

PROPIEDADES FUNCIONALES Y APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE FRUCTANOS

**María Guadalupe Sosa-Herrera, Virginia Agustina
Delgado-Reyes**

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, México

lsosah@comunidad.unam.mx, vdr1881@gmail.com

<https://doi.org/10.3926/oms.357>

Sosa-Herrera, M.G., & Delgado-Reyes, V.A. (2016). Propiedades funcionales y aplicaciones tecnológicas de fructanos. En M.E. Ramírez Ortiz (Ed.). *Alimentos Funcionales de Hoy*. Barcelona, España: OmniaScience. 97-116.

Resumen

En este capítulo se realiza una breve revisión acerca de los fructanos, considerando algunas de sus fuentes de extracción más difundidas comercialmente, partiendo de la diferenciación de sus estructuras, y posteriormente resaltando a parte de sus propiedades prebióticas su potencial en diferentes aplicaciones tecnológicas en el área de alimentos, particularmente para los fructanos de agave de los cuales aún existe poca información documentada en torno a su funcionalidad tanto en la salud como en el desarrollo de estructuras base para la creación de productos alimenticios. Adicionalmente se hace una revisión de los procesos generales de obtención de fructanos, a través de la exploración de patentes para las tres principales fuentes: achicoria, alcachofa de Jerusalem y agave.

Palabras clave

Fructanos, inulina, agave, achicoria, alcachofa Jerusalem.

4.1. Introducción

En respuesta a la demanda de los consumidores por productos alimenticios más saludables, la relación de nutrición y salud aporta un nuevo concepto, alimentos funcionales, los cuales promueven el bienestar y la posibilidad de reducir el riesgo de enfermedades. En este sentido, los fructanos como prebióticos son un factor importante en la industria de alimentos funcionales debido a su efecto benéfico sobre la salud.

Los fructanos son un grupo de oligosacáridos y fructooligosacárido presentes en la naturaleza los cuales se encuentran acumulados en cantidades de miligramos en una gran variedad de plantas, incluyendo la achicoria, la alcachofa de Jerusalén, el ajo, la cebolla, los espárragos, las plantas de la especie *agavaceae* (Praznik, Löpert & Huber, 2007) y también son producidos por algunas especies de bacterias (Arvidson, Rinehart & Gadala-María, 2006). A pesar de sus similitudes, los fructanos son distintos el uno del otro en su origen, la estructura y las características de fermentación (Anadón, Martínez-Larrañaga, Caballero & Castellano, 2010; Mueller et al., 2016).

Sólo unas pocas plantas que contienen fructanos se utilizan actualmente en la industria de alimentos funcionales, incluyendo la achicoria (*Cichorium intybus*), la alcachofa de Jerusalén (*Helianthus tuberosus*) y el agave (*Agave tequilana*). La achicoria y la alcachofa de Jerusalén contienen fructanos tipo inulina, siendo predominantemente no ramificados. Mientras que, los fructanos de agave poseen una estructura de tipo mixta que les provee la característica de ser ramificados (Roberfroid & Delzenne, 1998). El organismo no es capaz de digerir estos compuestos ni de asimilarlos, sin embargo pueden ser utilizados como sustrato energético por las bacterias del intestino grueso, en particular por las del género *Bifidobacterium*. De esta forma, los fructanos favorecen el crecimiento y renovación de los colonocitos, lo cual se considera de interés.

Las diferencias estructurales entre los distintos tipos de fructanos representan un punto importante a considerar para definir sus aplicaciones tecnológicas. Hasta ahora, el enfoque científico ha estado más centrado en los fructanos no ramificados tipo inulina, aislados de la achicoria y la alcachofa de Jerusalén, y no tanto en el efecto de los de estructura mixta ramificada como los fructanos de agave. Mientras que los fructanos lineales tienden a formar geles (Espinosa-Andrews & Urias-Silvas, 2012), los ramificados, en medio

acuoso, desarrollan disoluciones de baja viscosidad, similar a los azúcares simples (Martínez-Padilla, 2016) y adicionalmente se ha demostrado que presentan propiedades de superficie las cuales son de utilidad al desarrollar sistemas dispersos alimenticios (Sosa-Herrera, Martínez-Padilla, Delgado-Reyes & Torres-Robledo, 2016).

4.2. Estructura de los fructanos

Los fructanos son moléculas sintetizadas por plantas y bacterias. Su estructura varía dependiendo de su origen. En diversas variedades de plantas, son carbohidratos de reserva en partes específicas de éstas (Jaime et al., 2000; Ritsema & Smeekens, 2003), en la Tabla 24 se muestran algunos ejemplos. La capacidad de las plantas de sintetizar fructanos, se ha asociado con la supervivencia de éstas a cambios ambientales (climas fríos y secos), lo que parece indicar que juegan un papel en la respuesta a condiciones de estrés (Ritsema & Smeekens, 2003), encontrándose como mezclas heterogéneas, que muestran diferentes grados de polimerización y estructuras (Mancilla-Margalli & López, 2006).

Las bacterias ácido lácticas de los géneros *Streptococcus*, *Leuconoctoc*, y *Lactobacillus* y algunas especies no ácido lácticas como *Bacillus subtilis* y *Bacillus polymyxa* produ-

Fuente	Parte de la planta
Achicoria (<i>Cichorium intybus</i>)	Raíz
Dalia (<i>Dahlia variabilis</i>)	Tubérculos
Tulipán (<i>Tulipa gesneriana</i>)	Bulbos
Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	Bulbos
Alcachofa de Jerusalem (<i>Heliantus tuberosus</i>)	Tubérculo
Lirios (<i>Hemerocallis</i> y <i>Campanula rapunculoides</i>)	Pétalos

Tabla 24. Parte de la planta donde los fructanos son sintetizados y almacenados (Ritsema & Smeekens, 2003).

cen fructanos (Tabla 25), los cuales han sido descritos como polisacáridos extracelulares. La función de estos polisacáridos es de brindar protección a la bacteria contra la desecación, la fagocitosis, la depredación por protozoos, el ataque de fagos, antibióticos, toxinas y estrés osmótico. Los polisacáridos extracelulares representan un papel importante en el reconocimiento celular, adhesión a superficies y formación de biopelículas facilitando de esta forma la colonización de las bacterias en varios ecosistemas (Ruas-Madiedo, Hugenholtz & Zoon, 2002).

Los fructanos están constituidos por unidades de fructofuranosil unidas por enlaces β identificándose cinco principales tipos (Mancilla-Margalli & López 2006; Ritsema & Smeeckens, 2003; Waleckx, Gschaedler, Colonna-Ceccaldi & Monsan, 2008): (i) Inulina con enlaces $\beta(2-1)$ lineales descrita en Asterales, (ii) levana con enlaces $\beta(2-6)$ encontrada en pastos *Phleum pratense*, (iii) graminados los cuales

Microorganismo	Tipo de fructano	Referencia
<i>Bacillus polymyxa</i>	Levana	Han (1989)
<i>Bacillus circulans</i>	Levana	Perez Oseguera, Guereca & López-Munguía (1996)
<i>Lactobacillus Sanfranciscensis</i>	Levana	Dal Bello, Walter, Hertel & Hammes (2001)
<i>Streptococcus salivarius</i> <i>Streptococcus mutans</i>	Levana Similar a inulina	Ruas-Madiedo et al. (2002)
<i>Leuconostoc citrem</i>	Inulina	Olivares-Illana, Wachter-Rodarte, Le Borgne & López-Munguía (2002)
<i>Lactobacillus reuteri</i>	Levana	van Hijum, Bonting, J.E.C.M., Maarel & Dijkhuizen (2001)
<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	Levana	Morales-Arrieta, Rodríguez, Segovia, López-Munguía & Olvera-Carranza (2006)
<i>Erwinia amylovora</i>	Levana	Caputi, Nepogodiev, Malnoy, Rejzek, Field & Benini (2013)

Tabla 25. Microorganismos productores de fructanos.

son una mezcla de fructanos que contienen enlaces $\beta(2-1)$ y $\beta(2-6)$ generalmente ramificados que se encuentran en trigos y espárragos, (iv) neo-inulina, la cual contiene una glucosa entre dos unidades de fructofuranosil con enlaces $\beta(2-1)$, presentes en cebolla y espárragos y (v) neo-levana formada por enlaces $\beta(2-1)$ y $\beta(2-6)$ donde en cada extremo de una molécula de sacarosa central hay un residuo de fructofuranosil (Figura 10).

México ha sido considerado como el centro de origen y diversidad biológica de fructanos del género *Agave*, debido a la diversidad taxonómica dentro de su territorio. De las 310 especies reportadas, más de 272 se pueden localizar en este país. Los miembros de la familia *Agavaceae* se adaptan bien en las regiones áridas y

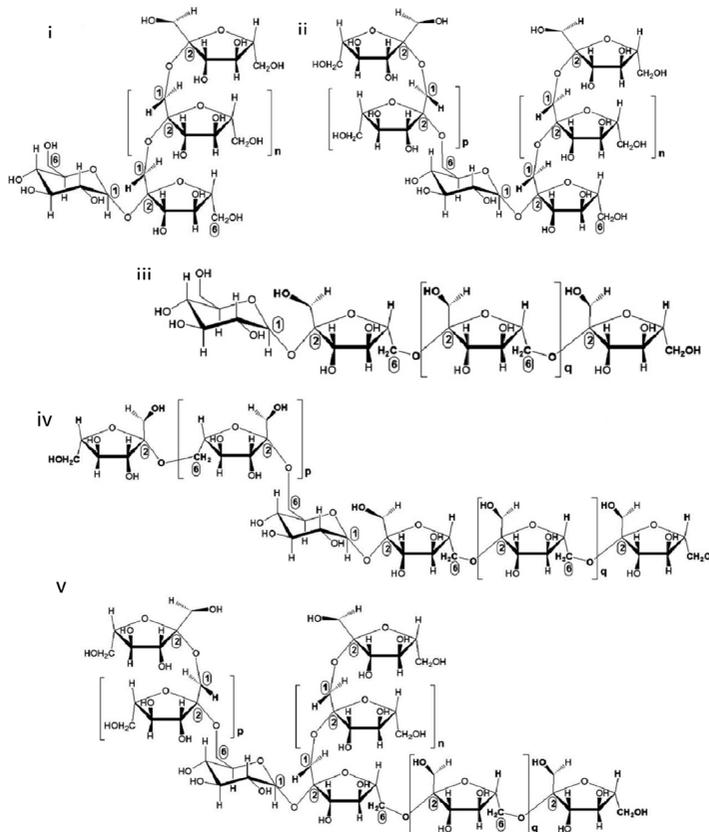


Figura 10. Diferentes tipos de fructanos i) inulina, ii) levana, iii) gaminados, iv) neo-inulina, v) neo-levana (Adaptada de Waleckx et al., 2008).

semiáridas (López, Mancilla-Margalli & Mendoza-Díaz, 2003). Mancilla-Margalli y López (2006) propusieron tres grupos de fructanos para las especies de *Agave* y *Dasyliirion* reportando dos tipos de moléculas dentro de cada grupo (A para las gramíneas y B para las agavinas), donde $n_1 - n_4 \geq 0$; y n es función de las especies de plantas y condiciones ambientales (Figura 11).

4.3. Procesos de obtención

Después de almidón, los fructanos son los más abundantes polisacáridos no estructurales que se encuentran en la naturaleza. Actualmente, en la industria alimentaria se emplean principalmente tres especies de plantas para la produc-

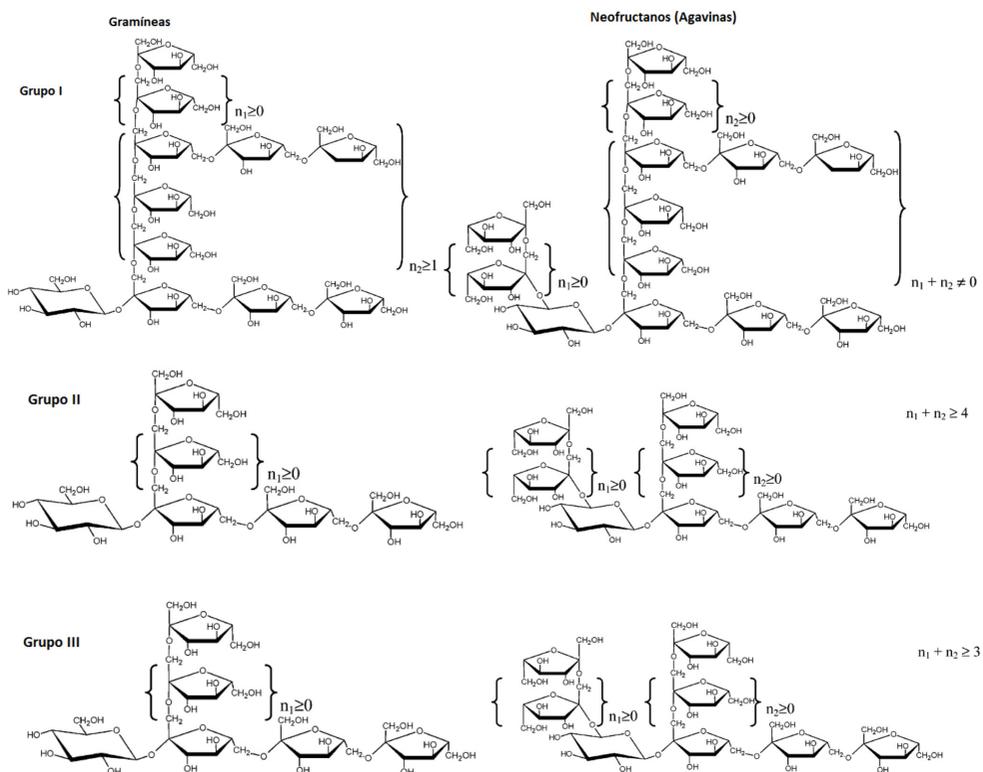


Figura 11. Estructuras propuesta para las especies *Agave* y *Dasyliirion*, en base a la estructura molecular se presentan tres grupos y dos tipos de fructanos dentro del grupo (A gramíneas y B agavinas) (Mancilla-Margalli & López 2006).

ción a gran escala de fructanos: de agave (*Agave tequilana* Azul), alcachofa de Jerusalem (*Helianthus tuberosus*), y la achicoria (*Cichorium intybus*) (Carabin & Flam, 1999). La achicoria es una planta bienal. El contenido de fructanos en la planta es alto y suele ser constante de año en año para una región dada. Con respecto a los de agave, la principal diferencia es que la acumulación de fructanos en estas plantas puede tomar desde 3 hasta 8 años. No obstante, las plantas de agave acumulan entre 13 y 17% (p/p) en plantas maduras, lo cual es similar a la cantidad encontrada en achicoria (15.2-20.5% (p/p) (Ávila-Fernández, Galicia-Lagunas, Rodríguez-Alegría, Olvera & López-Munguía, 2011).

Debido a su amplia distribución en la naturaleza y su significativo papel en la industria, la extracción, aislamiento y caracterización de los fructanos ha ganado atención en los últimos años. Se han desarrollado investigaciones para establecer las condiciones óptimas de extracción con el fin de mejorar la extracción de los fructanos a partir de plantas, siendo la temperatura, el tiempo de extracción, y la relación disolvente/sólido, los factores identificados como los más importantes que influyen en el rendimiento. La solubilidad de fructanos en agua aumenta notablemente con la temperatura, siendo casi insoluble a temperatura de 25°C y alcanzando aproximadamente el 35% (peso/volumen) a 90°C, por lo tanto, el proceso de producción industrial se basa principalmente en difusión en agua caliente (Apolinário, Goulart de Lima Damasceno, de Macedo Beltrao, Pessoa & da Silva, 2014). Siguiendo este concepto casi todos los métodos de extracción de fructanos que se han descrito en la literatura, mencionan al agua caliente como disolvente, sólo con pequeñas diferencias de temperatura y tiempos de extracción.

La extracción asistida por ultrasonido se ha propuesto recientemente para mejorar el rendimiento de extracción de fructanos en comparación con los métodos tradicionales. Las principales variables son la amplitud de sonicación, la temperatura y el tiempo. Sin embargo, es necesario tener precaución en el uso de ultrasonido para extraer los fructanos debido a que algunos fragmentos de bajo peso molecular se forman por la acción directa de ultrasonido, produciendo cambios en la composición química de los mismos; por lo tanto, su uso directo ha sido sugerido para su despolimerización cuando se desea obtener fructanos de cadena corta, mientras que la sonicación indirecta se recomienda más adecuada para extraer los naturales (Lingyun et al., 2007). En el método directo se inserta una sonda directamente en un recipiente conteniendo la muestra, mientras que la sonicación indirecta se realiza sumergiendo la muestra en un baño de limpieza por ultrasonidos y agitando periódicamente con el agitador orbital.

Dependiendo de la fuente vegetal utilizada, se realizan operaciones de acondicionamiento como pueden ser pelado, secado, limpieza, desinfección y escaldado, para el caso particular de los fructanos de achicoria, generalmente conocidos como inulina, se extraen de las raíces de achicoria fresca, prestando particular atención en la inhibición de la actividad de inulasa propia de la planta y la hidrólisis ácida. A través de dos métodos diferentes, la industria alimentaria produce dos tipos de productos de la achicoria. La inulina, que contiene una mezcla de fructanos de cadena corta y larga, se produce mediante extracción con agua caliente de la planta de achicoria. Las raíces de achicoria son lavadas, cortadas en cubos, y sometidas a extracción. El jarabe semirefinado a continuación se purifica mediante técnicas de separación física para producir un producto de más del 99% de pureza. Los oligofructanos, que contienen sólo las moléculas con grado de polimerización menor de 10, se producen por un método similar, con la adición de la hidrólisis enzimática parcial de la corriente de procesamiento de inulina después de la extracción inicial (Carabin & Flam, 1999).

De acuerdo con una patente para extractos de achicoria (Grimm & Loehmar, 1999), un producto caramelizado de achicoria soluble en agua tiene una composición que incluye, en peso, un contenido de inulina de entre 40% y 65%, un contenido de azúcares reductores entre 4% y 10% y una combinación de fructosa y glucosa de menos de 5%. El producto se prepara mediante la extracción de la achicoria secada al horno con agua para obtener un extracto o pulsando la raíz de achicoria para obtener un extracto, éste se calienta en un extractor tubular para hidrolizar una parte del contenido de inulina con la finalidad de aumentar el contenido de azúcares reductores, el extracto tratado con calor se seca para obtener un polvo, el cual se hace pasar a través de una extrusora y se somete a una temperatura entre 180°C y 250°C.

Por otro lado, la patente americana US 4871574 (Yamazaki et al., 1989), describe la obtención de harina de tubérculos de alcachofa de Jerusalem o productos similares que contienen inulina y pueden emplearse directamente o ser la materia prima para la obtención de fructosa u oligosacáridos. En un procedimiento, una harina se prepara a partir dichos tubérculos, que comprende las etapas de: la maceración de los tubérculos de un líquido homogeneizado, preferiblemente en un ambiente de vapor de agua; calentar el homogeneizado líquido a una temperatura aproximada de 150°C durante un tiempo que oscila entre 15 segundos a aproximadamente 10 minutos; sometiendo el fluido calentado y homogeneizado, a secado por aspersión en una corriente de gas caliente. La recuperación es una

harina que comprende una mezcla de monosacáridos, así como fructooligosacáridos y oligosacáridos. En otro proceso, un acidulante de calidad alimentaria, se añade, preferiblemente ácido acético, ya sea antes, durante o después de la etapa de maceración para proporcionar un homogeneizado líquido acidificado de dichos tubérculos. La harina recuperada es más dulce que la que se recupera en el primer procedimiento descrito, debido a la presencia de más de fructosa en el mismo.

Con relación a los fructanos de agave, La patente WO 2002066517 A1 (Legorreta & Ogura, 2002) detalla un proceso para elaboración de diferentes productos de fructanos, en donde se describe como las cabezas o piñas del agave se someten a una serie de etapas para la obtención de fructanos, entre las que destacan: molido, dilución con agua a una temperatura de entre 80-99°C, tratamiento con carbón activado, tratamiento con intercambiadores iónicos, eliminación de calcio y eliminación de quelatos. El producto final es una solución de fructanos muy purificados y con bajo contenido en calcio. A lo largo del proceso, en las diferentes etapas, se obtienen una serie de productos intermedios valiosos como la harina de agave, o distintas soluciones de fructanos (sin fibra, con calcio, sin calcio, entre otras). Estas soluciones pueden someterse a un proceso de secado para obtenerlas en forma de polvo o escamas.

4.4. Función de los fructanos como prebiótico

El equilibrio de la microbiota intestinal es de importancia en la salud humana ya que incrementa la resistencia a la colonización microbiana, la modulación del sistema inmune, favorece la digestión y la asimilación de los nutrientes. El equilibrio se debe de dar entre las bacterias benéficas tales como los *Lactobacilos* y las *Bifidobacterias* y los microorganismos patógenos. La composición y la actividad de la microbiota puede verse influenciada por varios factores externos, incluyendo el uso de antibióticos y la ingesta de alimentos o ingredientes alimenticios funcionales tales como probióticos y/o prebióticos (Ritsema & Smeekens 2003; Koenen, Cruz, Mueller & Venema, 2016).

Los principales factores responsables de que un polisacárido pueda ejercer un efecto prebiótico son la estructura química, la composición, el grado de polimerización, su estructura (lineal o ramificada), así como la solubilidad en agua (Márquez-Aguirre et al., 2013).

Los beneficios de los fructanos para la salud humana han sido estudiados desde hace más de una década (Ritsema & Smeekens, 2003). Por ser una fibra alimentaria que favorece el crecimiento de bacterias ácido lácticas (Koenen et al., 2016; Bosscher, Van & Franck, 2016), se ha definido como un prebiótico que provoca cambios específicos en la composición y/o la actividad de la microbiota gastrointestinal, por su resistencia al ambiente gástrico y no ser digerible por las enzimas digestivas humanas debido a sus enlaces β presentes en su estructura (Márquez-Aguirre et al., 2013; Bosscher, et al., 2016; Koenen et al., 2016).

Los fructanos pueden ejercer su efecto benéfico a través de mecanismos directos o indirectos. Los mecanismos indirectos implican una estimulación del crecimiento de las bacterias probióticas y pueden ser causadas por sus productos de fermentación tales como los ácidos grasos de cadena corta. Un efecto directo se ha sugerido para los fructanos tipo inulina en un perfil de lípidos o en la inmunomodulación a través de la activación de los receptores tipo Toll, (Mueller et al., 2016). Mientras que el efecto directo de fructooligosacáridos de agave se da sobre los parámetros metabólicos (Márquez-Aguirre et al., 2013) y como inmunomodulador (Moreno-Vilet et al., 2014). El grado de polimerización (DP) de fructanos tiene un impacto importante en la cinética de la fermentación por las bacterias probióticas y por lo tanto sobre el efecto benéfico. Para la mayoría de las cepas probióticas, los fructanos tipo inulina con menor DP permiten un crecimiento más rápido de los *Lactobacilos* y *Bifidobacterias* en comparación con los de mayor DP. Las inulinas de cadena más larga, sin embargo, muestran un efecto prebiótico más pronunciado afectando no sólo a los probióticos en el colon proximal, sino también en el colon distal. Además, la gama de DP de fructanos tipo inulina tiene un impacto en el perfil de ácidos grasos de cadena corta, de tal manera que el aumento de butirato se puede encontrar solamente en las muestras fecales de ratas alimentadas con inulina de alto DP. Para los fructanos de agave ramificados, de tipo mixto, se reporta una dependencia similar. La cepas probióticas prefieren las fuentes de fructanos con diferente DP y crecen sólo, o más rápido con fructanos de bajo DP (Mueller et al., 2016). El efecto de fructanos de agave y de la achicoria en la ingesta de alimentos y el aumento de peso ha demostrado ser dependiente también del DP, así como de la estructura de los fructanos. De hecho, los fructanos de agave tienen un efecto significativo sobre la reducción de peso y el aumento de la secreción de péptidos implicados en la regulación del apetito, mientras que la inulina de la achicoria no ha mostrado tales efectos (Santiago-García & López, 2014). Recientemente se ha reportado la dependencia del DP y la estructura de fructanos en la formación de ácidos grasos de cadena

corta que juegan un papel importante en la salud del intestino. La producción de lactato y butirato es mayor a partir de fructanos con menor DP. Los fructanos ramificados con alto DP conducen a una formación de butirato más alta que los fructanos no ramificados con alto DP (Mueller et al., 2016).

Adicionalmente, estudios realizados por Márquez-Aguirre et al. (2013) demostraron que la ingesta de fructanos de agave con un bajo grado de polimerización < 10 , en un modelo de ratones obesos impidió el aumento del peso corporal, acumulación de tejido graso y redujo el colesterol total, pero no encontraron incremento en el número de *Bifidobacterias*. A diferencia de la ingesta de fructanos desmineralizados donde sí hubo un aumento en el número de *Bifidobacterias*. Basados en esos resultados estos autores, concluyen que tanto el grado de polimerización y el proceso de desmineralización pueden influir en la actividad biológica de los fructanos de agave.

4.5. Aplicaciones tecnológicas

Es importante tener en cuenta que las aplicaciones tecnológicas de los fructanos dependen directamente de sus características estructurales, las cuales a su vez están asociadas con la fuente de su origen. De esta forma, los fructanos tipo inulina han captado la atención en cuanto a su incursión en diferentes sistemas alimenticios, sus usos tecnológicos se basan en sus propiedades como sustitutos de azúcar (especialmente en combinación con endulzantes de alta intensidad), como sustitutos de grasa y formador de geles.

La molécula de inulina es muy pequeña y su retención de agua es baja comparada con otros hidrocoloides, cuando las concentraciones sobrepasan el 15%, la inulina de cadena larga tiene la habilidad de formar geles. Debajo de esta concentración, se obtienen soluciones acuosas de baja viscosidad. La formación de un gel está basada en la precipitación y cristalización de las moléculas de inulina, la cual depende de la concentración, temperatura y pH. En algunas investigaciones se ha demostrado que sólo las moléculas largas de inulina ($DP > 10$) participan en la estructura del gel y las pequeñas permanecen disueltas (Meyer, 2009; Kim, Fagih & Wang, 2001).

La formación de geles de inulina es diferente con respecto a la de otros hidrocoloides. La inulina de cadena larga forma geles de partículas, similares a los que

son formados por algunos almidones (Meyer, Bayari, Torrega & Costel, 2011), la presencia de otros hidrocoloides y las condiciones de proceso, tales como la temperatura y la velocidad de mezclado afecta la formación de los mismos, a niveles de concentración por encima de 25%, la disolución presenta partículas de gel con características parecidas a las de las grasas, por encima del 50% en concentración éstas mantienen una textura similar a la grasa y se convierten en geles más firmes (Zimeri & Kokini, 2002).

Debido a la alta cantidad de grupos hidroxilo contenidos en la inulina, se favorece la formación de puentes de hidrógeno en sistemas de alimentos, y esto puede influenciar la solubilidad de otros ingredientes que captan el agua como la goma guar, xantana, carragenina, alginatos, pectina, maltodextrina y almidones. Por lo que la inulina forma parte en la competencia del agua como disolvente (Meyer, 2009).

Se ha demostrado que la inulina en combinación con otros hidrocoloides, puede influir el comportamiento reológico de éstos (Meyer, 2009). Aunque la inulina de cadena corta no actúa como un gelificante en combinación con otros hidrocoloides, puede modificar las propiedades reológicas de productos alimenticios. La adición de inulina con otros hidrocoloides espesantes puede modificar la viscosidad (incremento o disminución) y las características de flujo del sistema acuoso (Ronkart, Deroanne, Paquot & Fougnes, 2010),

Por otra parte la cristalización de la inulina y sus efectos en las propiedades reológicas de postres lácteos que cuentan con una red tridimensional en su estructura depende de la distribución de longitud de cadena. Consistencia, elasticidad y mayor presencia de agregados de inulina incrementaron con la proporción de moléculas de cadena larga ($DP > 20$) (Tárreaga, Torres & Costell, 2011).

Se ha observado que la incorporación de oligofructosa en leche fermentada a concentraciones de 2% a 5% disminuye la dependencia con el tiempo de cizallamiento, el comportamiento fluidificante y el índice de consistencia, debido a un posible efecto sobre la oligofructosa, el cual resulta en una menor hidratación y reducción del volumen hidrodinámico de la proteína, causando una disminución en la viscosidad (Meyer et al., 2011). Por otra parte, se ha visto que la inulina de cadena mediana adicionada en helados bajos en grasas a concentraciones de 5%, 7% y 9%, provoca un incremento en el índice de consistencia y la viscosidad aparente; así como en el grado de

fusión, que disminuyó con un aumento en la concentración. Esto a consecuencia de que la inulina actúa como un estabilizador, debido a su capacidad de captar agua; las moléculas de agua se inmovilizan y no es posible que se muevan libremente entre las moléculas de la mezcla de hielo (Meyer et al., 2011; Crispín-Isidro, Lobato-Calleros, Espinosa-Andrews, Alvarez-Ramirez & Vernon-Carter, 2014).

En general, la solubilidad en medio acuoso de los fructanos está determinada por las características estructurales de los mismos; los fructanos lineales resultan los menos solubles, mientras que los más ramificados son los de mayor grado de solubilidad (López & Urías-Silvas, 2007; Mancilla-Margalli & López, 2006). El grado de polimerización y por ende el peso molecular, son factores importantes de la solubilidad en agua de los fructanos, a medida que aumenta el grado de polimerización y con ello el peso molecular, la solubilidad va disminuyendo gradualmente. Así mismo, Espinoza-Andrews y Urías-Silvas (2012), reportaron que los fructanos de agave mostraron una mayor capacidad de absorción de agua en comparación con los fructanos de achicoria, ya que las cadenas ramificadas y la presencia de restos de fructosa contienen una mayor cantidad de grupos hidroxilos disponibles para retenerla.

El estudio de las propiedades reológicas de los fructanos de agave es escaso, Sosa-Herrera et al. (2016) reportaron que el efecto de la concentración de fructanos sobre la viscosidad, en sistemas acuosos, fue similar a la de soluciones de fructosa o sacarosa. Sugiriendo que la dependencia del comportamiento reológico de los fructanos en función de la concentración, es más cercano al de los monosacáridos de bajo peso molecular que al de polisacáridos de alto peso molecular. Adicionalmente, se reportan curvas de adsorción en interfase líquido-aire con una tendencia sigmoidea que está asociada con biopolímeros de superficie activa, donde las macromoléculas se difunden lentamente de la fase acuosa a la región debajo de la superficie seguida de la adsorción de segmentos de polímero en la interfase. La actividad superficial de los fructanos se atribuye a su naturaleza polar, que es causada por los grupos hidroxilo en su estructura.

Actualmente la incorporación de fructanos de agave en diferentes tipos de alimentos es limitado, sin embargo, Crispín-Isidro et al. (2014) realizaron un estudio en donde evaluaron el efecto de la adición de fructanos de agave y de achicoria en un yogurt batido bajo en grasa, sobre la reología, la microestructura, y la

aceptabilidad sensorial. Los resultados microestructurales y reológicos indicaron que los fructanos de agave participaron como un ingrediente activo en la red de caseína, depositándose sobre la superficie de las micelas de caseína, mientras que la inulina formó partículas gelificadas al exterior de los agregados de proteína. Por lo tanto, la adición de ambos polisacáridos contribuyó a formar arreglos estructurales en el yogurt bajo en grasa que respondieron mecánicamente de una manera similar que el yogur tradicional.

Referencias

- Anadón, A., Martínez-Larrañaga, M.R., Caballero, V., & Castellano, V. (2010). Assessment of Prebiotics and Probiotics: An Overview. En R.R. Watson & V.R. Preedy (Eds.). *Bioactive Foods in Promoting Health: Probiotics and Prebiotics* (19-41). San Diego, CA: Academic Press.
- Apolinário, A.C., Goulart de Lima-Damasceno, B.P., de Macedo-Beltrao, N.E., Pessoa, A., & da Silva, J.A. (2014). Inulin-type fructans: A review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology. *Carbohydrate Polymers*, 101, 368-378. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.081>
- Arvidson, S., Rinehart, T.B., & Gadala-María, F. (2006). Concentration regimes of solutions of levan polysaccharide from *Bacillus* sp. *Carbohydrate Polymers*, 65, 144-149. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.12.039>
- Ávila-Fernández, A., Galicia-Lagunas, N., Rodríguez-Alegría, M.E., Olvera, C., & López-Munguía, A. (2011). Production of functional oligosaccharides through limited acid hydrolysis of agave fructans. *Food Chemistry*, 129, 380-386. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.088>
- Bosscher, D., Van Loo, J., & Franck, A. (2016). Inulin and oligofructose as functional ingredients to improve bone mineralization. *International Dairy Journal*, 16, 1092-1097. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2005.10.028>
- Caputi, L., Nepogodiev, S.A., Malnoy, M., Rejek, M., & Field, R.A. (2013). Bio-molecular characterization of the levansucrase of *Erwinia amylovora*, a promising biocatalyst for the synthesis of fructooligosaccharides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61, 12265-12273. <https://doi.org/10.1021/jf4023178>

- Carabin, I.G., & Gary Flamm, W.G. (1999). Evaluation of safety of inulin and oligofructose as dietary fibre. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 30, 268-282. <https://doi.org/10.1006/rtph.1999.1349>
- Crispín-Isidro, G., Lobato-Calleros, C., Espinosa-Andrews, H., Alvarez-Ramirez, J., & Vernon-Carter, E.J. (2015). Effect of inulin and agave fructans addition on the rheological, microstructural and sensory properties of reduced-fat stirred yogurt. *LWT – Food Science and Technology*, 62, 438-444.
- Dal Bello, F., Walter, J., Hertel, Ch., & Hammes, W.P. (2001). In vitro study of prebiotic properties of Levan-type exopolysaccharides from Lactobacilli and non-digestible carbohydrates using denaturing gradient gel electrophoresis. *Systematic and Applied Microbiology*, 24, 232-237. <https://doi.org/10.1078/0723-2020-00033>
- Espinosa-Andrews, H., & Urias-Silvas, J.E. (2012). Thermal properties of agave fructans (Agave tequilana Weber var. Azul). *Carbohydrate Polymers*, 87, 2671-2676. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.11.053>
- Grimm R., & Loehmar, K. (1999). *Chicory extract powder products and extract production processes and apparatus*. Patente Oficial Europea 95101653.
- Han, Y.W. (1989). Levan production by Bacillus polymyxa. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 4, 447-451. <https://doi.org/10.1007/BF01569641>
- Jaime, L., Martínez, F., Martín-Cabrejas, M.A., Mollá, E., López-Andréu, F.J., Waldron, K.W. & Esteban, R.M. (2000). Study of total fructan and fructooligosaccharide content in different onion tissues. *Journal of the science of Food and Agriculture*, 81, 177-182. [https://doi.org/10.1002/1097-0010\(20010115\)81:2<177::AID-JSFA796>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1097-0010(20010115)81:2<177::AID-JSFA796>3.0.CO;2-9)
- Kim, Y., Fagih, M.N., & Wang, S.S. (2001). Factors affecting gel formation of inulin. *Carbohydrate Polymers*, 46, 135-145. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00296-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00296-4)
- Koenen, M.E., Cruz, R.J.M., Mueller, M., & Venema, K. (2016). The effect of agave fructan products on the activity and composition of the microbiota determined in a dynamic in vitro model of the human proximal large intestine. *Journal of Functional Food*, 22, 201-210. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.01.018>

- Legorreta, P.E., & Ogura, F.T. (2002). *Proceso, composición y usos de inulina de agave en polvo y solución*. Patente WO 2002066517 A1.
- Lingyun, W., Jianhua, W., Xiaodong, Z., Da, T., Yalin, Y., Chenggang, C., Tianhua, F., & Fan, Z. (2007). Studies on the extracting technical conditions of inulin from Jerusalem artichoke tubers. *Journal of Food Engineering*, 79, 1087-1093. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.028>
- López, M.G., Mancilla-Margalli, N.A., & Mendoza-Díaz, G. (2003). Molecular structures of fructans from Agave Tequilana Weber var. azul. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 7835-7840. <https://doi.org/10.1021/jf030383v>
- Mancilla-Margalli, N.A., & López, M.G. (2006). Water-soluble carbohydrates and fructan structure patterns from Agave and Dasyilirion species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 7832-7839. <https://doi.org/10.1021/jf060354v>
- Márquez-Aguirre, A.L., Camacho-Ruiz, R.M., Arriaga-Alba, M., Padilla-Camberos, E., Kirchmayr, M.R., Blasco, J.L., & González-Avila, M. (2013). Effects of Agave tequilana fructans with different degree of polymerization profiles on the body weight, blood lipids and count of fecal Lactobacilli/Bifidobacteria in obese mice. *Food & Function*, 8, 1237-1244. <https://doi.org/10.1039/c3fo60083a>
- Martínez-Padilla, L.P. (2016). Rheology of recent vegetal-based biopolymers. En M. Masuelli, & D. Renard (Eds.). *Advances in Physicochemical Properties of Biopolymers* (172-193). USA: Bentham Science Publishers.
- Meyer, D. (2009). Inulin. En G.O. Phillips, & P.A. Williams (Eds.). *Handbook of Hydrocolloids* (829-845). U.K.: CRC Press. <https://doi.org/10.1533/9781845695873.829>
- Meyer, D., Bayari, S., Torrega, A., & Costel, E. (2011). Inulin as a texture modifier in dairy products. *Food Hydrocolloids*, 25, 1881-1890. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.012>
- Morales-Arrieta, S., Rodríguez, M.E., Segovia, L., López-Munguía, A.G., & Olvera-Carranza, C. (2006). Identification and functional characterization of levS, a gene encoding for a levan sucrase from *Leuconostoc mesenteroides* NRRL B-512F. *Gene*, 376, 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2006.02.007>

- Mueller, M., Reiner, J., Fleischhacker, L., Viernstein, H., Loeppert, R., & Praznik, W. (2016). Growth of selected probiotic strains with fructans from different sources relating to degree of polymerization and structure. *Journal of functional Foods*, 24, 264-275. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.04.010>
- Olivares-Illana, V., Wachter-Rodarte, C., Le Borgne, S., & López-Munguía, A. (2002). Characterization of a cell-associated inulosucrase from a novel source: A *Leuconoctoc citreum* strain isolated from Pozol, a fermented corn beverage of Mayan origin. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 28, 112-217. <https://doi.org/10.1038/sj/jim/7000224>
- Perez-Oseguera, M.A., Guereca, L., & López-Munguía, A. (1996). Properties of levansucrase from *Bacillus circulans*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 45, 465-471. <https://doi.org/10.1007/s002530050714>
- Praznik, W., Löppert, R., & Hubber, A. (2007) Analysis and molecular composition of fructans from different plant sources. En N. Shiomi, N. Benkeblia, & S. Onodera (Eds.). *Recent advances in fructooligosaccharide research* (93-117). Kerala, India: Research Signpost.
- Ritsema, T., & Smeekens, S. (2003). Fructans: Beneficial for plant and humans. *Current Opinion in Plant Biology*, 6, 223-230. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00034-7)
- Roberfroid, M., & Delzenne, N. (1998). Dietary fructans. *Annual Review of Nutrition*, 18, 117-143. <https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.18.1.117>
- Ronkart, S.N., Deroanne, C., Paquot, M., & Fougnyes, C. (2010). Impact of the crystallisation pathway of inulin on its mono-hydrate to hemi-hydrate thermal transition. *Food Chemistry*, 119, 317-322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.06.035>
- Ruas-Madiedo, P., Hugenholtz, J., & Zoon, P. (2002). An overview of the functionality of exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria. *International Dairy Journal*, 12, 163-171. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(01\)00160-1](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(01)00160-1)

- Sosa-Herrera, M.G., Martínez-Padilla, L.P., Delgado-Reyes V.A., & Torres-Robledo, A. (2016). Effect of agave fructans on bulk and surface properties of sodium caseinate in aqueous media. *Food Hydrocolloids*, 60, 199-205. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.03.033>
- Tárreaga, A., Torres, J.D., & Costell, E. (2011). Influence of the chain-length distribution of inulin on the rheology and microstructure of prebiotic dairy desserts. *Journal of Food Engineering*, 104, 356-363. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.028>
- van Hijum, S.A.F.T., Bonting, K., van der, M., & Dijkhuizen, L. (2001). Purification of a novel fructosyltransferase from *Lactobacillus reuteri* strain 121 and characterization of the levan produced. *FEMS Microbiology Letters*, 205, 323-328. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2001.tb10967.x>
- Waleckx, E., Gschaedler, A., Colonna-Ceccaldi, B., & Monsan, P. (2008). Hydrolysis of fructans from *Agave tequilana* Weber var. azul during the cooking step in a traditional tequila elaboration process. *Food Chemistry*, 108, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.10.028>
- Yamazaki, H.N., Modler, H.W., Jones, J.D., & Elliot, J.I. (1989). *Process for preparing flour from Jerusalem artichoke tubers*. US Patent 4871574.
- Zimeri, J.E., & Kokini, J.L. (2002). The effect of moisture content on the crystallinity and glass transition temperature of inulin. *Carbohydrate Polymers*, 48, 299-304. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(01\)00260-0](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(01)00260-0)