivo (Goh et al., 2016).

De acuerdo con Borreani et al. (2016), Halford and Harrold (2012) y Zhang et al. (2005), las fibras son utilizadas en alimentos debido a sus propiedades funcionales, dentro de las cuales la viscosidad, asociada con un vaciado gástrico retardado y una mayor saciedad, es un factor determinante para cumplir con los requisitos de uso final. Bajo este contexto, mientras mayor es la resistencia de las fibras a cambios de pH y degradación enzimática, mayor es su aptitud para formar parte de la estructura de alimentos diseñados para retardar la digestión (Gidley, 2013). Por lo tanto, sería posible utilizar las tres FDS antes mencionadas en formulaciones que contribuyan a mitigar problemas de sobrepeso y obesidad.

3.3 Medición de la distribución del tamaño de partículas

Los resultados obtenidos en la distribución del tamaño de partículas de las dispersiones de diferentes FDS en concentraciones baja, media y alta durante su digestión *in vitro* se presentan en la Figura 13, mientras que el comportamiento de esta distribución ($d(0,1)$, $d(0,5)$ y $d(0,9)$) se exponen en la Tabla 9.

En la Figura 13, es posible apreciar cambios significativos en la distribución del tamaño de partículas en la goma guar y la goma xanthan; seguidas por la pectina HM quien presentó ligeros cambios, mientras que en el mucílago la distribución del tamaño de partículas y el comportamiento bimodal se mantuvo prácticamente sin cambios al comparar su respectivo control con las tres concentraciones en las diferentes etapas de digestión *in vitro*. De acuerdo con Guillon and Champ (2000), estos cambios en el tamaño de partículas de las FDS durante su digestión, específicamente la fragmentación y/o agregación de ellas, son el resultado de la masticación, molienda a nivel estomacal, degradación bacteriana y en algunos casos por variaciones en el pH y en la fuerza iónica. Así mismo, la comprensión de estos cambios microestructurales es fundamental al momento de desarrollar alimentos que otorguen beneficios saludables al consumidor, como la liberación de nutrientes en sitios específicos del GIT humano (Fang et al., 2016; Kong & Singh, 2009).

Figura 13. Distribución del tamaño de partículas de las FDS antes y durante la digestión *in vitro*.

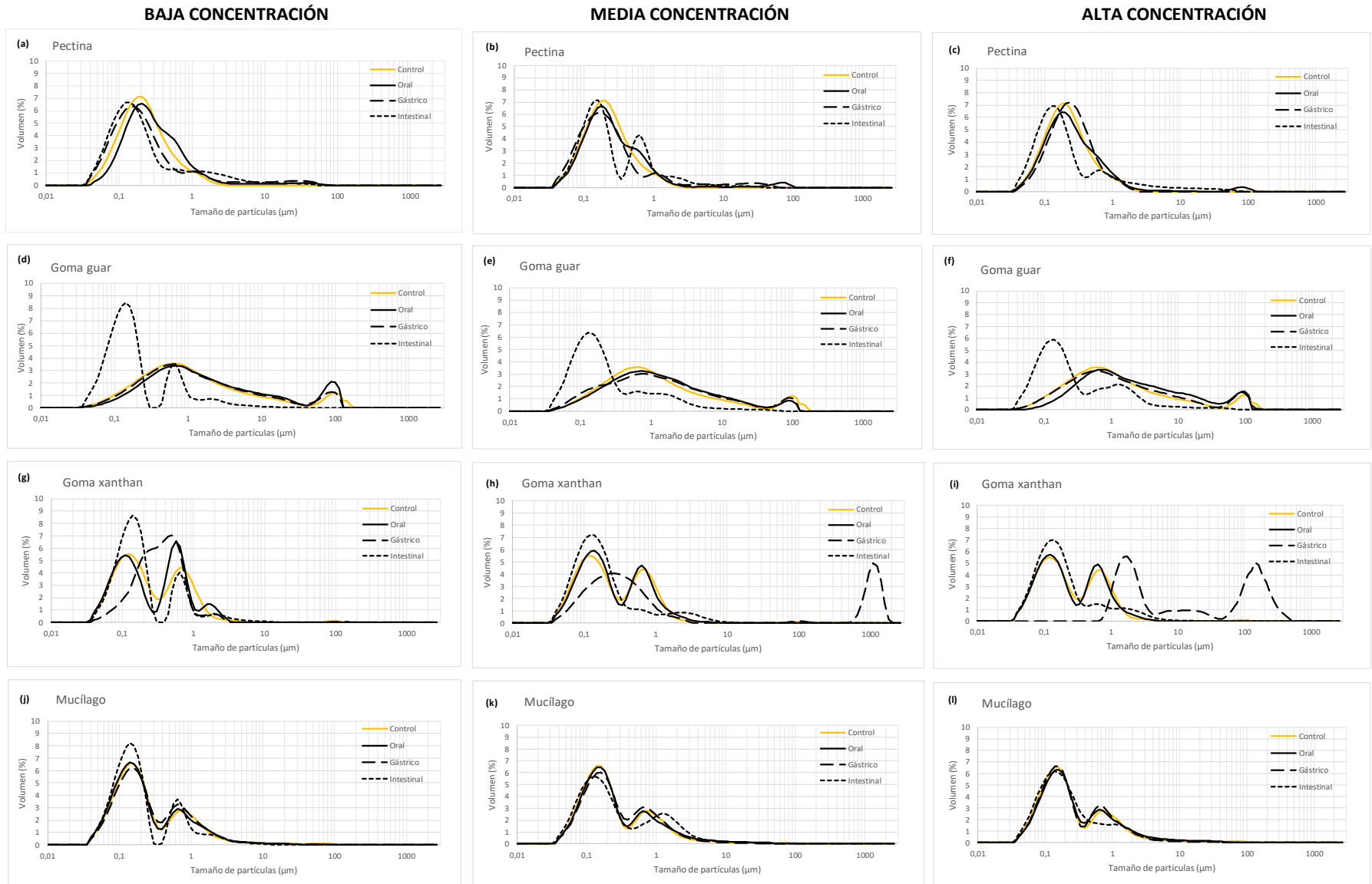


Tabla 9. Comportamiento de la distribución del tamaño de partículas de las FDS antes y durante la digestión *in vitro*.

Muestra	Control (Antes de digerir)			C* (%)	Después de digerir								
	d(0,1) (μm)	d(0,5) (μm)	d(0,9) (μm)		Oral			Gástrica			Intestinal		
					d(0,1) (μm)	d(0,5) (μm)	d(0,9) (μm)	d(0,1) (μm)	d(0,5) (μm)	d(0,9) (μm)	d(0,1) (μm)	d(0,5) (μm)	d(0,9) (μm)
Pectina	0,092 ± 0,0	0,218 ± 0,001	0,653 ± 0,001	1	0,113 ± 0,002	0,274 ± 0,003	0,997 ± 0,017	0,078 ± 0,002	0,194 ± 0,013	1,384 ± 0,151	0,074 ± 0,0	0,174 ± 0,003	1,738 ± 0,092
				2	0,096 ± 0,005	0,233 ± 0,006	0,917 ± 0,023	0,080 ± 0,011	0,205 ± 0,244	1,321 ± 0,012	0,089 ± 0,002	0,202 ± 0,008	1,265 ± 0,092
				4	0,095 ± 0,006	0,24 ± 0,004	0,904 ± 0,021	0,105 ± 0,002	0,253 ± 0,003	0,666 ± 0,001	0,075 ± 0,0	0,171 ± 0,002	1,750 ± 0,125
Goma guar	0,182 ± 0,012	0,951 ± 0,055	1,911 ± 0,256	1	0,233 ± 0,020	1,288 ± 0,084	5,662 ± 3,625	0,194 ± 0,008	1,04 ± 0,051	2,042 ± 1,061	0,078 ± 0,001	0,161 ± 0,004	0,981 ± 0,067
				2	0,195 ± 0,038	1,175 ± 0,176	1,553 ± 1,515	0,15 ± 0,061	1,097 ± 0,450	1,729 ± 0,459	0,076 ± 0,001	0,183 ± 0,004	1,897 ± 0,040
				3	0,298 ± 0,026	1,618 ± 0,116	3,335 ± 0,094	0,185 ± 0,009	1,08 ± 0,032	2,582 ± 0,242	0,078 ± 0,001	0,202 ± 0,004	2,153 ± 0,004
Goma xanthan	0,077 ± 0,001	0,213 ± 0,004	1,045 ± 0,040	0,3	0,075 ± 0,002	0,236 ± 0,054	0,994 ± 0,099	0,133 ± 0,056	0,362 ± 0,068	0,806 ± 0,144	0,079 ± 0,0	0,162 ± 0,002	0,846 ± 0,019
				0,5	0,080 ± 0,001	0,21 ± 0,008	1,041 ± 0,002	0,106 ± 0,014	0,418 ± 0,482	1,240 ± 0,270	0,072 ± 0,001	0,159 ± 0,001	1,221 ± 0,023
				1	0,076 ± 0,001	0,205 ± 0,002	1,013 ± 0,012	1,374 ± 0,097	1,165 ± 0,895	2,174 ± 0,983	0,074 ± 0,001	0,167 ± 0,001	1,27 ± 0,022
Mucílago	0,083 ± 0,002	0,199 ± 0,005	1,365 ± 0,014	0,3	0,081 ± 0,002	0,192 ± 0,005	1,37 ± 0,026	0,086 ± 0,003	0,215 ± 0,009	1,332 ± 0,045	0,08 ± 0,001	0,168 ± 0,002	0,987 ± 0,028
				0,5	0,084 ± 0,001	0,206 ± 0,003	1,602 ± 0,017	0,087 ± 0,002	0,224 ± 0,007	1,371 ± 0,035	0,077 ± 0,0	0,205 ± 0,007	1,983 ± 0,006
				1	0,086 ± 0,001	0,215 ± 0,007	1,631 ± 0,038	0,085 ± 0,001	0,203 ± 0,005	1,289 ± 0,025	0,078 ± 0,001	0,194 ± 0,007	1,437 ± 0,013

(*) Concentración en porcentaje de las diferentes soluciones de hidrocoloides.

d(0.1), d(0.5) y d(0.9) corresponden a los diámetros máximos del 10, 50 y 90% de las partículas en el volumen total, respectivamente.

Pese a que, generalmente se acepta que la pectina no puede ser digerida a través del GIT humano, es posible obtener algunos nutrientes a partir de ella gracias a la acción de bacterias simbióticas, como por ejemplo *Bacteroides ovatus* y *Bacteroides thetaiotaomicron* (Espinal-Ruiz et al., 2016). Bajo este contexto es que se obtuvieron los resultados esperados, ya que no se observaron cambios significativos en la distribución unimodal del tamaño de partículas de la pectina HM al comparar el control con la fase oral en las diferentes concentraciones estudiadas (Figura 13a, b, c). No obstante, el diámetro máximo del 90% ($d_{0,9}$) de las partículas aumentó en la fase gástrica, por lo tanto, una disminución del pH condujo a una ligera agregación intermolecular, comportamiento que se puede observar con mayor claridad en la Figura 13c, y que se condice con el aumento de viscosidad aparente mostrado en la Figura 12i. De acuerdo con lo reportado por Logan et al. (2015), esta agregación posiblemente se asocie a una reducción en la repulsión electrostática entre las cadenas de pectina HM al disminuir el pH, promoviendo la interacción intermolecular y disminuyendo la solubilidad de esta fibra. Luego, al comparar la fase gástrica con la intestinal se puede notar una clara reducción en la distribución del tamaño de partículas, donde el diámetro máximo del 90% de ellas pasa de un tamaño entre 0,092-0,132 μm a 0,067-0,1750 μm (Tabla 9), respectivamente. Según Henare and Rutherford (2013) y Logan et al. (2015) esta ligera fragmentación de las partículas posiblemente se deba a la disminución del grado de esterificación de los residuos de ácido galacturónico producto de un

aumento en el pH, disminuyendo como consecuencia el peso molecular luego de la digestión intestinal simulada.

Por su parte, la distribución bimodal del tamaño de partículas de la goma guar no mostró cambios significativos al comparar el control con la fase oral y gástrica (Figura 13d, e, f), distribución que era de esperarse debido al carácter neutro de esta fibra, presentando como consecuencia una gran estabilidad frente a un amplio rango de pH (Anexo 1). Sin embargo, al llegar a la fase intestinal esta fibra redujo notablemente su tamaño de partículas, siendo posible su correlación con la disminución significativa de la viscosidad aparente de la goma guar en esta fase digestiva; disminuyendo el $d_{0,9}$ desde 1,729-2,582 μm en la fase gástrica a 0,981-2,053 μm en la fase intestinal (Tabla 9). Esta fragmentación, como se mencionó en el apartado 3.2, posiblemente se deba a una cierta despolimerización de la fibra; o bien, podría ser por cambios en las interacciones inter e intramoleculares (H. Fabek et al., 2014; Marcotte et al., 2001; Zhang et al., 2005).

En cuanto a la goma xanthan, la distribución bimodal del tamaño de partículas no mostró cambios significativos al comparar el control con la fase oral, presentándose un $d_{0,9}$ entre 0,994-1,045 μm ; mientras que en la etapa gástrica el diámetro máximo de las partículas tendió a aumentar alcanzando un $d_{0,9}$ entre 0,806-2,174 μm . Este cambio es más notorio a medida que aumenta la concentración, produciéndose un desplazamiento de la distribución bimodal hacia un tamaño mayor de partículas (Figura 13g, h, i). Este comportamiento,

como se mencionó anteriormente en el apartado 3.2, posiblemente se deba a una disminución de la repulsión electrostática de las cadenas de la goma xanthan a bajos valores de pH, permitiendo la expansión (apertura) de las mismas. Finalmente, en la fase intestinal las partículas de goma xanthan tienden a reducir su tamaño y retomando valores cercanos a los del control (0,846-1,270 μm), produciéndose un desplazamiento en la distribución del tamaño de partículas, a la vez que la distribución se va tornando prácticamente unimodal conforme aumenta la concentración (Figura 13g, h, i). Este comportamiento, de acuerdo con lo reportado por Sworn (2000), posiblemente se podría relacionar con la neutralización de las moléculas de goma xanthan al aumentar el pH a un valor neutro, promoviendo la reionización de los grupos carboxilato, permitiendo que el polímero retome su conformación original más compacta y ordenada. Por lo tanto, las variaciones en el tamaño de partículas de la goma xanthan podría ser revertido al variar el pH, dado que estos cambios posiblemente sólo se produzcan por modificaciones en la conformación espacial de la molécula y no a la despolimerización de esta. Este comportamiento es posible correlacionarlo con la capacidad de esta fibra para mantener su viscosidad aparente durante la digestión.

A diferencia de las demás FDS, el mucílago de chia se mantuvo prácticamente sin cambios en la distribución bimodal del tamaño de partículas a través de las diferentes fases digestivas y concentraciones evaluadas. Sin embargo, en la fase intestinal independiente de la concentración, se observó un ligero aumento en el

tamaño partículas (Tabla 9), reflejando la formación de algunos agregados intermoleculares; posiblemente debido a las interacciones electrostáticas entre el mucílago y las trazas de proteínas solubles extraídas de la semilla de chia junto con el mucílago (Lazaro et al., 2018). En general, esta fibra mostró una elevada resistencia física frente a cambios de pH, enzimas y jugos digestivos, tal como se observó en su comportamiento reológico en el apartado 3.2; por lo que, de acuerdo con Bornhorst et al. (2013) y Henare and Rutherford (2013), el vaciamiento gástrico requeriría más tiempo en comparación con las demás fibras estudiadas, y posiblemente podría ser capaz de impedir la digestión y absorción de nutrientes a nivel de intestino delgado limitando así la difusión de nutrientes a través de la mucosa intestinal.

En general, los cambios en la distribución del tamaño de partículas de las diferentes FDS, sería posible atribuirlos principalmente a los cambios de pH.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

Prácticamente todas las fibras estudiadas vieron modificadas sus características físicas durante el proceso de digestión *in vitro* empleado, manteniendo constante su comportamiento pseudoplástico o de adelgazamiento por cillaza, independiente de la concentración y fase digestiva; además de no presentar cambios significativos en la distribución del tamaño de partículas al comparar los respectivos controles con la fase oral.

Los resultados sugieren que las propiedades fisicoquímicas determinadas para cada FDS estudiada están dadas principalmente por la estructura (lineal o ramificada) y composición de cada una de ellas, y su afinidad por el agua.

Existe una lógica correlación entre los cambios observados en el comportamiento reológico y las variaciones de la distribución del tamaño de partículas, mostrándose una directa relación, disminuyendo la viscosidad aparente cuando el tamaño de partículas se reduce. Estos resultados podrían ser atribuidos principalmente al efecto dilución asociado al proceso de digestión y a la relación existente entre las variaciones de pH y la capacidad de estas fibras para mantener, aumentar o disminuir su solubilidad.

De todas las FDS comparadas, el mucílago de chia quien presentó mayor resistencia a los cambios físicos y reológicos durante el proceso de digestión *in*

vitro; lo que posiblemente se deba a su baja pureza por la presencia de proteínas solubles extraídas junto con el mucílago.

Dada la capacidad de la goma xanthan y el mucílago de chia para mantener su comportamiento reológico prácticamente sin modificaciones durante la digestión; y la pectina HM para modificarlo, aumentando su viscosidad; es que, posiblemente estas fibras puedan ser biológicamente más funcionales en cuanto a su capacidad para modular ciertas respuestas fisiológicas, además de mejorar la funcionalidad de la matriz alimentaria donde sean adicionadas, en comparación con la goma guar.

La generación de conocimiento con respecto al perfil de diferentes fibras solubles, desde el punto de vista de las particularidades asociadas a su estructura, como son las propiedades fisicoquímicas y su comportamiento a nivel tracto gastrointestinal, es una herramienta que contribuye con información crucial para el diseño de alimentos donde estas fibras puedan ser incluidas como ingredientes con el fin de lograr determinadas propiedades y/o funcionalidades.

CAPÍTULO 5

PERSPECTIVAS FUTURAS

Los hallazgos obtenidos de la caracterización comparativa de las diferentes FDS en esta investigación conducen a la propuesta de futuras investigaciones enmarcadas en la continuidad de estudio respecto del mucilago de chia, abarcando los siguientes aspectos:

- Estudiar la sinergia con otras fibras, puesto que gran parte de los alimentos procesados con características específicas requieren la adición de más de un tipo de fibra.
- Determinar la aplicabilidad de este nuevo ingrediente como sustituto de grasa en productos de panadería, dada la relación entre enfermedades asociadas a la mal nutrición y los altos niveles de consumo de estos productos a nivel mundial.
- Vincular los hallazgos obtenidos en esta investigación con una respuesta fisiológica, mediante la inclusión de esta fibra en alimentos con niveles altos de nutrientes críticos, con el fin de evaluar la liberación de estas macromoléculas a nivel gastrointestinal empleando un sistema de digestión *in vivo*, determinando la eficacia, si la tuviera, de esta fibra para mitigar o prevenir enfermedades crónicas no transmisibles asociadas a la dieta.
- Optimizar el proceso de extracción, tornándolo rentable a nivel industrial.

CAPÍTULO 6

REFERENCIAS

- AACC. (1995). *Approved methods of the AACC* (9 ed.). St. Paul, MN: The Association.
- ADAM. (2018). MedlinePuls: Intestino Delgado. In. https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp_imagepages/19221.htm: [Consulta: 28 febrero 2019].
- Aguilera, J. M. (2005). Why food microstructure? *Journal of Food Engineering*, 67(1), 3-11. doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.05.050
- Aguirre, J. F., Osella, C. A., Carrara, C. R., Sánchez, H. D., & Buera, M. d. P. (2011). Effect of storage temperature on starch retrogradation of bread staling. *Starch - Stärke*, 63(9), 587-593. doi:10.1002/star.201100023
- Aimutis, W., Paeschke, T., Sun, N., Johnson, S., Sweeney, J., F., Patist, A., . . . Finocchioaro, E. (2006). U.S.A. Patent No. World Intellectual Property Organization.
- Aken, G. (2010). Relating Food Emulsion Structure and Composition to the Way It Is Processed in the Gastrointestinal Tract and Physiological Responses: What Are the Opportunities? *Food Biophysics*, 5(4), 258-283. doi:10.1007/s11483-010-9160-5
- Alarcón García, M. Á., López Vargas, J. H., & Restrepo Molina, D. A. (2013). Caracterización de la Funcionalidad Tecnológica de una Fuente Rica en Fibra Dietaria Obtenida a partir de Cáscara de Plátano. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín; Vol. 66, N°1*.
- Alpizar-Reyes, E., Román-Guerrero, A., Gallardo-Rivera, R., Varela-Guerrero, V., Cruz-Olivares, J., & Pérez-Alonso, C. (2018). Rheological properties of tamarind (*Tamarindus indica* L.) seed mucilage obtained by spray-drying as a novel source of hydrocolloid. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 817-824. doi:10.1016/j.ijbiomac.2017.09.048
- Association, A. D. (2008). Position of the American Dietetic Association: Health Implications of Dietary Fiber. *Journal of the American Dietetic Association*, 108(10), 1716-1731. doi:10.1016/j.jada.2008.08.007
- Axelos, M. A. V., & Branger, M. (1993). The effect of the degree of esterification on the thermal stability and chain conformation of pectins. *Food Hydrocolloids*, 7(2), 91-102. doi:10.1016/S0268-005X(09)80161-6
- Bahaji, A., Li, J., Sánchez-López, Á. M., Baroja-Fernández, E., Muñoz, F. J., Ovecka, M., . . . Pozueta-Romero, J. (2014). Starch biosynthesis, its regulation and biotechnological approaches to improve crop yields. *Biotechnology Advances*, 32(1), 87-106. doi:10.1016/j.biotechadv.2013.06.006
- Bembibre, C. (2010). Definición de Estómago. In. www.definicionabc.com/salud/estomago.php: [Consulta: 28 febrero 2019].
- BeMiller, J. N. (2019a). 9 - Guar, Locust Bean, Tara, and Cassia Gums. In J. N. BeMiller (Ed.), *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists (Third Edition)* (pp. 241-252): AACC International Press.

- BeMiller, J. N. (2019b). 11 - Xanthan. In J. N. BeMiller (Ed.), *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists (Third Edition)* (pp. 261-269): AACC International Press.
- BeMiller, J. N. (2019c). 15 - Pectins. In J. N. BeMiller (Ed.), *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists (Third Edition)* (pp. 303-312): AACC International Press.
- Betancur-Ancona, D., López-Luna, J., & Chel-Guerrero, L. (2003). Comparison of the chemical composition and functional properties of Phaseolus lunatus prime and tailing starches. *Food Chemistry*, 82(2), 217-225. doi:10.1016/S0308-8146(02)00515-0
- Bohn, T., Carriere, F., Day, L., Deglaire, A., Egger, L., Freitas, D., . . . Dupont, D. (2018). Correlation between in vitro and in vivo data on food digestion. What can we predict with static in vitro digestion models? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2239-2261. doi:10.1080/10408398.2017.1315362
- Bornhorst, G. M., Gouseti, O., Wickham, M. S. J., & Bakalis, S. (2016). Engineering Digestion: Multiscale Processes of Food Digestion. *Journal of Food Science*, 81(3), R534-R543. doi:10.1111/1750-3841.13216
- Bornhorst, G. M., Kostlan, K., & Singh, R. P. (2013). Particle Size Distribution of Brown and White Rice during Gastric Digestion Measured by Image Analysis. *Journal of Food Science*, 78(9), E1383-E1391. doi:10.1111/1750-3841.12228
- Borreani, J., Llorca, E., Larrea, V., & Hernando, I. (2016). Adding neutral or anionic hydrocolloids to dairy proteins under in vitro gastric digestion conditions. *Food Hydrocolloids*, 57, 169-177. doi:10.1016/j.foodhyd.2016.01.030
- Boulos, N. N., Greenfield, H., & Wills, R. B. H. (2000). Water holding capacity of selected soluble and insoluble dietary fibre. *International Journal of Food Properties*, 3(2), 217-231. doi:10.1080/10942910009524629
- Brown, A. (2010). *Understanding Food: Principles & Preparation* (Fourth ed.): Wadsworth
- Brownlee, I. A. (2011). The physiological roles of dietary fibre. *Food Hydrocolloids*, 25(2), 238-250. doi:10.1016/j.foodhyd.2009.11.013
- Brownlee, I. A. (2014). The impact of dietary fibre intake on the physiology and health of the stomach and upper gastrointestinal tract. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 4(2), 155-169. doi:10.1016/j.bcdf.2014.09.005
- Brunchi, C.-E., Bercea, M., Morariu, S., & Dascalu, M. (2016). *Some properties of xanthan gum in aqueous solutions: effect of temperature and pH* (Vol. 23).
- Butterworth, P. J., Warren, F. J., & Ellis, P. R. (2011). Human α -amylase and starch digestion: An interesting marriage. *Starch - Stärke*, 63(7), 395-405. doi:10.1002/star.201000150
- Capitani, M. I., Ixtaina, V. Y., Nolasco, S. M., & Tomás, M. C. (2013). Microstructure, chemical composition and mucilage exudation of chia (*Salvia hispanica* L.) nutlets from Argentina. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(15), 3856-3862. doi:10.1002/jsfa.6327
- Cerqueira, M. A., Bourbon, A. I., Pinheiro, A. C., Martins, J. T., Souza, B. W. S., Teixeira, J. A., & Vicente, A. A. (2011). Galactomannans use in the development of edible films/coatings for food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 22(12), 662-671. doi:10.1016/j.tifs.2011.07.002
- Cevoli, C., Balestra, F., Ragni, L., & Fabbri, A. (2013). Rheological characterisation of selected food hydrocolloids by traditional and simplified techniques. *Food Hydrocolloids*, 33(1), 142-150. doi:10.1016/j.foodhyd.2013.02.022

- Chang, S. K. (2019). How Food Structure and Processing Affect the Bioavailability of Nutrients and Antioxidants. In L. Melton, F. Shahidi, & P. Varelis (Eds.), *Encyclopedia of Food Chemistry* (pp. 158-166). Oxford: Academic Press.
- Chaplin, M. (2001). Pectin. In. www1.lsbu.ac.uk/water/pectin.html: [Consulta: 18 febrero 2019].
- Chaplin, M. (2018). Xanthan gum. In. www1.lsbu.ac.uk/water/xanthan_gum.html: [Consulta: 18 febrero 2019].
- Chater, P. I., Wilcox, M. D., Pearson, J. P., & Brownlee, I. A. (2015). The impact of dietary fibres on the physiological processes governing small intestinal digestive processes. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 6(2), 117-132. doi:10.1016/j.bcdf.2015.09.002
- Chau, C. F., & Huang, Y. L. (2004). Characterization of passion fruit seed fibres—a potential fibre source. *Food Chemistry*, 85(2), 189-194. doi:10.1016/j.foodchem.2003.05.009
- Chesson, A. (2006). Chapter 18: Dietary Fiber. In A. Stephen, G. O. Phillips, & P. A. Williams (Eds.), *Food Polysaccharides and Their Applications* (Second ed.): CRC/Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA. .
- Clark, M. J., & Slavin, J. L. (2013). The Effect of Fiber on Satiety and Food Intake: A Systematic Review. *Journal of the American College of Nutrition*, 32(3), 200-211. doi:10.1080/07315724.2013.791194
- Cortés-Camargo, S., Gallardo-Rivera, R., Barragán-Huerta, B. E., Dublán-García, O., Román-Guerrero, A., & Pérez-Alonso, C. (2018). Exploring the Potential of Mesquite Gum–Nopal Mucilage Mixtures: Physicochemical and Functional Properties. *Journal of Food Science*, 83(1), 113-121. doi:doi:10.1111/1750-3841.13937
- Cui, S. W., Eskin, M. A., Wu, Y., & Ding, S. (2006). Synergisms between yellow mustard mucilage and galactomannans and applications in food products—a mini review. *Advances in colloid and interface science*, 128, 249-256.
- Dartois, A., Singh, J., Kaur, L., & Singh, H. (2010). Influence of Guar Gum on the In Vitro Starch Digestibility—Rheological and Microstructural Characteristics. *Food Biophysics*, 5(3), 149-160. doi:10.1007/s11483-010-9155-2
- Darwish, A., & El-Sohaimy, S. (2018). *Functional Properties of Chia Seed Mucilage Supplemented In Low Fat Yoghurt* (Vol. 39).
- Dikeman, C. L., Murphy, M. R., & Fahey, G. C., Jr. (2006). Dietary Fibers Affect Viscosity of Solutions and Simulated Human Gastric and Small Intestinal Digesta. *The Journal of Nutrition*, 136(4), 913-919. doi:10.1093/jn/136.4.913
- Dobrynin, A. V., Colby, R. H., & Rubinstein, M. (1995). Scaling theory of polyelectrolyte solutions. *Macromolecules*, 28(6), 1859-1871.
- Dupont, D., & Mackie, A. R. (2015). Static and dynamic in vitro digestion models to study protein stability in the gastrointestinal tract. *Drug Discovery Today: Disease Models*, 17-18, 23-27. doi:10.1016/j.ddmod.2016.06.002
- EFSA Panel on Dietetic Products, N., and Allergies (NDA). (2010). Scientific Opinion on Dietary Reference Values for carbohydrates and dietary fibre. *EFSA Journal*, 8(3), 1462. doi:doi:10.2903/j.efsa.2010.1462
- Egger, L., Ménard, O., Baumann, C., Duerr, D., Schlegel, P., Stoll, P., . . . Portmann, R. (2017). Digestion of milk proteins: Comparing static and dynamic in vitro digestion systems with in vivo data. *Food Research International*. doi:10.1016/j.foodres.2017.12.049

- Einhorn-Stoll, U., Benthin, A., Zimathies, A., Görke, O., & Drusch, S. (2015). Pectin-water interactions: Comparison of different analytical methods and influence of storage. *Food Hydrocolloids*, *43*, 577-583. doi:10.1016/j.foodhyd.2014.07.013
- Embleton, J. K., & Pouton, C. W. (1997). Structure and function of gastro-intestinal lipases. *Advanced Drug Delivery Reviews*, *25*(1), 15-32. doi:10.1016/S0169-409X(96)00488-7
- Espinal-Ruiz, M., Restrepo-Sánchez, L.-P., Narváez-Cuenca, C.-E., & McClements, D. J. (2016). Impact of pectin properties on lipid digestion under simulated gastrointestinal conditions: Comparison of citrus and banana passion fruit (*Passiflora tripartita* var. *mollissima*) pectins. *Food Hydrocolloids*, *52*, 329-342. doi:10.1016/j.foodhyd.2015.05.042
- Fabek, H. (2011). *Effect of in vitro human digestion on the viscosity of hydrocolloids in solution: A dietary fibre study*. (Master of Science in Food Science), The University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada
- Fabek, H., & Goff, H. D. (2015). Simulated intestinal hydrolysis of native tapioca starch: Understanding the effect of soluble fibre. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, *6*(2), 83-98. doi:10.1016/j.bcdf.2015.09.008
- Fabek, H., Messerschmidt, S., Brulport, V., & Goff, H. D. (2014). The effect of in vitro digestive processes on the viscosity of dietary fibres and their influence on glucose diffusion. *Food Hydrocolloids*, *35*, 718-726. doi:10.1016/j.foodhyd.2013.08.007
- Fang, X., Rioux, L.-E., Labrie, S., & Turgeon, S. L. (2016). Disintegration and nutrients release from cheese with different textural properties during in vitro digestion. *Food Research International*, *88*, 276-283. doi:10.1016/j.foodres.2016.04.008
- Fernandes, S. S., & Salas-Mellado, M. d. I. M. (2017). Addition of chia seed mucilage for reduction of fat content in bread and cakes. *Food Chemistry*, *227*, 237-244. doi:10.1016/j.foodchem.2017.01.075
- Fu, Z., Chen, J., Luo, S.-J., Liu, C.-M., & Liu, W. (2015). Effect of food additives on starch retrogradation: A review. *Starch - Stärke*, *67*(1-2), 69-78. doi:10.1002/star.201300278
- Gidley, M. J. (2013). Hydrocolloids in the digestive tract and related health implications. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, *18*(4), 371-378. doi:10.1016/j.cocis.2013.04.003
- Gidley, M. J., & Yakubov, G. E. (2018). Functional categorisation of dietary fibre in foods: Beyond 'soluble' vs 'insoluble'. *Trends in Food Science & Technology*. doi:10.1016/j.tifs.2018.12.006
- Goh, K. K. T., Matia-Merino, L., Chiang, J. H., Quek, R., Soh, S. J. B., & Lentle, R. G. (2016). The physico-chemical properties of chia seed polysaccharide and its microgel dispersion rheology. *Carbohydrate polymers*, *149*, 297-307.
- Golding, M., & Wooster, T. J. (2010). The influence of emulsion structure and stability on lipid digestion. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, *15*(1), 90-101. doi:10.1016/j.cocis.2009.11.006
- Gómez-Díaz, D., & Navaza, J. M. (2003). Rheology of aqueous solutions of food additives: Effect of concentration, temperature and blending. *Journal of Food Engineering*, *56*(4), 387-392. doi:10.1016/S0260-8774(02)00211-X
- Guillon, F., & Champ, M. (2000). Structural and physical properties of dietary fibres, and consequences of processing on human physiology. *Food Research International*, *33*(3), 233-245. doi:10.1016/S0963-9969(00)00038-7

- Halford, J. C. G., & Harrold, J. A. (2012). Satiety-enhancing products for appetite control: science and regulation of functional foods for weight management. *Proceedings of the Nutrition Society*, 71(2), 350-362. doi:10.1017/S0029665112000134
- Hellström, P. M., Grybäck, P., & Jacobsson, H. (2006). The physiology of gastric emptying. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 20(3), 397-407. doi:10.1016/j.bpa.2006.02.002
- Henare, S. J., & Rutherford, S. M. (2013). Chapter Ten - Digestion of Kiwifruit Fiber. In M. Boland & P. J. Moughan (Eds.), *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 68, pp. 187-203): Academic Press.
- Holzwarth, G. (1978). Molecular weight of xanthan polysaccharide. *Carbohydrate Research*, 66(1), 173-186. doi:10.1016/S0008-6215(00)83250-4
- Hosni, H., Periklis, D., & Baourakis, G. (2017). *Consumers Attitude Towards Healthy Food: "Organic and Functional Foods"* (Vol. 2).
- Hua, X., Yang, H., Din, P., Chi, K., & Yang, R. (2018). Rheological properties of deesterified pectin with different methoxylation degree. *Food Bioscience*, 23, 91-99. doi:10.1016/j.fbio.2018.03.011
- Hur, S. J., Lim, B. O., Decker, E. A., & McClements, D. J. (2011). In vitro human digestion models for food applications. *Food Chemistry*, 125(1), 1-12. doi:10.1016/j.foodchem.2010.08.036
- Jauregui, C. A., Regenstein, J. M., & Baker, R. C. (1981). A Simple Centrifugal Method for Measuring Expressible Moisture, A Water-Binding Property of Muscle Foods. *Journal of Food Science*, 46(4), 1271-1271. doi:10.1111/j.1365-2621.1981.tb03038.x
- Karaman, S., Kesler, Y., Goksel, M., Dogan, M., & Kayacier, A. (2014). Rheological and some Physicochemical Properties of Selected Hydrocolloids and their Interactions with Guar Gum: Characterization using Principal Component Analysis and Viscous Synergism Index. *International Journal of Food Properties*, 17(8), 1655-1667. doi:10.1080/10942912.2012.675612
- Kong, F., & Singh, R. (2009). Modes of Disintegration of Solid Foods in Simulated Gastric Environment. *Food Biophysics*, 4(3), 180-190. doi:10.1007/s11483-009-9116-9
- Kontogiorgos, V. (2019). Galactomannans (Guar, Locust Bean, Fenugreek, Tara). In L. Melton, F. Shahidi, & P. Varelis (Eds.), *Encyclopedia of Food Chemistry* (pp. 109-113). Oxford: Academic Press.
- Lamghari El Kossori, R., Sanchez, C., El Boustani, E.-S., Maucourt, M. N., Sauvaire, Y., Méjean, L., & Villaume, C. (2000). Comparison of effects of prickly pear (*Opuntia ficus indica* sp) fruit, arabic gum, carrageenan, alginic acid, locust bean gum and citrus pectin on viscosity and in vitro digestibility of casein. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(3), 359-364. doi:10.1002/1097-0010(200002)80:3<359::AID-JSFA534>3.0.CO;2-8
- Lazaro, H., Puente, L., Zúñiga, M. C., & Muñoz, L. A. (2018). Assessment of rheological and microstructural changes of soluble fiber from chia seeds during an in vitro micro-digestion. *LWT*, 95, 58-64. doi:10.1016/j.lwt.2018.04.052
- León-Martínez, F. M., Rodríguez-Ramírez, J., Medina-Torres, L. L., Méndez Lagunas, L. L., & Bernad-Bernad, M. J. (2011). Effects of drying conditions on the rheological properties of reconstituted mucilage solutions (*Opuntia ficus-indica*). *Carbohydrate polymers*, 84(1), 439-445. doi:10.1016/j.carbpol.2010.12.004

- Li, J.-M., Hou, G. G., & Chen, Z. X. (2016). Improvement of gums in physicochemical and rheological properties of barley-fortified saltine cracker dough. *Cereal research communications*, *44*(3), pp. 481-489. doi:10.1556/0806.44.2016.016
- Li, J.-M., & Nie, S.-P. (2016). The functional and nutritional aspects of hydrocolloids in foods. *Food Hydrocolloids*, *53*, 46-61. doi:10.1016/j.foodhyd.2015.01.035
- Lin, K.-Y., Daniel, J. R., & Whistler, R. L. (1994). Structure of chia seed polysaccharide exudate. *Carbohydrate polymers*, *23*(1), 13-18. doi:10.1016/0144-8617(94)90085-X
- Liu, L., & Priou, C. (2004). United States Patent No. US 2004/0072699 A1. P. A. Publication.
- Logan, K., Wright, A. J., & Goff, H. D. (2015). Correlating the structure and in vitro digestion viscosities of different pectin fibers to in vivo human satiety. *Food & Function*, *6*(1), 62-70. doi:10.1039/C4FO00543K
- Lopes da Silva, J. A., & Rao, M. A. (2006). Chapter 11: Pectins: Structure, Functionality, and Uses. In A. Stephen, G. O. Phillips, & P. A. Williams (Eds.), *Food Polysaccharides and Their Applications* (Second ed.).
- Lovegrove, A., Edwards, C. H., De Noni, I., Patel, H., El, S. N., Grassby, T., . . . Shewry, P. R. (2017). Role of polysaccharides in food, digestion, and health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *57*(2), 237-253. doi:10.1080/10408398.2014.939263
- Lucas-González, R., Viuda-Martos, M., Pérez-Alvarez, J. A., & Fernández-López, J. (2018). In vitro digestion models suitable for foods: Opportunities for new fields of application and challenges. *Food Research International*, *107*, 423-436. doi:10.1016/j.foodres.2018.02.055
- Mackie, A., Rigby, N., Harvey, P., & Bajka, B. (2016). Increasing dietary oat fibre decreases the permeability of intestinal mucus. *Journal of Functional Foods*, *26*, 418-427. doi:10.1016/j.jff.2016.08.018
- Malone, M. E., Appelqvist, I. A. M., & Norton, I. T. (2003). Oral behaviour of food hydrocolloids and emulsions. Part 1. Lubrication and deposition considerations. *Food Hydrocolloids*, *17*(6), 763-773. doi:10.1016/S0268-005X(03)00097-3
- Marcano, J., Hernando, I., & Fiszman, S. (2015). In vitro measurements of intragastric rheological properties and their relationships with the potential satiating capacity of cheese pies with konjac glucomannan. *Food Hydrocolloids*, *51*, 16-22. doi:10.1016/j.foodhyd.2015.04.028
- Marcotte, M., Taherian Hoshahili, A. R., & Ramaswamy, H. S. (2001). Rheological properties of selected hydrocolloids as a function of concentration and temperature. *Food Research International*, *34*(8), 695-703. doi:10.1016/S0963-9969(01)00091-6
- May, C. D. (2000). Chapter 10: Pectins. In G. O. Phillips & P. A. Williams (Eds.), *Handbook of hydrocolloids*: Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.
- Minekus, M., Alminger, M., Alvito, P., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu, C., . . . Brodtkorb, A. (2014). A standardised static in vitro digestion method suitable for food – an international consensus. *Food & Function*, *5*(6), 1113-1124. doi:10.1039/C3FO60702J
- Mubarak, N. (2000). *Physico-chemical study of Guar Gum*. (Master Science Degree in Chemistry), University of Khartoum,

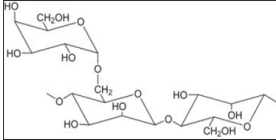
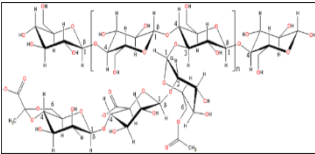
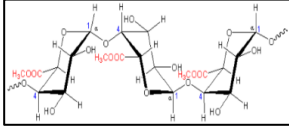
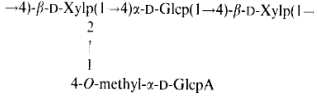
- Mudgil, D., & Barak, S. (2013). Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: a review. *Int J Biol Macromol*, *61*, 1-6. doi:10.1016/j.ijbiomac.2013.06.044
- Mudgil, D., Barak, S., & Khatkar, B. S. (2012). Effect of enzymatic depolymerization on physicochemical and rheological properties of guar gum. *Carbohydrate polymers*, *90*(1), 224-228. doi:10.1016/j.carbpol.2012.04.070
- Mudgil, D., Barak, S., & Khatkar, B. S. (2014). Guar gum: processing, properties and food applications-A Review. *Journal of food science and technology*, *51*(3), 409-418. doi:10.1007/s13197-011-0522-x
- Muñoz, L. A., Cobos, A., Diaz, O., & Aguilera, J. M. (2012). Chia seeds: Microstructure, mucilage extraction and hydration. *Journal of Food Engineering*, *108*(1), 216-224. doi:10.1016/j.jfoodeng.2011.06.037
- National-Research-Council. (2005). Food and Nutrition Board. Dietary reference intakes for energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein, and amino acids (macronutrients). In: Washington, DC: National Academy Press.
- Noort, M. W. J., van Haaster, D., Hemery, Y., Schols, H. A., & Hamer, R. J. (2010). The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality – Evidence for fibre–protein interactions. *Journal of Cereal Science*, *52*(1), 59-64. doi:10.1016/j.jcs.2010.03.003
- Norton, I., Moore, S., & Fryer, P. (2007). Understanding food structuring and breakdown: engineering approaches to obesity. *Obesity Reviews*, *8*(s1), 83-88. doi:10.1111/j.1467-789X.2007.00324.x
- OMS. (2003). *Dieta, nutrición y prevención de enfermedades crónicas*. Retrieved from Serie de Informes Técnicos, 916:
- Phillips, G. O., & Williams, P. A. (2000). Chapter 1: Introduction to food hydrocolloids. In G. O. Phillips & P. A. Williams (Eds.), *Handbook of hydrocolloids*: Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.
- Pollard, M., Kelly, R., Wahl, C., Fischer, P., Windhab, E., Eder, B., & Amado, R. (2007). Investigation of equilibrium solubility of a carob galactomannan. *Food Hydrocolloids*, *21*(5-6), 683-692. doi:10.1016/j.foodhyd.2006.08.010
- Rana, V., Bachheti, R. K., Chand, T., & Barman, A. (2011). Dietary fibre and human health. *International Journal of Food Safety*, *4*(Nutrition and Public Health). doi:DOI: 10.1504/IJFSNPH.2011.044528
- Razavi, S. M. A., Cui, S. W., & Ding, H. (2016). Structural and physicochemical characteristics of a novel water-soluble gum from *Lallemantia royleana* seed. *International Journal of Biological Macromolecules*, *83*, 142-151. doi:10.1016/j.ijbiomac.2015.11.076
- Razavi, S. M. A., Cui, S. W., Guo, Q., & Ding, H. (2014). Some physicochemical properties of sage (*Salvia macrosiphon*) seed gum. *Food Hydrocolloids*, *35*, 453-462. doi:10.1016/j.foodhyd.2013.06.022
- Redgwell, R. J., & Fischer, M. (2005). Dietary fiber as a versatile food component: An industrial perspective. *Molecular Nutrition and Food Research*, *49*(6), 521-535. doi:10.1002/mnfr.200500028
- Rodríguez-Gutiérrez, G., Rubio-Senent, F., Lama-Muñoz, A., García, A., & Fernández-Bolaños, J. (2014). Properties of Lignin, Cellulose, and Hemicelluloses Isolated from Olive Cake and Olive Stones: Binding of Water, Oil, Bile Acids, and Glucose. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *62*(36), 8973-8981. doi:10.1021/jf502062b

- Rompicherla, N. C., Bhandarkar, A., Nairy, H., & Jose, J. (2012). Investigation on release profile of chitosan based polyelectrolyte complexes using an antihypertensive agent. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, *15*, 88-94.
- Saha, D., & Bhattacharya, S. (2010). Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: a critical review. *Journal of food science and technology*, *47*(6), 587-597. doi:10.1007/s13197-010-0162-6
- Salarbashi, D., & Tafaghodi, M. (2018). An update on physicochemical and functional properties of newly seed gums. *International Journal of Biological Macromolecules*, *119*, 1240-1247. doi:10.1016/j.ijbiomac.2018.06.161
- Salgado-Cruz, M. d. I. P., Calderón-Domínguez, G., Chanona-Pérez, J., Farrera-Rebollo, R. R., Méndez-Méndez, J. V., & Díaz-Ramírez, M. (2013). Chia (*Salvia hispanica* L.) seed mucilage release characterisation. A microstructural and image analysis study. *Industrial Crops and Products*, *51*, 453-462. doi:10.1016/j.indcrop.2013.09.036
- Sarkar, P., Sahu, U., Binsi, P. K., Nayak, N., Ninan, G., & Ravishanker, C. (2018). Studies on physico-chemical and functional properties of some natural Indian gums. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, *37*. doi:10.18805/ajdfr.DR-1241
- Sciarini, L. S., Maldonado, F., Ribotta, P. D., Pérez, G. T., & León, A. E. (2009). Chemical composition and functional properties of *Gleditsia triacanthos* gum. *Food Hydrocolloids*, *23*(2), 306-313. doi:10.1016/j.foodhyd.2008.02.011
- Segura-Campos, M., Ciau-Solís, N., Rosado-Rubio, G., Chel-Guerrero, L., & Betancur, D. (2014). Chemical and Functional Properties of Chia Seed (*Salvia hispanica* L.) Gum. *International Journal of Food Science*, *2014*, 1-5. doi:10.1155/2014/241053
- Singh, H., & Gallier, S. (2014). Chapter 2 - Processing of Food Structures in the Gastrointestinal Tract and Physiological Responses. In M. Boland, M. Golding, & H. Singh (Eds.), *Food Structures, Digestion and Health* (pp. 51-81). San Diego: Academic Press.
- Soriano, M. (2004). *Análisis de sistemas pectinolíticos bacterianos. Aislamiento y caracterización de pectinasas*. . (PhD Thesis), Universidad de Barcelona,
- Sworn, G. (2000). Chapter 6: Xanthan Gum. In G. O. Phillips & P. A. Williams (Eds.), *Handbook of hydrocolloids*: Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.
- Tamargo, A., Cueva, C., Laguna, L., Moreno-Arribas, M. V., & Muñoz, L. A. (2018). Understanding the impact of chia seed mucilage on human gut microbiota by using the dynamic gastrointestinal model simgi®. *Journal of Functional Foods*, *50*, 104-111. doi:10.1016/j.jff.2018.09.028
- Tharakan, A., Norton, I. T., Fryer, P. J., & Bakalis, S. (2010). Mass transfer and nutrient absorption in a simulated model of small intestine. *Journal of Food Science*, *75*(6), E339-E346. doi:10.1111/j.1750-3841.2010.01659.x
- Timilsena, Y. P., Adhikari, R., Kasapis, S., & Adhikari, B. (2016). Molecular and functional characteristics of purified gum from Australian chia seeds. *Carbohydrate polymers*, *136*, 128-136. doi:10.1016/j.carbpol.2015.09.035
- Topping, D. L., & Clifton, P. M. (2001). Short-chain fatty acids and human colonic function: roles of resistant starch and nonstarch polysaccharides. *Physiological reviews*, *81*(3), 1031-1064.
- Torres, M. D., Moreira, R., Chenlo, F., & Vázquez, M. J. (2012). Water adsorption isotherms of carboxymethyl cellulose, guar, locust bean, tragacanth and xanthan

- gums. *Carbohydrate polymers*, 89(2), 592-598. doi:10.1016/j.carbpol.2012.03.055
- Tsami, E., Vagenas, G. K., & Marinou-Kouris, D. (1992). MOISTURE SORPTION ISOTHERMS of PECTINS. *Journal of Food Processing and Preservation*, 16(3), 151-161. doi:10.1111/j.1745-4549.1992.tb00197.x
- Tungland, B. C., & Meyer, D. (2002). Nondigestible oligo- and polysaccharides (dietary fiber): Their physiology and role in human health and food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 1(3), 90-109. doi:10.1111/j.1541-4337.2002.tb00009.x
- Ünal, Y. (2015). Xanthan Gum. *Gida/The Journal of Food*, 8(1).
- Velázquez-Gutiérrez, S. K., Figueira, A. C., Rodríguez-Huezo, M. E., Román-Guerrero, A., Carrillo-Navas, H., & Pérez-Alonso, C. (2015). Sorption isotherms, thermodynamic properties and glass transition temperature of mucilage extracted from chia seeds (*Salvia hispanica* L.). *Carbohydrate polymers*, 121, 411-419. doi:10.1016/j.carbpol.2014.11.068
- Verhoeckx, K., Cotter, P., López-Expósito, I., Kleiveland, C., Lea, T., Mackie, A., . . . Wichers, H. (2015). *The Impact of Food Bioactives on Health: In Vitro and Ex Vivo Models* (C. E. C. i. S. a. Technology Ed.). SpringerOpen: Cost European Cooperation in Science and Technology.
- Viebke, C., Al-Assaf, S., & Phillips, G. O. (2014). Food hydrocolloids and health claims. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 4(2), 101-114. doi:10.1016/j.bcdf.2014.06.006
- Wang, Q., Ellis, P. R., & Ross-Murphy, S. B. (2000). The stability of guar gum in an aqueous system under acidic conditions. *Food Hydrocolloids*, 14(2), 129-134. doi:10.1016/S0268-005X(99)00058-2
- Wong, J. M. W., Esfahani, A., Singh, N., Villa, C. R., Mirrahimi, A., Jenkins, D. J. A., & Kendall, C. W. C. (2012). Gut Microbiota, Diet, and Heart Disease. *Journal of AOAC International*, 95(1), 24-30. doi:10.5740/jaoacint.SGE_Wong
- Wüstenberg, T. (2014). *Cellulose and Cellulose Derivatives in the Food Industry*: Wiley - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Wyatt, N. B., & Liberatore, M. W. (2009). Rheology and viscosity scaling of the polyelectrolyte xanthan gum. *Rheology and viscosity scaling of the polyelectrolyte xanthan gum*, 114(6), 4076-4084. doi:10.1002/app.31093
- Yoo, S.-H., Fishman, M. L., Hotchkiss, A. T., & Lee, H. G. (2006). Viscometric behavior of high-methoxy and low-methoxy pectin solutions. *Food Hydrocolloids*, 20(1), 62-67. doi:10.1016/j.foodhyd.2005.03.003
- Zhang, L.-M., Zhou, J.-F., & Hui, P. S. (2005). A comparative study on viscosity behavior of water-soluble chemically modified guar gum derivatives with different functional lateral groups. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(15), 2638-2644. doi:10.1002/jsfa.2308
- Zhou, P., Theil, P. K., Wu, D., & Knudsen, K. E. B. (2018). In vitro digestion methods to characterize the physicochemical properties of diets varying in dietary fibre source and content. *Animal Feed Science and Technology*, 235, 87-96. doi:10.1016/j.anifeedsci.2017.11.012
- Zied, S., Elie, A.-J., Luc, P., & Didier Le, C. (2012). Anionic Polysaccharide Hydrogels with Charges Provided by the Polysaccharide or the Crosslinking Agent. *Drug Delivery Letters*, 2(4), 240-250. doi:10.2174/2210304x11202040002

ANEXOS

Anexo 1. Cuadro resumen comparativo de algunas particularidades de los hidrocoloides estudiados.

Hidrocoloide	Goma Guar		Goma Xanthan		Pectina HM		Mucilago de chia
PM	2 - 5x10 ⁶ Da		2 - 20 x10 ⁶ Da		3 - 5 x10 ⁶ Da		0,8 - 2 x10 ⁶ Da
Composición	Cadena principal de D-manosa β-(1→4) y ramificaciones de D-galactosa α-(1→6), en una relación 1,6:1 respectivamente.		Cadena principal de D-glucosa β-(1→4) y cadenas laterales de trisacáridos: dos residuos de α-D-manosa y uno de ácido β-D-glucurónico.		Cadena de ácido α-D-galacturónico (1→4) interrumpidos con residuos de α-L-ramnosa (1→2).		Tetrasacárido con dos residuos de β-D-xilopiranosilo, uno de α-D-glucopiranosilo y ramas laterales de ácido 4-O-metil-α-D-glucopiranosilurónico.
Estructura	<p style="text-align: center;">Ramificada</p>  <p style="text-align: center;">BeMiller (2019a)</p>		<p style="text-align: center;">Ramificada</p>  <p style="text-align: center;">Chaplin (2018)</p>		<p style="text-align: center;">Lineal</p>  <p style="text-align: center;">Chaplin (2001)</p>		<p style="text-align: center;">Lineal</p>  <p style="text-align: center;">Lin et al. (1994)</p>
Grado de Fermentación	Parcial		Parcial		Parcial		Parcial
Carga	Neutro		Aniónico		Aniónico		Aniónico
Frente a pH	pH 1-10,5: Estable. pH 7,5-9: Hidratación óptima.		pH 1,5-11: Estable. pH 6-8: Máxima viscosidad de solución al 0,25% w/w.		pH 2-7: En soluciones inferiores a 0,5% w/w aumenta la viscosidad. pH >7: Inestable por degradación.		-
pKa	3,7		2,9		3,1		-
Propiedades Tecnológicas	Espesante, estabilizador, emulsionante.		Espesante, estabilizante y emulsionante.		Espesante y estabilizante.		Espesante y emulsionante.
		Mubarak (2000)		Sworn (2000)		Lopes da Silva and Rao (2006)	Capitani et al. (2013)