

Artículo Revisión / Review Article

Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos

Resistant starch: Technological characteristics and physiological interests

RESUMEN

El almidón resistente es una fracción del almidón que es capaz de resistir a la digestión y se mantiene íntegro a lo largo del tracto gastrointestinal. Una de las ventajas de este almidón es que permite ser utilizado como un ingrediente que refuerza las características tecnológicas de los alimentos, además de otorgar beneficios fisiológicos asociados a la salud. De manera natural el almidón resistente podemos encontrarlo en granos de cereales, semillas, legumbres y tubérculos y en la industria alimentaria en una amplitud de productos asociados a la panificación, pastelería, galletería y cereales extruídos. Las ventajas tecnológicas de este almidón están explicadas por su microestructura, que permite obtener productos con una mejor textura, sin afectar las características de sabor, olor y color del alimento. Desde el punto de vista fisiológico, el almidón resistente es capaz de modular la cinética de digestibilidad de los nutrientes, lo que posibilita su incorporación en el diseño de productos con menor índice glicémico y menor poder energético. La modulación del metabolismo de la glucosa y los lípidos, así como las posibles asociaciones con la salud de la microbiota, indican que el almidón resistente podría ser un ingrediente con un gran potencial en el tratamiento de enfermedades crónicas.

Palabras clave: Almidón resistente; Fibra; Prebiótico; Fermentación; Índice glicémico.

ABSTRACT

Resistant starch is a fraction of starch able to resist digestion and remains intact in the gastrointestinal tract. One of the benefits of this starch is that it can be used as an ingredient that reinforces the technological characteristics of foods, in addition to providing physiological benefits related to health. Resistant starch are found naturally in cereal grains, seeds, legumes and tubers and, in the food industry, it is in products associated with baking, pastries, cookies and extruded cereals. The technological benefits provided by resistant starch are due to its microstructure, which makes possible the generation of products with a better texture, without affecting flavor, smell or coloring characteristics of the food. From a health point of view, resistant starch is

able to modulate nutrient digestibility kinetics, allowing its incorporation in the design of products with lower glycemic index and lower caloric value energy. Modulation of glucose and lipid metabolism, as well as possible associations with intestinal microbiota health, indicate that resistant starch could be an ingredient with great potential in the treatment of chronic diseases.

Keywords: Resistant starch; Fiber; Prebiotic; Fermentation; Glycemic index.

INTRODUCCIÓN

El almidón es la mayor fuente de hidratos de carbono en la dieta del ser humano y el polisacárido de almacenamiento más abundante en las plantas. Se presenta naturalmente

Pía Villarroel^{1,2}, Camila Gómez²,
Camila Vera², Jairo Torres^{2,3,4}.

1. Escuela de Nutrición y Dietética. Facultad de Ciencias, Universidad Mayor. Santiago - Chile.
2. Escuela de Nutrición y Dietética. Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad San Sebastián. Santiago - Chile.
3. Carrera de Nutrición y Dietética, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Chile. Santiago - Chile.
4. Universidad Tecnológica de Chile INACAP. Santiago - Chile.

Dirigir la correspondencia a: Pía Villarroel Heise.
Escuela de Nutrición y Dietética. Facultad de Ciencias.
Universidad Mayor, Campus Huechuraba.
Camino la Pirámide 5750, Santiago, Chile. Fono: 223281346.
E-mail: pia.villarroel@umayor.cl / pia.villarroel@inta.uchile

Este trabajo fue recibido el 23 de julio de 2017.
Aceptado con modificaciones: 03 de enero de 2018.
Aceptado para ser publicado: 23 de enero de 2018.

en forma de gránulos en los cloroplastos de hojas verdes y amiloplastos de semillas, legumbres y tubérculos. A nivel molecular, el almidón nativo está formado por dos componentes distintos, amilosa y amilopectina, que se pueden aislar por fraccionamiento y ser estudiados de forma independiente. La amilosa, que es esencialmente un polímero lineal, constituye típicamente entre el 15% al 20% de almidón, y la amilopectina, que es una molécula ramificada más grande, es el componente principal del polisacárido¹. La digestión del almidón, tanto de la amilosa como de la amilopectina, está principalmente mediada por amilasas, dextrinasas y disacaridasas que actúan hidrolizando el almidón a monómeros de glucosa que se absorben directamente a través de la mucosa intestinal. La digestibilidad del almidón depende de la estructura del gránulo nativo, que tiene una disposición semicristalina compleja y altamente ordenada. Uno de los principales factores que afectan la digestibilidad del almidón y su respuesta fisiológica se atribuye al tamaño del gránulo, estructura molecular y a la relación amilosa/amilopectina², además del origen botánico que determina la organización y la morfología cristalina³. En general, se puede afirmar que los almidones de tubérculos son más resistentes a la hidrólisis enzimática que almidones de cereales⁴, debido a: i) su alto contenido de residuos fosfato. ii) sus grandes gránulos de almidón con una mayor superficie. iii) sus propiedades de superficie reportadas *in vitro* e *in vivo*. iv) su estructura supramolecular y en parte. v) a una estructura cristalina diferente, observada en tubérculos como papas y en frutas como el plátano².

De acuerdo al índice y grado de digestión *in vitro* los almidones se han clasificado en tres fracciones principales; a) almidón rápidamente digerible, la porción de almidón digerido en los primeros 20 minutos de incubación, b) almidón lentamente digerible, porción de almidón digerido de 20 a 120 minutos, y c) almidón resistente (AR), la parte restante que no puede ser digerido⁵.

Almidón resistente

El AR está definido como la suma del almidón y los productos de degradación de todos los almidones no absorbidos en el intestino delgado de individuos sanos⁶. La resistencia a la digestión del AR se atribuye principalmente a la particular estructura física, determinada en parte por una cantidad más alta de amilosa en relación a la amilopectina, que permite constituir una estructura más compacta que es menos susceptible a hidrólisis enzimática². Se ha reportado la importancia de la mayor relación amilosa: amilopectina en alimentos como el harina de maíz, que normalmente tiene un 25% de amilosa, donde el incremento en el contenido de amilosa a un 70% se asocia un mayor contenido de AR⁷. Otro aspecto que afecta la resistencia de este almidón incluye el tamaño y tipo de gránulo, donde el aumento en la densidad de ramas del almidón y la estructura cristalina contribuyen a su propiedad de digestión lenta⁵.

El AR se subdivide en cinco categorías en base a la

naturaleza del almidón y su localización en los alimentos:

- a) Tipo 1 (AR1), se compone de gránulos de almidón rodeados por una matriz indigerible, es almidón físicamente inaccesible. Componente estable al calor en la mayoría de las operaciones normales de cocción, permitiendo su uso como ingrediente en una amplia variedad de alimentos convencionales¹. De manera natural se encuentra en granos enteros y legumbres.
- b) Tipo 2 (AR2), está representado por gránulos de almidón resistente a la digestión enzimática, ya que en los gránulos de almidón crudo la estructura compacta limita la accesibilidad de las enzimas digestivas¹. Se encuentra en alimentos crudos tales como papas y plátanos verdes.
- c) Tipo 3 (AR3), almidón retrogradado formado durante el enfriamiento del almidón que ha sido procesado⁸. La formación de este AR se ha atribuido a la reorganización molecular de la amilosa (amilosa retrogradada) proveniente de un proceso de gelatinización⁹ (Figura 1). Se ha demostrado que los ciclos de calentamiento/refrigeración aumentan la formación de AR en leguminosas, cereales y tubérculos¹⁰, pero también se puede obtener almidón retrogradado por recristalización durante el almacenamiento. La retrogradación de la amilosa es considerada como un proceso rápido completado en 48 horas, luego del procesamiento a temperaturas que van de 120 a 170 °C¹¹. Los principales factores que determinan la retrogradación y que por tanto, podrían influir en el contenido de AR son la composición del almidón, el producto de la matriz y el contenido de humedad¹².
- d) El Tipo 4 (AR4), almidones modificados químicamente, donde nuevos enlaces químicos son formados a través de esterificación, reticulación o transglucosilación y no pueden descomponerse, ya que el proceso de modificación hace que la estructura sea inaccesible a la digestión por amilasas. Estos almidones se usan como aditivos en gran variedad de productos alimentarios para mejorar la viscosidad y otras características tecnológicas y sensoriales.
- e) Por último, el AR tipo 5 consiste en complejos lípido-amilosa que se forman cuando la amilosa y las largas cadenas ramificadas de amilopectina interactúan con ácidos grasos y alcoholes¹³. Estos complejos pueden formarse durante el procesamiento/cocción como el pan que contiene grasa como ingrediente, o artificialmente y de esta forma ser agregados a los alimentos, como almidones altos en amilosa acomplejados con ácidos grasos¹⁴.

Fuentes alimentarias de almidón resistente

El AR se encuentra naturalmente en granos de cereal, semillas, legumbres y tubérculos¹⁵, siendo importante conocer su concentración en ellos para sugerir fuentes y formas de aplicación (Tabla 1). Cabe destacar que la evaluación precisa de la concentración de AR en los alimentos es difícil debido

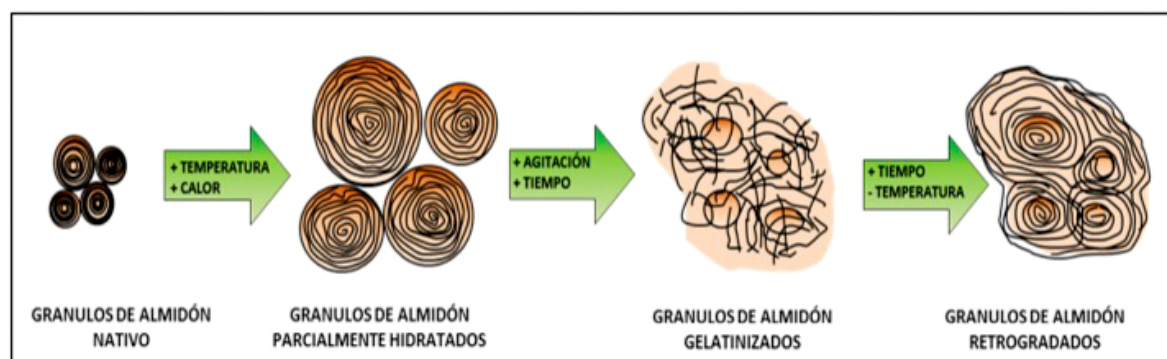


Figura 1. Representación de la transformación estructural del almidón durante el procesamiento. Se observa cómo al calentar el almidón en presencia de agua, los gránulos de almidón nativo se hidratan y modifican su estructura. El mantenimiento de la temperatura y la agitación producen una distorsión de las cadenas de amilosa, adquiriendo una conformación al azar, hasta lograr un almidón hinchado que ha perdido totalmente su estructura cristalina (almidón gelatinizado). Cuando la temperatura comienza a bajar, se favorece la atracción entre las moléculas de amilosa, formando una red entre sí que atrapa el agua y los gránulos de almidón hinchados. El reordenamiento de las cadenas de amilosa favorece la recristalización del gránulo de almidón, proceso llamado retrogradación.

Tabla 1. Contenido de almidón resistente (AR) en algunos productos vegetales.

Producto	Contenido de AR	Referencia
Harina de plátano verde	16-24%	16, 17
Plátano verde	8,5%	18
Poroto blanco	6,6-9,0%	19, 20
Camote	4.0-4,4%	21
Poroto negro (procesado)	3,9% (5,5%)	21
Lenteja (procesada)	3,5% (1,6-9,1%)	19, 22
Arveja fresca (procesada)	2,2% (6,9%)	21
Arroz integral (procesado)	1,7% (1,9%)	18, 22
Papa (procesada)	1,3% (20%)	22, 23
Arroz blanco (procesado)	1,2% (1,9%)	18, 22
Plátano maduro	1,2%	18
Avena (procesada)	0,8% (0,5%)	21
Garbanzo (procesado)	0,6% (2,6%)	21
Haba fresca (procesada)	0,6% (1,45%)	21
Trigo (procesado)	0,3% (0,6%)	21
Harina de trigo	0,2%	17
Maíz crudo (procesado)	0,1% (0,4%)	21
Yuca cruda (procesada)	0,1% (0,4%)	21

Porcentaje de almidón resistente para cada 100 grs de alimento en crudo y (procesado).

a factores como, la amplitud de metodologías validadas para estos efectos, los diferentes estados de maduración del alimento, la gran cantidad de variedades naturales para cada especie, las pérdidas que ocurren durante la cocción y el almacenamiento, y las ganancias potenciales debido a la formación de AR3 después de cocinar y enfriar.

Características tecnológicas del almidón resistente en la industria alimentaria

El almidón es un importante hidrato de carbono que se utiliza en una serie de aplicaciones industriales, por lo que posee una importancia económica considerable. En general, el AR tiene un buen potencial como ingrediente funcional debido a su fino tamaño de partícula, apariencia blanca y sabor suave que contribuyen fuertemente a las propiedades tecnológicas de muchos alimentos²⁴. En este sentido, el AR es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales como un espesante, estabilizador coloidal y agente gelificante²⁵. Debido a su gran solubilidad y capacidad de absorber agua, se emplea para mejorar las características reológicas de salsas, disminuyendo la aglomeración, mejorando la viscosidad, consistencia, estabilidad y textura de productos semi viscosos. Tales propiedades, junto a su compatibilidad con diversos ingredientes y su bajo costo, han llevado a que el AR se incorpore con éxito en muchos productos alimenticios, industriales y farmacéuticos.

En la industria, el AR mejora la estabilidad de los alimentos durante el almacenamiento refrigerado, así como en los procesos de congelación/descongelación, por lo tanto es usado con frecuencia en la industria de las cecinas. Además, el AR funciona como agente de moldeo ya que tiene la propiedad de formar películas resistentes y lisas. Esta propiedad es aprovechada para dar acabado de superficies en diferentes tipos de industrias. Por otro lado, el AR tiene la propiedad de mantenerse estable a un pH menor de 4,5, por lo que puede ser usado en productos ácidos como el yogurt, vinagretas entre otros. Este tipo de almidones también se puede usar en una amplia gama de productos horneados, productos de repostería, yogurt, salsas, bebidas, embutidos y alimentos fermentados¹.

Una característica del AR es la capacidad para emplearse como agente viscosante, cuya finalidad es mejorar y mantener las características deseables de textura, consistencia, aspecto

y cuerpo². El AR ha demostrado tener una importante estabilidad a temperaturas elevadas (> 90°C), es decir, mantiene sus características después de alcanzado el pico máximo en la curva de viscosidad²⁶. Además, se ha observado que las temperaturas de inicio de la gelatinización (donde los gránulos de almidón comienzan a hincharse, pierden cristalinidad y aumentan la viscosidad) son menores en alimentos que tienen una mayor proporción de AR, lo que permite plantear su uso en la elaboración de sopas o en productos que demandan altas viscosidades²⁷. En productos lácteos como el yogurt, la sustitución del 3% de sólidos lácteos con suspensiones de almidón calentadas, cortadas y microfluidizadas aumenta la viscosidad y disminuye la sinéresis de los yogures.

El AR tiene un poder energético inferior al almidón completamente digerible (1,6-2,8 kcal/g v/s 4 kcal/g respectivamente)²⁴, por lo que puede ser una buena alternativa para hacer reemplazo o sustitución de ingredientes en alimentos altos en calorías. La industria de la panificación, pastelería, galletería y cereales extruidos utiliza diversidad de almidones, los cuales podrían irse reemplazando por almidones que contengan alto porcentaje de AR como aquellos procedentes de harina de plátano o de leguminosas¹². Aplicaciones de lo descrito anteriormente se pueden encontrar en la elaboración del pan, donde se ha logrado reemplazar hasta en un 7% el harina de trigo por harina de plátano que contiene un 16% de AR¹⁷. Mientras que en países como Venezuela se han formulado pastas de sémola parcialmente sustituidas con un 10-12% de harina de leguminosas²⁸, en Chile algunos estudios piloto han mostrado la aceptabilidad de pan elaborado con harina de piñón como fuente de AR en reemplazo del harina de trigo en un 30%²⁹. Sin embargo, nuestro país no cuenta con estudios que evalúen la composición y/o funcionalidad del AR en alimentos de consumo masivo dentro del mercado alimentario.

La presencia de AR en los alimentos procesados está determinada por su incorporación en el producto final, no obstante el AR no sólo se puede agregar de manera externa sino que también se puede producir por modificación de algunas condiciones de procesamiento del alimento tales como pH, temperatura de calentamiento y tiempo, número de ciclos de calentamiento y enfriamiento, congelación y secado¹. Ejemplo de esto es que en alimentos industrializados como arvejas procesadas, pan de centeno o copos de maíz se han encontrado hasta 3,6% de AR³⁰.

Como conocido hidrato de carbono, el AR es un tipo de fibra soluble que además de actuar como un ingrediente capaz de otorgar características tecnológicas a los alimentos, se ha asociado a beneficios fisiológicos sobre la salud.

Beneficios fisiológicos asociados al almidón resistente

Estudios en humanos deslizan los potenciales efectos positivos del AR en el mejoramiento de la salud de la microbiota, la reducción de la acumulación de grasa, el mejoramiento de la sensibilidad a la insulina, la regulación

de la glicemia y el control del metabolismo lipídico²⁵. Gran parte de estos beneficios están explicados por los atributos del AR como fibra soluble, su capacidad para generar ácidos grasos de cadena corta (AGCC) y de formar soluciones viscosas en el lumen intestinal. Los mecanismos asociados a los efectos antes mencionados se desarrollan a continuación y se detallan en la figura 2.

Salud de la microbiota

El AR que no se absorbe en el intestino delgado llega al colon donde es fermentado por la microbiota generando gases (metano, hidrógeno, dióxido de carbono), AGCC, como el fórmico, acético, propiónico, butírico y valérico y pequeñas cantidades de ácidos orgánicos y alcoholes³¹. En términos aplicados, el AR en alimentos como el yogurt ha demostrado estimular la fermentación colónica en adolescentes, aumentando la producción de acetato y butirato, lo que sugiere un cambio favorable en la microbiota intestinal³². Ciertamente es el butirato el AGCC de mayor conocimiento en la salud, siendo utilizado como fuente de energía para los colonocitos, mejorando de la integridad de la barrera epitelial intestinal y actuando como agente protector de daño al ADN³³. Los AGCC no metabolizados por los colonocitos son absorbidos e integrados hacia la circulación, donde poseen efectos sistémicos que incluyen el incremento de los niveles de insulina e incretinas³⁴.

Como ejemplo de fibra fermentable, el AR podría considerarse un tipo de prebiótico. Actualmente, el mayor desafío en definir al AR como prebiótico es validar la capacidad de estimular selectivamente los microorganismos beneficios presentes en el colon³⁵. En este sentido, se ha observado que el AR regula la composición de la microbiota, resultando en un aumento de los probióticos, especialmente los grupos microbianos productores de butirato, y en una disminución de las bacterias patógenas³⁶. Sin embargo, se ha documentado la existencia de una respuesta interindividual heterogénea en la producción de butirato, lo que sugiere que se requieren enfoques personalizados para obtener efectos benéficos a partir del microbioma intestinal³⁷. Por lo que, estudios futuros que investiguen la influencia del AR sobre las bacterias intestinales deberían considerar la inclusión de herramientas como la metabolómica para tratar de entender las complejidades que este almidón fermentable puede tener en el metabolismo bacteriano y sus biomarcadores.

Saciedad

El aparente efecto del AR sobre la capacidad para mantener la sensación de satisfacción de una comida se asocia a un efecto directo. Se ha visto una disminución en la ingesta de energía luego del consumo de 8 g de AR durante el desayuno en adultos sanos³⁸. También se ha observado que el AR produce reducciones en el consumo de energía 3 horas después del desayuno y del almuerzo en adultos³⁹. Entre los posibles mecanismos involucrados en esta respuesta se ha postulado que el AR promovería

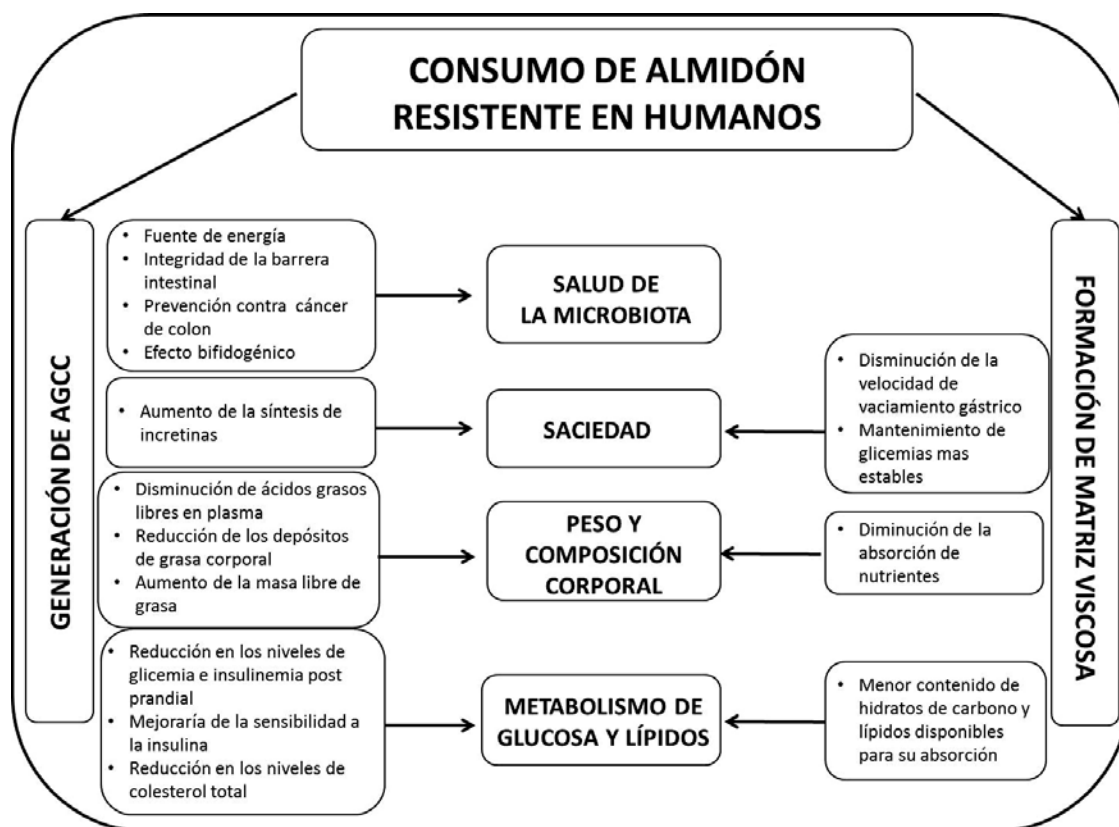


Figura 2. Beneficios fisiológicos asociados al consumo de AR en humanos. Para reparar en los mecanismos involucrados para cada uno de los beneficios fisiológicos asociados al consumo de AR en humanos ver detalle en el texto. AGCC: Ácidos grasos de cadena corta.

una disminución en la velocidad de vaciamiento gástrico y un mantenimiento de glicemias más estables a través del tiempo, lo que se ha relacionado con un aumento de la saciedad⁴⁰. En este sentido, el consumo de alimentos con mayor contenido de AR ha logrado mostrar un mejoramiento en el perfil glicémico de individuos sanos, basado en una menor velocidad de digestión *in vitro* del almidón y por tanto menor índice glicémico del alimento⁴¹. Por otro lado, se ha postulado que la fermentación de AR genera butirato con un consiguiente aumento en los niveles de las hormonas gastrointestinales GLP-1 (péptido similar al glucagón-1) y PYY (péptido YY), que secretadas después de la ingestión de la comida aumentan la saciedad⁴².

A pesar de confirmarse en algunos estudios el efecto del AR sobre el aumento de la saciedad y la disminución en la ingesta de energía a corto plazo, hay una cantidad de reportes en los que no se han observado diferencias significativas⁴³. Por esto, es relevante trabajar a futuro en protocolos de estudio que adviertan las implicancias de los distintos tipos de AR sobre la saciedad, los efectos a largo plazo de su consumo, así como la respuesta frente a diversas cantidades de AR por tiempo de comida.

Peso y composición corporal

La relación entre el consumo de AR y la disminución de peso o mejoramiento de la composición corporal en humanos es débil. En la actualidad ningún estudio de hasta 3 meses de duración ha logrado establecer algún efecto del AR sobre el peso corporal total en sujetos sanos o resistentes a la insulina⁴³. El mecanismo propuesto para explicar la disminución del peso corporal se asocia al efecto del AR como fibra soluble, que tiene la capacidad de formar una solución viscosa en el lumen intestinal, disminuyendo la digestión de macronutrientes al retrasar el vaciamiento gástrico, reduciendo el transporte/mezcla de enzimas digestivas y aumentando la resistencia de la capa de agua no agitada que recubre la mucosa a la absorción intestinal⁴⁴. De esta manera disminuiría la absorción neta de nutrientes que pudiera producir un balance energético negativo con los consecuentes cambios en el peso corporal. Otro mecanismo que apoya el efecto del AR sobre el balance del peso corporal se sustenta en la regulación del metabolismo de ácidos grasos que ejercen los AGCC, quienes promueven oxidación de ácidos grasos en el hígado y músculo e inhibición de la síntesis de novo y la lipólisis en

el tejido adiposo, que finalmente reduce la concentración de ácidos grasos libres en plasma⁴⁵ y disminuye el peso corporal⁴⁶.

A pesar de existir escasa evidencia que permita atribuir un efecto directo del AR sobre la composición corporal, algunos investigadores han logrado establecer modestos cambios explicados por aumentos en la expresión de genes lipolíticos después de la ingestión de 40 g al día de AR en sujetos con síndrome metabólico⁴⁷. Este sugerente efecto del AR se asocia a una reducción de los depósitos de grasa corporal⁴⁸, acompañado de otras observaciones que mostrarían una disminución en la función lipogénica de adipocitos. A nivel de depósitos musculares, se puede destacar el interesante hallazgo en un estudio de 86 sujetos, quienes mostraron un aumento de la masa libre de grasa luego del consumo de AR durante 12 semanas⁴⁹. Por lo tanto el AR podría disminuir la masa grasa y aumentar la masa libre de grasa sin modificar el gasto energético total⁴³. En este sentido, es importante considerar una evaluación vinculada entre el peso y la composición corporal dado que la pérdida de peso atribuida al AR podría impactar directamente a la masa magra, lo que no necesariamente significa una pérdida de grasa corporal.

Metabolismo de glucosa y lípidos

El consumo de AR se ha asociado a efectos fisiológicos sistémicos incluyendo el control del metabolismo glicémico⁵⁰. Se ha reportado que en alimentos con alto contenido de amilosa se observa, tanto el aumento del contenido de AR como la disminución de la respuesta glicémica¹¹. Al respecto, se sabe que la relación amilosa/amilopectina debe ser superior a 1:1 y la cantidad de AR en una comida debe ser superior a 8 g para reducir significativamente la glucosa e insulina plasmática⁵¹. En efecto, estudios en humanos han informado que el AR reduce los niveles postprandiales de glucosa e insulina en sangre⁵² y mejora la sensibilidad a insulina en sujetos sanos⁵³. Los mecanismos que permiten explicar la regulación de la glicemia por AR están probablemente relacionados con un menor contenido de hidratos de carbono disponibles para la absorción y un incremento en la producción de AGCC, esto último asociado a una mayor liberación de incretinas como PYY y GLP-1⁵⁴. El péptido YY aumenta la captación periférica de glucosa en los músculos y en el tejido adiposo, mientras que GLP-1 aumenta la secreción de insulina y disminuye la producción de glucagón en el páncreas⁵⁵. En este sentido, GLP-1 ha demostrado estar aumentada significativamente después de una intervención de 12 semanas con 40 g/día de AR en 17 pacientes con DM2⁵⁶. Por otra parte, también se ha demostrado que los AGCC disminuyen la gluconeogénesis hepática al aumentar la actividad de la enzima AMPK, sensor energético en la célula⁵⁵. Por lo tanto, el AR por medio de la producción de AGCC parece afectar beneficiosamente el metabolismo de la glucosa, no obstante no está claro en que medida los efectos ocurren directamente a través de una regulación vía AMPK en el hígado o indirectamente a través de las incretinas PYY y GLP-1.

Con respecto al manejo de lípidos los resultados son menos concluyentes, sin embargo, se sugiere que el AR disminuye los niveles plasmáticos de colesterol total¹. Estudios realizados en farináceos enriquecidos con AR muestran que se podría reducir significativamente el nivel de colesterol total y de lipoproteínas de alta densidad (HDL) en 89 pacientes con síndrome metabólico durante 12 semanas de tratamiento⁴⁹. Similar efecto observado en pacientes obesos, donde la suplementación con AR logró disminuir significativamente el colesterol total en relación a pacientes obesos con una dieta incrementada en fibra total⁵⁷. El mecanismo implicado en la regulación del colesterol estaría asociado a la generación de AGCC, donde el acetato y el propionato han mostrado reducir los niveles séricos de colesterol, en el caso de este último vía reducción en la enzima hidroximetilglutaril-COA (HMGCR), reductasa limitante en la biosíntesis de colesterol hepático⁵⁵. Otro mecanismo plausible se relaciona con el efecto de la fibra soluble sobre las sales biliares, previniendo la recirculación enterohepática. En este caso, la fibra soluble posee un efecto quelante sobre las sales biliares, que disminuye su reabsorción intestinal incrementando la excreción fecal. Como consecuencia, en el hepatocito se sintetizan nuevas sales biliares a expensas de colesterol, disminuyendo así la concentración de colesterol plasmático. Por último, se puede especular que la reducida respuesta glicémica conduce a una menor estimulación de la insulina, afectando de esta manera la síntesis de colesterol hepático⁵⁸. A pesar de estos resultados, la evidencia actual no permite sustentar una relación entre el AR y la disminución de colesterol LDL o de la trigliceridemia⁵⁹. Respecto a las concentraciones circulantes de ácidos grasos no esterificados (NEFA), encontramos evidencia de su reducción después de la ingesta de AR⁵⁶. Sin embargo, teniendo en cuenta la totalidad de los estudios existentes no es posible establecer que el AR influye en la concentración de los NEFA.

Considerando los resultados antes mencionados, existe la necesidad de comprender la influencia de la matriz alimentaria sobre la respuesta glicémica y lipídica y cómo los diversos tipos de AR pueden actuar independientemente, y sinérgicamente, para mejorar el control de las grasas y azúcares. Además, merecería un estudio adicional la evaluación de la influencia del AR en individuos con dislipidemia, intolerancia a la glucosa y/o diabetes mellitus 2, especialmente durante períodos de tiempo más largos.

CONCLUSIÓN

La creciente prevalencia de enfermedades crónicas no transmisibles hace recomendable que la industria alimentaria emprenda en el desarrollo de alimentos enriquecidos con AR como estrategia terapéutica para la prevención y control de estas. El uso de productos de consumo habitual que integren AR dentro de su formulación se transforma en una buena alternativa de masificación de los beneficios de este ingrediente funcional, más aún si este ingrediente entrega propiedades tecnológicas al alimento.

Junto con mencionar los potenciales efectos positivos del AR sobre la salud de la microbiota, la saciedad, el peso y la composición corporal y el metabolismo de la glucosa y los lípidos, es importante destacar que la limitada evidencia en humanos y la debilidad de algunas observaciones hace necesario sugerir estudios que consideren tamaños muestrales mayores y protocolos de seguimiento a largo plazo. En este sentido, el interés por estudiar los efectos tecnológicos y fisiológicos del AR se hace cada vez más atractivo, dado los sugerentes y prometedores beneficios sobre los alimentos y la salud humana.

Declaración de intereses. Los autores no declaran conflicto de interés alguno.

Agradecimientos. Los autores agradecen el apoyo de la química farmacéutico Cristina Ubeda Aguilera por la lectura crítica del artículo.

BIBLIOGRAFIA

- Sajilata MG, Rekhla S, Singhal, Pushpa R. Kulkarni. Resistant starch-a review, *Compr Rev Food Sci F* 2006; 5: 1-17.
- Lehmann U, Robin F. Slowly digestible starch e its structure and health implications: a review, *Trends Food Sci Technol* 2007; 18: 346-355.
- Tester R, Karkalas J, Qi X. Starch structure and digestibility enzyme-substrate relationship, *Worlds Poult Sci J* 2004; 60: 186-195.
- Benmoussa M, Suhendra B, Aboubacar A, Hamaker B. Distinctive sorghum starch granule morphologies appear to improve raw starch digestibility, *Starch/Stärke* 2004; 58: 92-99.
- Ao Z, Simsek S, Zhang G, Venkatachalam M, Reuhs B, Hamaker B. Starch with a Slow Digestion Property Produced by Altering Its Chain Length, Branch Density, and Crystalline Structure, *J Agric Food Chem* 2007; 55: 4540-4547.
- Champ M. Physiological aspects of resistant starch and in vivo measurements, *J AOAC Int* 2004; 87: 749-755.
- Granfeldt Y, Drews A, Björck I. Arepas made from high amylose corn flour produce favorably low glucose and insulin responses in healthy humans, *J Nutr* 1995; 125: 459-465.
- Leeman A, Bårström L, Björck I. In vitro availability of starch in heat-treated potatoes as related to genotype, weight and storage time, *J Sci Food Agr* 2005; 85: 751-756.
- Thompson D. Strategies for the manufacture of resistant starch, *Trends Food Sci Technol* 2000; 11: 245-253.
- Yadav B, Sharma A, Yadav R. Studies on effect of multiple heating/cooling cycles on the resistant starch formation in cereals, legumes and tubers, *Int J Food Sci Nutr* 2009; 60: 258-272.
- Leeman A, Karlsson M, Eliasson A, Björck I. Resistant starch formation in temperature treated potato starches varying in amylose/amylopectin ratio, *Carbohydr Polym* 2006; 65: 306-313.
- Tharanathan R, Mahadevamma S. Grain legumes-a boon to human nutrition, *Trends Food Sci Technol* 2003; 14: 507-518.
- Ai Y, Hasjim J, Jane J. Effects of lipids on enzymatic hydrolysis and physical properties of starch, *Carbohydr Polym* 2013; 92: 120-127.
- Lau E, Zhou W & Henry C. Effect of fat type in baked bread on amylose-lipid complex formation and glycaemic response, *Br J Nutr* 2016; 115: 2122-2129.
- Goldring J. Resistant starch: Safe intakes and legal status, *J AOAC Int* 2004; 87: 733-739.
- Martínez E. Caracterización morfológica y contenido de almidón resistente y disponible en bananos (*Musa sapientum*) exportables del Ecuador. *Rev Esp Nutr Hum Diet* 2015; 19: 153-159.
- Pacheco E, Testa G. Nutritional, physical and sensory evaluation of wheat and green plantain breads, *Interciencia* 2005; 30: 300-304.
- Landon S, Colyer C, Salman H. The resistant starch report –Food Australia Supplement 2012. (accessed 7 September 2016) Available at: http://foodaust.com.au/wp-content/uploads/2012/04/Hi_Maize-supplement_web.pdf
- Peñalver C, Herrera I, Tovar J. Indigestible starch associated to dietary fiber residues from cooked legume seeds consumed in venezuela, *Interciencia* 2007; 32: 620-623.
- Miranda P, Marrugo Y, Montero P. Caracterización Funcional del Almidón de Frijol Zaragoza (*Phaseolus Lunatus* L.) y Cuantificación de su Almidón Resistente. *Tecno Lógicas* 2013, 30: 17-32.
- Sotelo A, Argote R, Cornejo L, Escalona S, Ramos M, Nava A, Palomino D, Carreón O. Measurement of dietary fiber and resistant starch: challenge for students of the Experimental Food Development Laboratory (LabDEA), *Educación Química* 2008; 19: 42-49.
- Murphy M, Douglass J, Birkett A. Resistant starch intakes in the United States, *J Am Diet Assoc* 2008; 108: 67-78.
- Loort K. Effects of several cooling cycles on the content of resistant starch type III, in Achira and Papa starches. *Universidad San Francisco de Quito* 2008; 29-30.
- Raigond P, Ezekiel R, Raigond B. Resistant starch in food: a review, *J Sci Food Agr* 2015; 95: 1968-1978.
- Fuentes-Zaragoza E, Riquelme-Navarrete M, Sánchez-Zapata E, Pérez-Álvarez J. Resistant starch as functional ingredient: A review, *Food Res Int* 2010; 43: 931-942.
- Martínez, O, Lapo B, Pérez J, Zambrano C, Maza F. Gelatinization mechanism of exportable banana native starch of Ecuador *Rev Colomb Quim* 2015; 44: 16.
- Montoya J, Quintero V, Lucas J. Characterization of flour and starch of banana fruits Gros Michel (*Musa acuminata* AAA). *Acta Agronómica* 2015; 64: 11-21.
- Granito M, Pérez S, Valero Y. Cooking quality, acceptability and glycemic index of long pasta enriched with legumes. *Rev Chil Nutr* 2014; 41: 425-432.
- XVIII Congreso de la Sociedad Chilena de Nutrición, Bromatología y Toxicología. *Rev Chil Nutr* 2008; 35: 303-337.
- Englyst K, Liu S, Englyst H. Nutritional characterization and measurement of dietary carbohydrates, *Eur J Clin Nutr* 2007; 61: 19-39.
- Birt D, Boylston T, Hendrich S, Jane J, Hollis J, Li L, McClelland J et al. Resistant starch: promise for improving human health, *Adv Nutr* 2013; 4: 587-601.
- Aryana K, Greenway F, Dhurandhar N, Tully R, Finley J, Keenan M, et al. A resistant-starch enriched yogurt: fermentability, sensory characteristics, and a pilot study in children. *F1000 Res* 2015; 4: 139.
- Bultman S. The microbiome and its potential as a cancer preventive intervention. *Semin Oncol* 2016; 43: 97-106.
- Priyadarshini M, Wicksteed B, Schiltz G, Gilchrist A, Layden B. SCFA Receptors in Pancreatic β Cells: Novel Diabetes Targets?. *Trends Endocrinol Metab* 2016; 27: 653-664.

35. Martinez R, Bedani R, Saad S. Scientific evidence for health effects attributed to the consumption of probiotics and prebiotics: an update for current perspectives and future challenges. *Br J Nutr* 2015; 114: 1993-2015.
36. Martínez I, Kim J, Duffy P, Schlegel V, Walter J. Resistant starches types 2 and 4 have differential effects on the composition of the fecal microbiota in human subjects. *PLoS One* 2010; 5: e15046.
37. Venkataraman A, Sieber J, Schmidt A, Waldron C, Theis K, Schmidt T. Variable responses of human microbiomes to dietary supplementation with resistant starch. *Microbiome* 2016; 4: 33.
38. Willis H, Eldridge A, Beiseigel J, Thomas W, Slavin J. Greater satiety response with resistant starch and corn bran in human subjects. *Nutr Res* 2009; 29: 100-105.
39. Harrold J, Breslin L, Walsh J, Halford J, Pelkman C. Satiety effects of a whole-grain fibre composite ingredient: reduced food intake and appetite ratings. *Food Funct* 2014; 5: 2574-2581.
40. Holt S, Brand J, Soveny C, Hansky J. Relationship of satiety to postprandial glycaemic, insulin and cholecystokinin responses. *Appetite* 1992; 18: 129-141.
41. Ekström L, Björck I, Ostman E. On the possibility to affect the course of glycaemia, insulinaemia, and perceived hunger/satiety to bread meals in healthy volunteers. *Food Funct* 2013; 4: 522-529.
42. Neary N, Small C, Druce M, Park A, Ellis S, Semjonous N, et al. Peptide YY3-36 and glucagon-like peptide-17-36 inhibit food intake additively. *Endocrinology* 2005; 146: 5120-5127.
43. Higgins J. Resistant starch and energy balance: impact on weight loss and maintenance. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2014; 54: 1158-1166.
44. Salas-Salvadó J, Bulló M, Pérez-Heras A, Ros E. Dietary fibre, nuts and cardiovascular diseases. *Br J Nutr* 2006; 96 Suppl 2:S46-51. Review. Erratum in: *Br J Nutr* 2008; 99: 447-4478.
45. Ge H, Li X, Weiszmann J, Wang P, Baribault H, Chen JL, et al. Activation of G protein-coupled receptor 43 in adipocytes leads to inhibition of lipolysis and suppression of plasma free fatty acids. *Endocrinology* 2008; 149: 4519-4526.
46. Lin H, Frassetto A, Kowalik E Jr, Nawrocki A, Lu M, Kosinski J, et al. Butyrate and propionate protect against diet-induced obesity and regulate gut hormones via free fatty acid receptor 3-independent mechanisms 2012; *PLoS One* 7: e35240.
47. Robertson M, Wright J, Loizon E, Debard C, Vidal H, Shojaee-Moradie F, et al. Insulin-sensitizing effects on muscle and adipose tissue after dietary fiber intake in men and women with metabolic syndrome. *J Clin Endocrinol Metab* 2012; 97: 3326-3332.
48. Higgins J, Higbee D, Donahoo W, Brown I, Bell M, Bessesen D. Resistant starch consumption promotes lipid oxidation. *Nutr Metab (Lond)* 2004; 1: 8.
49. Nichenametla S, Weidauer L, Wey H, Beare T, Specker B, Dey M. Resistant starch type 4-enriched diet lowered blood cholesterols and improved body composition in a double blind controlled cross-over intervention. *Mol Nutr Food Res* 2014; 58: 1365-1369.
50. Higgins J. Resistant starch: metabolic effects and potential health benefits. *J AOAC Int* 2004; 87: 761-768.
51. Behall K, Hallfrisch J. Plasma glucose and insulin reduction after consumption of breads varying in amylose content. *Eur J Clin Nutr* 2002; 56: 913-920.
52. Stewart M, Zimmer J. A High Fiber Cookie Made with Resistant Starch Type 4 Reduces Post-Prandial Glucose and Insulin Responses in Healthy Adults. *Nutrients* 2017; 9: E237.
53. Robertson M, Bickerton A, Dennis A, Vidal H, Frayn K. Insulin-sensitizing effects of dietary resistant starch and effects on skeletal muscle and adipose tissue metabolism. *Am J Clin Nutr* 2005; 82: 559-567.
54. Zhou J, Martin R, Tulley R, Raggio A, McCutcheon K, Shen L, et al. Dietary resistant starch upregulates total GLP-1 and PYY in a sustained day-long manner through fermentation in rodents. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2008; 295: E1160-1166.
55. den Besten G, van Eunen K, Groen A, Venema K, Reijngoud D, Bakker B. The role of short-chain fatty acids in the interplay between diet, gut microbiota, and host energy metabolism. *J Lipid Res* 2013; 54: 2325-2340.
56. Bodinham C, Smith L, Thomas E, Bell J, Swann J, Costabile A, et al. Efficacy of increased resistant starch consumption in human type 2 diabetes. *Endocr Connect* 2014; 3: 75-84.
57. Dodevska M, Sobajic S, Djordjevic P, Dimitrijevic-Sreckovic V, Spasojevic-Kalimanovska V, Djordjevic B. Effects of total fibre or resistant starch-rich diets within lifestyle intervention in obese prediabetic adults. *Eur J Nutr* 2016; 55: 127-137.
58. Gunness P, Gidley M. Mechanisms underlying the cholesterol-lowering properties of soluble dietary fibre polysaccharides. *Food Funct* 2010; 1: 149-155.
59. Gower B, Bergman R, Stefanovski D, Darnell B, Ovalle F, Fisher G, et al. Baseline insulin sensitivity affects response to high-amylose maize resistant starch in women: a randomized, controlled trial. *Nutr Metab (Lond)* 2016; 13: 2.