

## Fibra dietética vs obesidad ¿Cómo se relacionan las propiedades de la fibra dietética con el control de peso corporal?

### Dietary fiber vs obesity. How are the properties of dietary fiber related to the regulation of body weight?

Jorge Romero-Flores <sup>a</sup>, Ernesto Alanís-García <sup>b</sup>, Luis Delgado-Olivares <sup>c</sup>,  
José A. Ariza-Ortega <sup>d</sup>, Zuli G. Calderón-Ramos <sup>e</sup>

---

**Abstract:**

Obesity is a disease that currently has a high prevalence worldwide, in addition, it could trigger the development of other conditions related to the excessive accumulation of adipose tissue in the human body. This problem has led to the recommendation of timely treatment, through a healthy diet with a high content of dietary fiber (DF). Different food and health institutions have published the Recommended Dietary Allowance (RDA) based on the level of consumption observed to prevent the onset of cardiovascular diseases. To achieve the recommended amounts of DF, it is preferable to select foods such as cereals, pseudocereals, legumes, fruits and vegetables within the diet, due to the fact that they are the foods that contain it. DF is a non-digestible component of food that has been studied extensively, however, its nutritional importance was recognized until the 1970s, demonstrating its positive association with the regulation of body weight and the reduction of adipocytes stored in the body. There are different classifications referring to DF, however, one of the most used is based on its ability to be solubilized "soluble (SDF) and insoluble (IDF)". It has been identified that FDS has a greater association with the properties, however, it is necessary that there is a balance between both fibers, because an excess of them could generate unwanted effects in our body. The main properties of DF are associated with its physicochemical attributes and include: its ability to absorb water and other substances, swell and increase its viscosity. In addition, it is capable of being fermented by the intestinal microbiota, generating metabolites beneficial to health. These properties participate in different mechanisms that decrease nutrient absorption, appetite suppression, and regulation of energy homeostasis by lipid and carbohydrate metabolism. Therefore, it is important to know about the properties and mechanisms in which DF intervenes during digestion and how it affects health.

**Keywords:**

*Dietary fiber, obesity, fermentation, health effects, metabolism, weight loss, weight control*

---

**Resumen:**

La obesidad es una enfermedad que actualmente tiene una gran prevalencia en todo el mundo, además, podría desencadenar el desarrollo de otras afecciones relacionadas con la acumulación excesiva de tejido adiposo en el cuerpo humano. Esta problemática ha conllevado a la recomendación de un tratamiento oportuno, mediante una dieta saludable con un alto contenido de fibra dietética (FD). Distintas instituciones alimentarias y de salud han informado sobre la ingesta diaria recomendada (IDR) de FD, en base al nivel de consumo observada para prevenir la aparición de enfermedades cardiovasculares. Para alcanzar las cantidades recomendadas de FD, dentro de la dieta, es preferible seleccionar alimentos como cereales, pseudocereales, legumbres, frutas y verduras ya que son los alimentos que la contienen. La FD es un componente no digerible de los alimentos que ha sido estudiado ampliamente, no obstante, su importancia nutricional fue reconocida hasta la década de 1970, demostrando su asociación positiva con la regulación del peso

---

<sup>a</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-3357-9376>, Email: ro368829@uaeh.edu.mx

<sup>b</sup> Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0003-1540-4908>, Email: ernesto\_alanis@uaeh.edu.mx

<sup>c</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-3506-8393>, Email: ldelgado@uaeh.edu.mx

<sup>d</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-2163-4593>, Email: jose\_ariza@uaeh.edu.mx

<sup>e</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-0263-6067>, Email: zramos@uaeh.edu.mx

corporal y la reducción de adipocitos almacenados en el organismo. Existen diferentes clasificaciones referentes a la FD, sin embargo, una de las más utilizadas se basa en su capacidad de ser solubilizada “soluble (FDS) e insoluble (FDI)”. Se ha identificado que la FDS tiene una mayor asociación con las propiedades antes mencionadas, no obstante, es necesario que exista un equilibrio entre ambas fibras, debido a que un exceso de estas podría generar efectos no deseados en nuestro cuerpo. Las principales propiedades de la FD se asocian con sus atributos físicos y químicos que incluyen: su capacidad de absorber agua y otras sustancias, hincharse y aumentar su viscosidad. Además, es capaz de ser fermentada por la microbiota intestinal, generando metabolitos benéficos para la salud. Estas propiedades participan en diferentes mecanismos que disminuyen la absorción de nutrientes, la supresión del apetito, y la regulación de la homeostasis energética mediante el metabolismo de lípidos y carbohidratos. Por lo tanto, es importante conocer sobre las propiedades y mecanismos en los que interviene la FD durante la digestión y el cómo repercute en la salud.

#### Palabras Clave:

Fibra dietética, obesidad, fermentación, efectos a la salud, metabolismo, pérdida de peso, control de peso

## Introducción

Durante las últimas décadas del siglo XX y hasta la actualidad el fenotipo humano ha experimentado un rápido cambio, siendo primeramente de peso normal o bajo a ser una proporción creciente y grande de sobrepeso y/u obesidad<sup>1</sup>. La Organización Mundial de la Salud (OMS) define a la obesidad como una acumulación anormal o excesiva de grasa que puede ser diagnosticada mediante el Índice de Masa Corporal (IMC). Si el resultado es mayor a 24.9 Kg/m<sup>2</sup> se diagnostica como sobrepeso y si excede a 29.9 Kg/m<sup>2</sup> se considera como obesidad. Además, reportó que en el 2016 más de 1900 millones de adultos mayores de 18 años tenían sobrepeso, de los cuales más de 650 millones padecían de obesidad, estimando que para el 2025 aproximadamente 167 millones de personas se volverán menos saludables debido a presentar estas patologías<sup>2</sup>.

La Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) informó que del año 1988 al 2016 la prevalencia de sobrepeso y obesidad se duplicó de un 34.5% a un 72.5%. Sin embargo, el problema adquiere una mayor magnitud cuando se analiza únicamente la prevalencia de obesidad, ya que ésta aumentó casi 4 veces a su valor inicial si se considera el cambio de 9.5% a 33.3% respectivamente (Tabla 1)<sup>3</sup>.

Tabla 1. México: Prevalencia de sobrepeso y obesidad en individuos de 20 en adelante. ENSANUT 1988-2016.

Año	% Sobrepeso	% Obesidad
1988	25	9.5
1999	36.1	24.9
2006	39.9	29.3
2012	38.8	32.4
2016	39.2	33.3

Tomado de: Torres y Rojas (2018)<sup>3</sup>.

Se ha relacionado este incremento exponencial con un mayor consumo de alimentos procesados que tienen una

mayor densidad energética y bajo valor nutricional, por ejemplo: bebidas carbonatadas, energéticas, alimentos fritos, confitados, golosinas, entre otros. Por otro lado, la disminución de la actividad física debido a la automatización de las actividades cotidianas y laborales, un mayor acceso a transportes motorizados y el poco o nulo tiempo dedicado al ejercicio, también han promovido el alarmante incremento de estos porcentajes<sup>3,4</sup>.

El sobrepeso y obesidad implican una acumulación excesiva de tejido adiposo, este es uno de los principales factores de riesgo asociados al desarrollo de enfermedades no transmisibles como la dislipidemia, hipertensión arterial, diabetes mellitus, etc<sup>5</sup>. Por otro lado, también tiene un impacto negativo en la economía y calidad de vida de las familias en donde se presenta, ya que al tener que destinar recursos para su atención médica aumentan los gastos en el hogar y limita la eficiencia de las personas en actividades cotidianas<sup>6</sup>.

Es de conocimiento que el principal objetivo en el tratamiento de la obesidad tiene que estar orientado en la pérdida gradual de peso a través de una dieta saludable y con una concentración óptima de fibra dietética (FD), ya que en diferentes estudios y publicaciones se han evidenciado los efectos positivos de la FD sobre el control del peso corporal y su capacidad de promover la pérdida de peso en individuos con sobrepeso u obesidad<sup>7-11</sup>. Gracias a esto, instituciones alimentarias y de salud han informado sobre la ingesta diaria recomendada (IDR) de FD, esto en base al nivel de ingesta observada para prevenir la aparición de enfermedades cardiovasculares<sup>12-14</sup>. Para alcanzar el IDR se recomienda consumir principalmente cereales, pseudocereales, legumbres, frutas y verduras, ya que son los alimentos que la contienen<sup>15,16</sup>.

La FD es conocida como un conjunto de unidades monoméricas que forman parte de los alimentos y no pueden ser degradados por enzimas digestivas del cuerpo humano. Además, concentraciones adecuadas en la dieta han demostrado tener efectos fisiológicos benéficos para la salud<sup>7</sup>. Lo anterior se debe a que los atributos

fisicoquímicos y biológicos de la FD ejercen un efecto positivo en la regulación del peso e índice de grasa corporal a través de distintos mecanismos, principalmente: la regulación en la tasa de absorción de nutrientes, la supresión del apetito y la regulación de la homeostasis energética mediante la regulación del metabolismo de ácidos grasos y glucosa<sup>1,17-20</sup>. A continuación se aborda sobre las propiedades y características de la FD, así como la evidencia científica que se ha generado sobre los efectos benéficos en el control del peso corporal y protección contra la obesidad.

### Definición de fibra dietética (FD)

El Comité del Codex Alimentarius define a la FD como “aquellos polímeros de carbohidratos, con diez o más unidades monoméricas, incapaces de ser degradados por enzimas digestivas del ser humano, y por consecuencia no son absorbidos en el intestino delgado”<sup>7</sup>. Esta definición engloba tres categorías que incluyen polímeros de carbohidratos:

1. Que se encuentran naturalmente en los alimentos tal como se consumen.
2. Que se han obtenido de materias primas por medios físicos, químicos o enzimáticos y que han demostrado tener un efecto fisiológico benéfico para la salud como lo demuestran las pruebas científicas generalmente aceptadas por las autoridades competentes.
3. Sintéticos que han demostrado tener un efecto fisiológico benéfico para la salud, como lo demuestran las pruebas científicas aceptadas por las autoridades competentes.

Generalmente en el pasado los carbohidratos con un grado de polimerización entre 3 y 9 unidades monoméricas se consideraban como oligosacáridos, sin embargo, la definición propuesta por el Codex mostró cierta flexibilidad dejando la decisión de incluir carbohidratos con 3 a 9 unidades monoméricas a las autoridades nacionales y dejó los efectos fisiológicos benéficos para la salud como indefinidos. Como es el caso de Europa, Canadá, Australia, China, Brasil y Nueva Zelanda donde las definiciones incluyen carbohidratos no digeribles con más de tres unidades monoméricas<sup>21</sup>.

### Clasificación de fibra dietética

El sistema de clasificación más utilizado para la FD, desde un punto de vista funcional y nutricional, se basa en su capacidad de interactuar con el agua, en soluble e insoluble.<sup>4,22,23</sup> La fibra dietética soluble (FDS) se caracteriza por tener una mayor capacidad de absorción, viscosidad y fermentación; se encuentra principalmente

en el salvado de arroz, avena, cebada y maíz; productos de harina blanca (pan blanco, pasta, etc.); y en algunas frutas, vegetales y leguminosas. La fibra dietética insoluble (FDI) generalmente son poco fermentadas, nombre que se le da al proceso de degradación bacteriana, sin embargo, dependiendo de la proporción que se consuma determinará su efecto laxante al aumentar la masa fecal y reducir el tiempo de tránsito intestinal. Esta FDI se encuentra principalmente en alimentos como el salvado de trigo, las verduras y los granos integrales<sup>15, 16, 18, 24</sup>.

Aunque el término “fibra insoluble” se utiliza para referirse específicamente a los componentes insolubles de la pared celular, una matriz de pared celular intacta también puede definirse como “insoluble” incluso si algunos de sus componentes poliméricos pudieran solubilizarse durante el procesamiento digestivo<sup>25</sup>. Es importante diferenciar los tipos de FD y sus atributos, ya que comúnmente se tiende agrupar los diferentes tipos de fibras como una sola, así como sus atributos fisicoquímicos. Esta confusión podría impedir que se obtengan los efectos benéficos esperados de ella.

### Atributos fisicoquímicos y fermentación de la fibra dietética

La FD es una matriz polimérica con atributos fisicoquímicos que incluyen: la capacidad de absorber agua y otras sustancias; solubilizarse con líquidos; y formar soluciones viscosas y gelatinosas. Además, estas propiedades influyen en la capacidad de los microorganismos de fermentarla para producir ácidos grasos de cadena corta (AGCC) en el intestino<sup>18,22-26</sup>. Debido a que estas propiedades son las que se relacionan principalmente con el control de la obesidad. A continuación, se hará una descripción más detallada de los atributos antes mencionados, ya que es necesario conocerlos para comprender cómo se relacionan a los distintos mecanismos de acción que pueden regular el peso y grasa corporal.

### Solubilidad

El término solubilidad hace referencia a la capacidad que tiene una sustancia de disolverse en un medio acuoso<sup>26</sup>. Se ha evidenciado como en el sistema digestivo la FD es capaz de absorber agua e hincharse, seguido de la solubilización de su fracción soluble. Esto es gracias a que posee moléculas hidroxiladas cuyo grupo funcional es un carbonilo (aldehído o cetona), confiriéndole una mayor solubilidad por sus radicales hidroxilos y por el hidrógeno, los cuales presentan una gran polaridad, haciendo posible la formación de una gran cantidad de puentes de

hidrogeno y atrayendo las moléculas del agua <sup>18</sup>. Sin embargo, esto puede variar dependiendo del tamaño de la partícula, el nivel de fluidos digestivos secretados y la cantidad de agua consumida durante la comida <sup>22</sup>. Las FDS incluyen polisacáridos como pectinas,  $\beta$ -glucanos, *psyllium*, goma guar, galactomananos y alginatos <sup>27</sup>.

### Viscosidad

La viscosidad se entiende como el grado de resistencia al flujo que tiene una solución cuando se le aplica un esfuerzo de corte. Se ha demostrado que la FD tiene la capacidad de formar soluciones con una mayor resistencia al flujo al espesarse cuando se mezcla con líquidos <sup>9,12</sup>. Esta propiedad se asocia principalmente a las FDS e incluyen polisacáridos como: pectina, gomas y  $\beta$ -glucano <sup>26</sup>. Sin embargo, el grado de espesamiento dependerá de la concentración del polisacárido, su composición química, fuerza iónica y pH de la solución <sup>20</sup>.

### Formación de gel

Un gel es una mezcla coloidal formada por una red polimérica que puede absorber agua, pero es insoluble en ella; presentando una fase continua (generalmente sólida) y una fase dispersa (mayormente líquida) <sup>28</sup>. Las propiedades del gel están condicionadas por la concentración de la FD, su estructura molecular, pH y tiempo de exposición en el medio acuoso <sup>20</sup>.

Se ha indicado que el gel tiene que resistir al estrés mecánico que se produce en el estómago para poder llegar al intestino grueso y ser fermentado por la microbiota intestinal. Además, la formación de gel debe ser lo suficientemente rápida para permitir que se forme en el estómago, pero lo suficientemente lenta para que la mayor parte del contenido gástrico se incorpore al gel <sup>17,21</sup>. El gel de la FD es capaz de retener compuestos como: ácidos biliares, colesterol y componentes tóxicos presentes en los alimentos, inhibiendo su absorción, estos son liberados después del proceso fermentativo y excretados en las heces fecales. Sin embargo, también se

debe tener cuidado con el consumo excesivo de FD, ya que podría provocar la pérdida de nutrientes que sí son deseados <sup>24,28-31</sup>.

### Fermentación

La microbiota intestinal hace referencia al conjunto de microorganismos que se alojan en el intestino humano (principalmente bacterias) y que son capaces de producir enzimas que metabolizar carbohidratos complejos para su beneficio y del huésped en el que habitan. Este proceso como se produce en condiciones anaeróbicas se le denomina fermentación <sup>17,21</sup>.

Las FDS son las más accesibles a las enzimas producidas por la microbiota intestinal (amilasas, glucoamilasas, glucosa isomerasas, pectinasas, esterasas, etc.), su estructura menos compacta permiten su acceso con mayor facilidad <sup>32</sup>. Debido a la diversidad de estructuras entre fibras, el grado de fermentación puede variar, desde poco o no fermentada (lignina), hasta tener una fermentación casi completa (pectina) <sup>9,23</sup>.

También se ha demostrado que la FD puede actuar como un compuesto prebiótico, ya que puede ser un sustrato para la microbiota, posibilitando su desarrollo óptimo y la producción de AGCC <sup>8</sup>. Los principales AGCC presentes en el intestino humano son: los ácidos acético, propiónico y butírico; los cuales mantienen una relación molar de 60:20:10 respectivamente <sup>30</sup>. Estas biomoléculas se generan a través de distintas vías y las reacciones químicas inician cuando el acetaldehído se oxida a acetato, llevado a cabo por la coenzima A, originando acetil-CoA (Vía Wool-Ljungdahi y/o acetil-CoA), la cual es el sustrato para producir butirato, a partir de dos moléculas de acetil-CoA. Mientras que el propionato se puede formar a partir de la ruta del acrilato o la ruta del succinato mediante la degradación del piruvato, sin embargo, también puede ser generado directamente por la ruta del propanodiol después de la fermentación de fucosa y ramnosa (Figura 1) <sup>30</sup>.

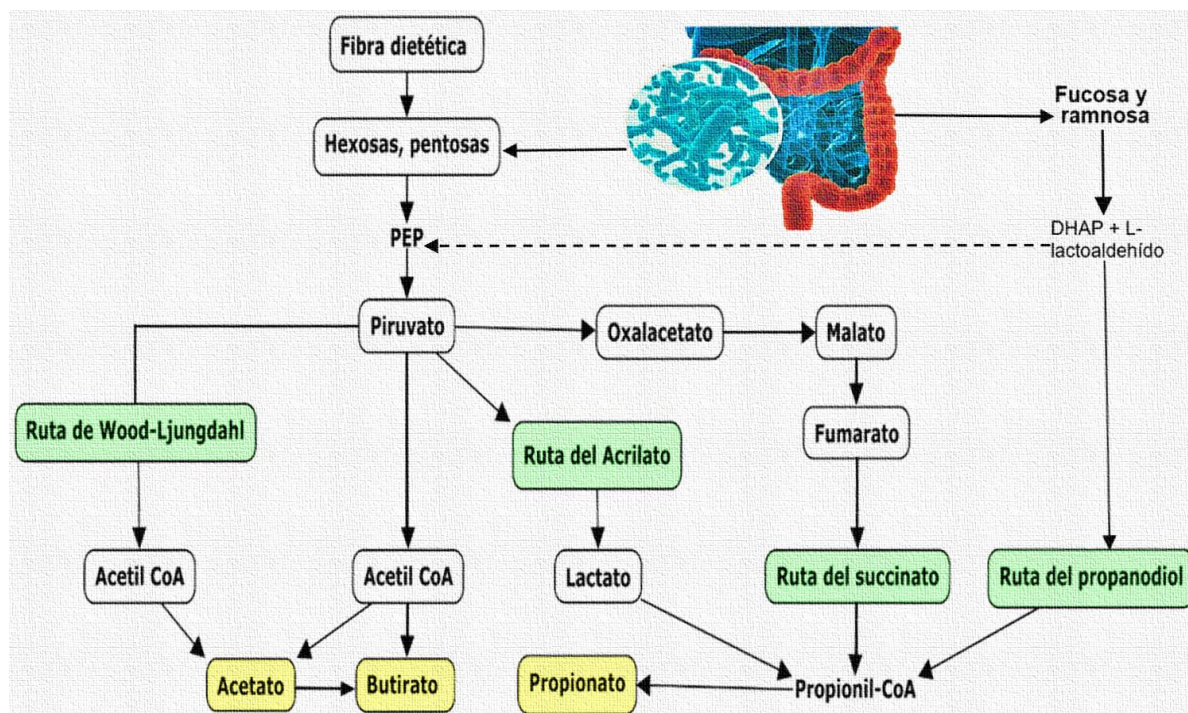


Figura 1. Fermentación y producción de AGCC. Abreviaturas: Fosfoenolpiruvato (PEP); Dihidroxiacetona fosfato (DHAP). Tomado de Portincasa et al. (2022) <sup>30</sup>.

### Mecanismos de la fibra dietética asociados al control del peso corporal

En Estados Unidos y Europa existen declaraciones de propiedades saludables para diferentes tipos de FD. Esto se debe a que existe evidencia de cómo la FD puede reducir los niveles de lípidos en sangre, así como retardar la respuesta posprandial <sup>12</sup>. De la misma forma se han estudiado los mecanismos en los que la FD actúa para ejercer sus efectos beneficiosos sobre la salud humana, específicamente contra la obesidad. En base a lo mencionado, a continuación, se describe cada uno de los mecanismos y la forma en que benefician para mantener un peso y porcentaje de grasa corporal saludable.

#### Reducción en la absorción de nutrientes

La reducción en la absorción de nutrientes implica procesos en los que se dificulta o imposibilita que estos atraviesen la pared del intestino delgado para llegar al torrente sanguíneo y ser metabolizados, por ende, estos no son aprovechados y se excretan en las heces fecales <sup>9,18,19,25</sup>. Se ha demostrado que la FDS tiene la capacidad de formar soluciones viscosas dentro del sistema gastrointestinal. A baja viscosidad el contenido de la luz intestinal puede experimentar una rápida difusión y absorción por un flujo turbulento (velocidades altas).

Mientras que en un flujo laminar (velocidades bajas por una alta viscosidad), pueden ocurrir malas condiciones de digestión y absorción reteniendo los nutrientes dentro de la matriz formada por la FD limitando su interacción con las enzimas digestivas <sup>9,29</sup>. Además, las FDS pueden interactuar con la capa de moco intestinal, particularmente con las mucinas, afectando su grosor y por ende la absorción de moléculas al torrente sanguíneo <sup>33</sup>. La disminución en la tasa y tiempo de absorción de nutrientes se puede ver reflejado en los niveles de glucosa e insulina posprandial, así como los niveles de colesterol sanguíneo <sup>27,34</sup>. En un estudio, en el que se evaluaron los efectos de la suplementación con  $\beta$ -glucano de cebada sobre la regulación de los niveles de glucosa y lípidos plasmáticos, se observó cómo los niveles máximos de glucosa e insulina posprandial se reducen significativamente <sup>35</sup>. Además, los niveles diarios de glucosa también disminuyen al incluir este tipo de fibra en la dieta. En otro estudio se logró observar como la digestibilidad *in vitro* del almidón disminuye en presencia de FD. Esto debido que la FD produce una restricción de la disponibilidad de agua al apropiarse de la misma, la cual es necesaria para la degradación, hinchamiento y gelatinización de los gránulos de almidón, afectando así la digestión de los carbohidratos y la liberación de sus productos digestivos <sup>25</sup>. Cabe enfatizar que las características hidrofílicas e hidrofóbicas de la FD permiten su interacción con los

ácidos biliares impidiendo su reabsorción al adherirse a ellos<sup>18,19</sup>. El agotamiento de los ácidos biliares nativos se compensa mediante la síntesis de Novo en el hígado, lo que conduce a una reducción de los niveles de colesterol<sup>29</sup>. Este efecto puede promover, positivamente, la pérdida de peso corporal; sin embargo, es importante que no todos los ácidos biliares unidos a la FD se eliminen del cuerpo, por lo que durante la fermentación microbiana parte de los ácidos biliares se liberan y son convertidos enzimáticamente, posibilitando su reabsorción incluso en el intestino grueso<sup>31</sup>.

### Supresión del apetito

En la supresión del apetito se ven involucrados dos procesos: saciación y saciedad. El primero se refiere al proceso que determina el tiempo que dura una comida específica y la finalización de la ingesta de alimentos, mientras que el segundo es la sensación de plenitud que persiste entre los tiempos de comida hasta que retorna la sensación de hambre<sup>10</sup>.

La ingesta de alimentos con alto contenido de FD aumenta el esfuerzo en la masticación, lo que prolonga la exposición oral y deja tiempo para el procesamiento de señales que median las sensaciones de saciación. Este es un proceso relevante porque permite compactar el bolo alimenticio, estimular la secreción de saliva y enviar señales neuronales que estimulan la actividad contráctil y secretora del sistema gastrointestinal<sup>36</sup>. Si la exposición oral es corta la comunicación neuronal no será eficiente, por lo que la percepción del apetito se verá afectada promoviendo una mayor ingesta de alimentos y energía<sup>37,38</sup>.

En un estudio clínico realizado en ratones, se analizó el efecto sinérgico de los fructanos de agavinas sobre la ingesta energética y el aumento de peso corporal. En esa investigación se logró observar como todos los animales alimentados con dietas altas en FD tuvieron una ganancia reducida de peso corporal, así como concentraciones séricas de triglicéridos y colesterol más bajas. Se observó que el AGCC colónico más abundante fue el acetato y que la ingesta diaria de alimentos, durante el periodo experimental, fue significativamente menor en el grupo experimental<sup>8</sup>.

Es sabido que los AGCC pueden suprimir el apetito al actuar como moléculas de señalización y activando vías de comunicación entre el sistema nervioso central y el sistema gastrointestinal<sup>39</sup>. Por otra parte, también se ha observado cómo la administración oral de butirato es capaz de reducir la ingesta de alimentos al suprimir la actividad de neuronas en el hipotálamo que expresan el neuropéptido Y (NPY), y al disminuir la actividad neuronal

dentro del núcleo del tracto solitario y el complejo vagal dorsal en el tronco encefálico<sup>20</sup>.

Los AGCC pueden activar receptores de ácidos grasos libres (FFARs) como FFAR2 y FFAR3, promoviendo la síntesis de hormonas anorexigénicas como: péptido similar al glucagón 1 (GLP1), péptido YY (PYY) y leptina<sup>38-41</sup>. Existe evidencia de cómo los AGCC de inulina actúan a través de FFAR2 aumentando la densidad celular, así como la producción de PYY y GLP1 dentro del colón proximal. El aumento de PYY y GLP1 se asoció positivamente con la reducción del apetito y protección contra la obesidad inducida por la dieta. Contrariamente al aumento de PYY, el aumento de GLP1 se produce independientemente de FFAR2, por lo que es de gran interés identificar los factores que modulan de forma diferencial la expresión de estas dos hormonas intestinales<sup>41</sup>. En otro estudio realizado en el 2021, se logró apreciar como los AGCC pueden suprimir el apetito a través del circuito neuronal intestino-cerebro, activando FFAR2 y FFAR3 gracias al propionato que es capaz de aumentar la producción de PYY, mientras que el acetato puede aumentar la producción de GLP1 y leptina, además de reducir los niveles séricos de ácidos grasos y glucosa en sangre<sup>39</sup>. Estas investigaciones fundamentan la asociación entre las propiedades de la FD sobre la supresión del apetito y el control del peso corporal.

### Regulación de la homeostasis energética mediante el metabolismo de ácidos grasos y glucosa

La homeostasis energética integra el conjunto de procesos fisiológicos implicados en los mecanismos de digestión, absorción y metabolismo de nutrientes, regulando el equilibrio entre la energía que se asimila de los alimentos y la energía que es gastada por el organismo<sup>36</sup>. Anteriormente se describieron mecanismos relacionados con la disminución de la ingesta y absorción de nutrientes. En este apartado se hará énfasis en el papel que juegan los AGCC derivados de la fermentación de la FD sobre la regulación del metabolismo de ácidos grasos y glucosa a través de diferentes mecanismos de acción (Figura 2).

Se ha reportado como los AGCC pueden fosforilar y activar directamente la proteína cinasa activada por AMP (AMPK por sus siglas en inglés) al aumentar la proporción de AMP/ATP o indirectamente a través de la vía FFAR2-leptina<sup>40,41</sup>. La leptina es una adipocina capaz de regular el gasto energético y el apetito al actuar sobre las neuronas del ácido gamma aminobutírico (GABA) y la melanocortina del nervio óptico (POMC) en el hipotálamo, para mejorar la captación de glucosa mejorando el



metabolismo hepático y promoviendo la síntesis de insulina <sup>42</sup>.

Por otro parte, se ha identificado que el ácido butírico puede mejorar la oxidación de glucosa y ácidos grasos en el tejido adiposo marrón; además de prevenir la resistencia a la insulina causada por la dieta <sup>20</sup>; y ayuda a aumentar la fosforilación de AMPK en ratones obesos <sup>43</sup>. De igual forma se ha observado que en el músculo esquelético y tejido adiposo la activación de AMPK inhibe la síntesis de glucógeno y proteínas; además de incrementar el transporte de glucosa y la oxidación de ácidos grasos <sup>32,44</sup>. La activación de AMPK también puede aumentar la expresión proteica del coactivador del receptor gamma 1  $\alpha$  activado por el proliferador de peroxisoma (PGC1 $\alpha$ ), del cual se sabe que puede controlar la actividad transcripcional de varios factores de transcripción, incluido el receptor activado por proliferador de peroxisoma  $\alpha$  (PPAR $\alpha$ ) y el receptor activado por proliferador de peroxisoma  $\gamma$  (PPAR $\gamma$ ). Importantes en la regulación y metabolismo del colesterol, lípidos y glucosa. <sup>27,45</sup>

Un reporte de Weitkunat y colaboradores, evidenció como la administración oral de inulina y acetato en ratones disminuye la síntesis de Novo y el transporte de ácidos grasos hepáticos al aumentar la oxidación de ácidos grasos y glucosa en el hígado y tejido muscular <sup>11</sup>. También se tiene evidencia de cómo los AGCC pueden aumentar la expresión de proteínas desacoplantes (UCP1, UCP2, y UCP3), limitando la síntesis de ATP al aumentar la termogénesis y permitir que la oxidación de ácidos grasos reduzca la deposición de lípidos <sup>46</sup>.

En otro artículo publicado en el *International Journal of Molecular Sciences* del 2020, se dio a conocer como los AGCC estimulan la oxidación de ácidos grasos mitocondriales activando la vía de señalización AGCC-AMPK-UCP2 en hepatocitos HepG2 humanos y adipocitos 3T3L1 de ratón <sup>45</sup>. Además, también se cuenta con evidencia de como el butirato regula positivamente la expresión de UCP2, UCP3 y la oxidación de ácidos grasos en el músculo esquelético, ya que mediante la administración de butirato se detectaron marcadores de histonas H3K9Ac con alta expresión de activación génica en las regiones promotoras del receptor de adiponectina (adipoR1 y adipoR2), y, UCP2y UCP3 en el músculo de ratones obesos. Por lo tanto, el butirato no solo aumenta la producción de calor y el metabolismo de lípidos a través de proteínas desacoplantes (UCPs), sino que también mejora el metabolismo de los lípidos al activar la adiponectina <sup>47</sup>.

Se ha mencionado que en el hígado la activación de AMPK regula la baja expresión de glucosa-6-fosfatasa (G6Pasa) y fosfoenolpiruvato carboxicina 1 (PEPCK),

enzimas necesarias para la síntesis de glucosa <sup>48</sup>. La AMPK puede afectar a muchas vías de señalización descendentes, como PGC-1 $\alpha$  y FOXO; sin embargo, queda por estudiar más a fondo si estas vías de señalización están relacionadas con el metabolismo de la glucosa activado por los AGCC <sup>44</sup>. Mientras que, en adipocitos aislados, el acetato y propionato inhiben la lipólisis a través de la activación de FFAR2 y FFAR3 disminuyendo la sensibilidad a la insulina y la acumulación de ácidos grasos y glucosa <sup>45</sup>. También se ha mencionado que la lipólisis mediada por FFAR2 es más probable a través de la inactivación de la lipasa sensible a hormonas (HSL), la cual hidroliza triglicéridos y es una de las moléculas clave que controlan la lipólisis en el tejido adiposo <sup>49</sup>. La unión de AGCC a FFAR2 conduce a la disociación; y, por lo tanto, la activación de la proteína G sensibles a la toxina *pertussis*. Esta proteína inhibe el adenilato ciclasa (AC), provocando la disminución en la producción de monofosfato de adenosina cíclico (AMPc) y aumentando la relación ATP/AMPc; que posteriormente, disminuirá la actividad de la Proteína cinasa A (APK) <sup>50</sup>. Cabe enfatizar que la evidencia recolectada refiere que una disminución de la actividad de APK conduce a la desfosforilación y desactivación de HSL en el tejido adiposo, disminuyendo la lipólisis y concentración de ácidos grasos en el plasma <sup>51</sup>.

FFAR2 también juega un papel importante en el almacenamiento de grasa y glucosa, ya que se ha descubierto que al suprimir la señalización de la insulina mediante la inhibición de la proteína serina/treonina cinasa (AKT), es capaz de inhibir el almacenamiento de grasa en el tejido adiposo y promover el metabolismo de lípidos y glucosa en otros tejidos <sup>52</sup>. Además, se ha demostrado que la activación de FFARs por AGCC puede estimular la secreción de PYY y GLP1 en células endocrinas regulando directamente los niveles de glucosa al aumentar la secreción y utilización de insulina en el músculo y tejido adiposo e indirectamente al promover la proliferación de células  $\beta$  de los islotes de Langerhans <sup>34</sup>. Es bien sabido que células  $\beta$  sanas satisfacen las necesidades de insulina de todo el cuerpo a través de la proliferación celular y la producción de insulina, mejorando el metabolismo de glucosa y ácidos grasos hepáticos, así como los niveles de glucosa posprandial; además de regularizar la síntesis de hormonas <sup>53</sup>. Cabe señalar que también se ha informado como los AGCC pueden aumentar la expresión de transportadores de glucosa que se encuentran en la célula como el transportador de glucosa tipo 4 (GLUT4), promoviendo la absorción y oxidación de más glucosa por los mioblastos <sup>54</sup>.

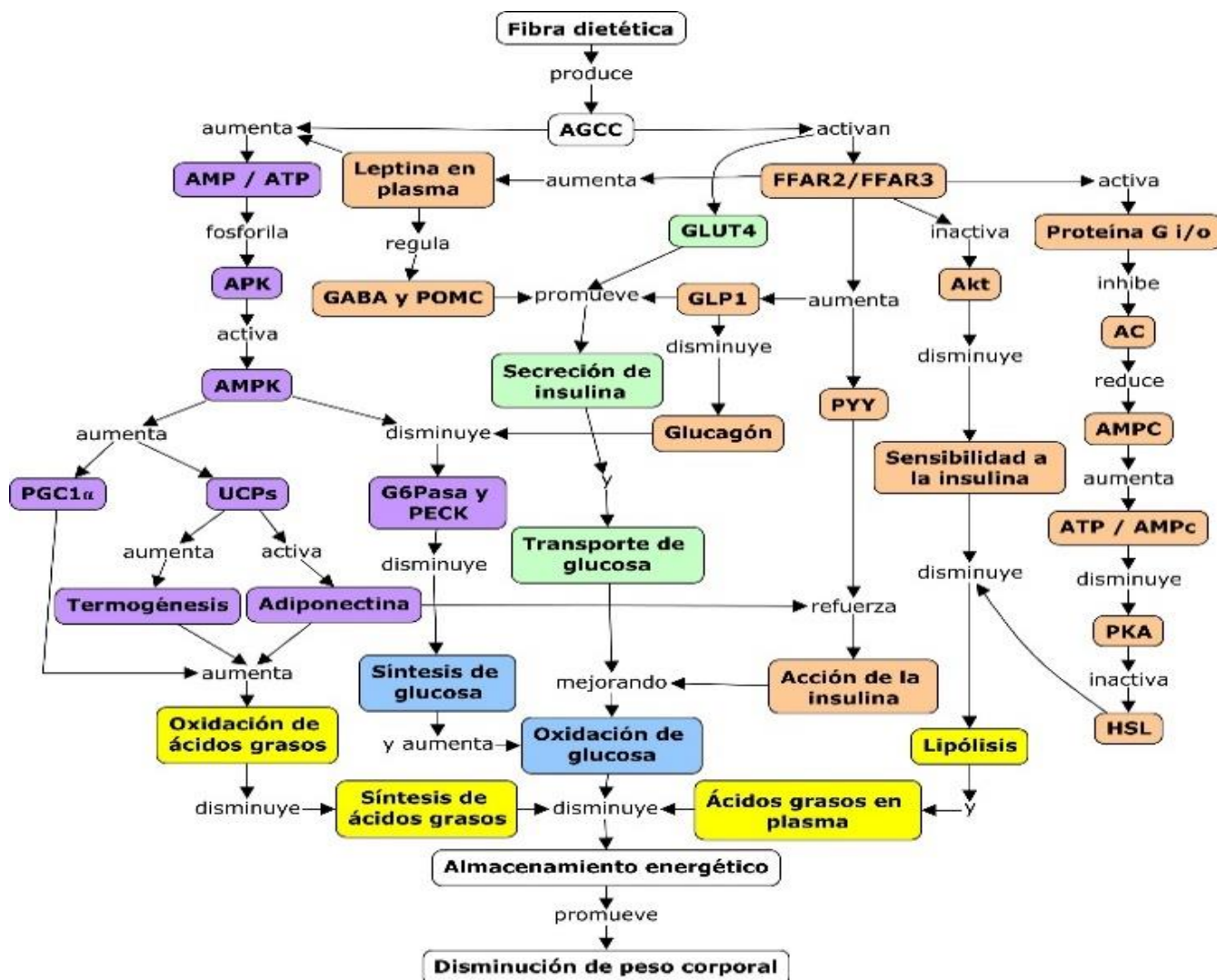


Figura 2. Producción de AGCC y sus mecanismos asociados en la regulación del metabolismo de ácidos grasos y glucosa. Elaboración propia, 2023.

Notas: Ácidos grasos de cadena corta (AGCC), Adenosín monofosfato (AMP), Adenosín trifosfato (ATP), Proteína cinasa A (APK), Proteína cinasa activada por AMP (AMPK), Coactivador del receptor gamma 1 alfa activado por el proliferador de peroxisoma (PGC1α), Proteínas desacoplantes (UCPs), Ácido gamma aminobutírico (GABA), Proopiomelanocortina (POMC), Glucosa-6-fosfatasa (G6Pasa), Fosfoenolpiruvato carboxilasa 1 (PEPCK), Transportador de glucosa tipo 4 (GLUT4), Péptido 1 similar al glucagón (GLP1), Receptores de ácidos grasos libres (FFAR), Péptido YY (PYY), Proteína cinasa B (Akt), Adenilato ciclasa (AC), Adenilato ciclasa (AMPC), Lipasa sensible a hormonas (HSL), Proteína G sensibles a la toxina pertussis (Proteína Gai/o).

## Recomendaciones y fuentes de fibra dietética

El IDR de la FD actualmente se basa en el nivel de ingesta observada para prevenir la aparición de enfermedades cardiovasculares. Se recomienda que lactantes mayores de 2 años aumenten la ingesta de FD a una cantidad igual o mayor a su edad, más 5 g/día hasta lograr ingestas de 25 a 35 g/día a partir de los 20 años <sup>12</sup>.

Actualmente no existe información confiable sobre los efectos de la FD en los más pequeños (mayores de 6 meses), sin embargo, es aconsejable introducir diferentes tipos de frutas, verduras y cereales de fácil digestión mientras se desarrolla apropiadamente el sistema

digestivo del infante; y, en el caso de los adultos mayores, el IDR de referencia está basado en un total de 14 g/1000 kcal <sup>12,13</sup>. En Estados Unidos actualmente las etiquetas de información nutricional recomiendan a los adultos un total de 25 g/2000 kcal, aunque ese valor aumenta a 28 g/día con el nuevo etiquetado <sup>12</sup>. Mientras que en México el IDR es de 30 g con el mismo número de kcal <sup>14</sup>. En Estados Unidos, Australia y Nueva Zelanda existen declaraciones de propiedades saludables relacionadas al consumo diario de FD (pectinas 6 g, goma guar 10 g y β-glucanos 3 g), que justifican la importancia de su consumo y efectos específicos a la salud <sup>12</sup>. Los alimentos que se han



identificado cómo fuentes principales de FD son: frutas, verduras, cereales y leguminosas. Por lo que es imprescindible que formen parte de la dieta en cantidades considerables (Tabla 2) <sup>15,16</sup>.

Desde un punto de vista nutricional, la FD debería estar presente en todos los tiempos de comida. Además, esta debería provenir de diferentes alimentos para no perder los beneficios que aporta la variedad de nutrientes y compuestos que estos poseen. Por otro lado, es recomendable que los alimentos que poseen FD se consuman íntegros; ya que a menudo las personas suelen exprimir o licuar frutas, verduras y cereales con

líquidos para facilitar su consumo. Sin embargo, como ya se hizo mención, consumirlos de esta forma reduce los beneficios que aporta la FD, ya que es necesario que los alimentos pasen por el proceso de masticación y permanezcan el tiempo suficiente dentro del sistema digestivo para que le dé tiempo de actuar. Además, al exprimir los alimentos para obtener únicamente la parte líquida puede ser contraproducente, ya que la FD se quedaría en el bagazo y el jugo obtenido aumentaría su índice glucémico en gran medida, lo que podría ser contraproducente para las personas, especialmente para aquellas que padecen enfermedades como la diabetes.

Tabla 2. Contenido de fibra dietética en diferentes grupos de alimentos.

Fuentes de FD	% FDT	Alimento
Cereales <sup>15</sup>	1.6–43.2	Trigo (6.2%-12%), arroz (26.3%-40.2%), maíz (7.1%-13.9%), avena (10.2%-12.1%), cebada (15%-24.1%), centeno (13%-17.7%), sorgo (6.5%-10.4%), mijo (7%-21.2%), chía (34-40%) fonio (1.6%-2.3%) y arroz salvaje 5.2%-6.9%).
Pseudocereales <sup>15</sup>	10.8–53.8	Alforfón (24%.6-26.4%), amaranto (12.4%-18.5%), quinua (12.2%-14.4%), chía (34%- 53.8%), linaza (24.6%-26.4%), sésamo (17.4%) y sésamo decortinado (10.8%).
Legumbres <sup>15</sup>	8.2-40.3	Soja (9.2%-16.5%), cacahuete (9.1%-10.1%), lentejas (12.7%-20.7%), frijol (22.3%), caupí (30.7%), garbanzos (15.4%) y guisantes (13.8%-22%).
Frutas <sup>16</sup>	1 – 70.6	Mango (28.1%), Naranja (14.5%-16-5%), piña (70.6%), manzana (55%-65%), mandarina, plátano (parte comestible 1.8%), guayaba (2.78%-2.95%), pulpa de papaya (1-2.03%), guayaba (2.78%-2.95%), coco (60-&3.25%). y bayas (1-7%).
Verduras <sup>16</sup>	2.6 – 63.5	Brócoli (11.3), orujo de zanahoria (63.5), papa (7.6%), tomate (55%) y pimientos (2.6%).

Elaboración propia, 2023.

## Conclusión

Es evidente que el control de peso y obesidad son problemas de salud que han evolucionado en un tiempo relativamente corto debido al aumento del consumo de alimentos con un alto contenido energético y bajo valor nutricional, así como, un deficiente o nulo aporte de FD. Como tal, las propiedades de la FD están siendo utilizadas en el tratamiento del control de peso y la obesidad, y esto apoyándose en la asociación de sus propiedades y mecanismos implicados (solubilidad, viscosidad, gelificación y fermentabilidad); además, siendo la FDS la principal, debido a su accesibilidad a la fermentación colónica y consecuente formación de AGCC, los cuales están implicados en la supresión del apetito y el control de peso corporal, así como en la regulación del metabolismo de ácidos grasos y glucosa. Por otro lado, es recomendable que la FD provenga de una dieta equilibrada, suficiente, variada y adecuada. Tratando de seleccionar alimentos lo más naturales e integrales posibles, debido a que el procesamiento de estos puede reducir los efectos benéficos de la FD. Además, es

necesario mantener un estilo de vida activo, dedicar tiempo para realizar ejercicio, evitar situaciones de estrés y reducir el consumo de sustancias tóxicas; a su vez, un equilibrio energético adecuado en base a las características de cada individuo, por lo que es recomendable acudir con un nutriólogo o profesional de la salud especializado en la nutrición para una correcta orientación. A pesar de que se cuenta con una gran cantidad de información sobre los beneficios que brinda la FD, es necesario profundizar sobre el tema, ya que la mayoría de las recomendaciones se enfocan en personas adultas, asimismo, este componente alimenticio aún guarda muchas incógnitas sobre los beneficios que se obtienen al formar parte de la dieta, por lo que es imprescindible continuar realizando investigaciones sobre la FD y de todos los beneficios que se obtienen.

## Referencias

- [1] Soeroto AY, Soetedjo NN, Purwiga A, Santoso P, Kulsum ID, Suryadinata H, et al. Effect of increased BMI and obesity on the outcome of COVID-19 adult patients: A systematic review and meta-analysis. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*. 2020; 14(6): 1897-1904. <https://doi.org/10.1016/j.dsx.2020.09.029>
- [2] Organización Mundial de la Salud (OMS). Obesidad y sobrepeso. 2021. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>. Consultado: 24/06/22.
- [3] Torres F, Rojas A. Obesidad y salud pública en México: transformación del patrón hegemónico de oferta-demanda de alimentos. *Problemas del Desarrollo*. 2018; 49(193): 145-169. <https://doi.org/10.22201/ieec.20078951e.2018.193.63185>
- [4] Jackson SE, Llewellyn CH, Smith L. The obesity epidemic—Nature via nurture: A narrative review of high-income countries. *SAGE Open Medicine*. 2020; 8: 2050312120918265. <https://doi.org/10.1177/2050312120918265>
- [5] Popa AR, Fratila O, Rus M, Aron RA, Vesa CM, Pantis C, et al. Risk factors for adiposity in the urban population and influence on the prevalence of overweight and obesity. *Experimental and Therapeutic Medicine*. 2020; 20(1): 129-133. <https://doi.org/10.3892/etm.2020.8662>
- [6] Chooi YC, Ding C, Magkos F. The epidemiology of obesity. *Metabolism*. 2019; 92: 6-10. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2018.09.005>
- [7] Joint FAO/WHO Food Standards Programme, Secretariat of the CODEX Alimentarius Commission: CODEX Alimentarius (CODEX) Guidelines on Nutrition Labeling CAC/GL 2–1985 as Last Amended 2010. Rome: FAO; 2010. [https://files.foodmate.com/2013/files\\_1746.html](https://files.foodmate.com/2013/files_1746.html)
- [8] Alvarado-Jasso GM, Camacho-Díaz BH, Ocampo ML, Jiménez-Ferrer JE, Mora-Escobedo R, Osorio-Díaz P. Prebiotic effects of a mixture of agavins and green banana flour in a mouse model of obesity. *Journal of Functional Foods*. 2020; 64: 103685. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103685>
- [9] Dayib, M., Larson, J., & Slavin, J. (2020). Dietary fibers reduce obesity-related disorders: mechanisms of action. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, 23(6), 445-450. <https://doi.org/10.1097/MCO.0000000000000696>
- [10] Gibbons C, Hopkins M, Beaulieu K, Oustric P, Blundell JE. Issues in measuring and interpreting human appetite (satiety/satiation) and its contribution to obesity. *Current Obesity Reports*. 2019; 8(2): 77-87. <https://doi.org/10.1007/s13679-019-00340-6>
- [11] Weitkunat K, Stuhlmann C, Postel A, Rumberger S, Fankhänel M, Woting A, et al. Short-chain fatty acids and inulin, but not guar gum, prevent diet-induced obesity and insulin resistance through differential mechanisms in mice. *Scientific Reports*. 2017; 7(1): 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06447-x>
- [12] Stephen AM, Champ MM, Cloran SJ, Fleith M, van Lieshout L, Mejborn H, Burley VJ. Dietary fibre in Europe: current state of knowledge on definitions, sources, recommendations, intakes and relationships to health. *Nutrition Research Reviews*. 2017; 30(2):149-190. <https://doi.org/10.1017/S095442241700004X>
- [13] Karczmar R, Slavin JL. Definitions, regulations, and new frontiers for dietary fiber and whole grains. *Nutrition Reviews*. 2020; 78(S1): 6-12. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuz061>
- [14] NOM-051-SCFI/SSA1-2010. Especificaciones generales de etiquetado de alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados- Información comercial y sanitaria. En: [http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4010/seeco11\\_C/seeco11\\_C.htm](http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4010/seeco11_C/seeco11_C.htm).
- [15] Serna-Saldívar SO, Sánchez-Hernández D. Dietary Fiber in Cereals, Legumes, Pseudocereals and Other Seeds. En Welti-Chanes J, Serna-Saldívar SO, Campanella O, Tejada-Ortigoza V. *Science and Technology of Fibers in Food Systems*. Springer Nature; 2020: 87-122. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38654-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38654-2_5)
- [16] Morales-de la Peña M, Odriozola-Serrano I, Oms-Oliu G, Martín-Belloso O. Dietary fiber in fruits and vegetables. En Welti-Chanes J, Serna-Saldívar SO, Campanella O, Tejada-Ortigoza V. *Science and Technology of Fibers in Food Systems*. Cham, Switzerland: Springer Nature; 2020. 123-152. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38654-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38654-2_6)
- [17] Markowiak-Kopeć P, Śliżewska K. The effect of probiotics on the production of short-chain fatty acids by human intestinal microbiome. *Nutrients*. 2020; 12(4): 1107. <https://doi.org/10.3390/nu12041107>
- [18] Khan K, Jovanovski E, Ho HV, Marques AC, Zurbau A, Mejia SB, et al. The effect of viscous soluble fiber on blood pressure: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*. 2018; 28(1): 3-13. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2017.09.007>
- [19] Hadri Z. Unravelling the effect of viscous fiber on food intake: A review of studies. *South Asian Journal of Experimental Biology*. 2020; 10(5): 313-321. [https://doi.org/10.38150/sajeb.10\(5\).p313-32](https://doi.org/10.38150/sajeb.10(5).p313-32)
- [20] Li Z, Yi CX, Katiraei S, Kooijman S, Zhou E, Chung CK, et al. Butyrate reduces appetite and activates brown adipose tissue via the gut-brain neural circuit. *Gut*. 2018; 67(7): 1269-1279. <http://dx.doi.org/10.1136/gutjnl-2017-314050>
- [21] Holscher, H. D. (2017). Dietary fiber and prebiotics and the gastrointestinal microbiota. *Gut Microbes*, 8(2), 172-184. <https://doi.org/10.1080/19490976.2017.1290756>
- [22] Williams BA, Mikkelsen D, Flanagan BM, Gidley MJ. “Dietary fibre”: moving beyond the “soluble/insoluble” classification for monogastric nutrition, with an emphasis on humans and pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2019; 10(1): 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40104-019-0350-9>
- [23] Dai FJ, Chau CF. Classification and regulatory perspectives of dietary fiber. *Journal of Food and Drug Analysis*. 2017; 25(1): 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.09.006>
- [24] Gidley MJ, Yakubov GE. Functional categorisation of dietary fibre in foods: Beyond ‘soluble’vs ‘insoluble’. *Trends in Food Science & Technology*. 2019; 86: 563-568. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.12.006>
- [25] Jia M, Yu Q, Chen J, He Z, Chen Y, Xie J, et al. Physical quality and in vitro starch digestibility of biscuits as affected by addition of soluble dietary fiber from defatted rice bran. *Food Hydrocolloids*. 2020; 99: 105349. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105349>
- [26] Nagy R, Máthé E, Csapó J, Sipos P. Modifying effects of physical processes on starch and dietary fiber content of foodstuffs. *Processes*. 2021; 9(1): 17. <https://doi.org/10.3390/pr9010017>
- [27] Müller M, Hernández MA, Goossens GH, Reijnders D, Holst JJ, Jocken JW, et al. Circulating but not faecal short-chain fatty acids are related to insulin sensitivity, lipolysis and GLP-1 concentrations in humans. *Scientific Reports*. 2019; 9(1): 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48775-0>
- [28] Gu Y, Zhao J, Johnson JA. Polymer networks: from plastics and gels to porous frameworks. *Angewandte Chemie International Edition*. 2020; 59(13): 5022-5049. <https://doi.org/10.1002/anie.201902900>
- [29] Holland C, Ryden P, Edwards CH, Grundy MM. Plant cell walls: Impact on nutrient bioaccessibility and digestibility. *Foods*. 2020; 9(2): 201. <https://doi.org/10.3390/foods9020201>
- [30] Portincasa P, Bonfrate L, Vacca M, De Angelis M, Farella I, Lanza E, Khalil M, Wang DQ, Sperandio M, Di Ciaula A. Gut microbiota and short chain fatty acids: implications in glucose homeostasis. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(3): 1105. <https://doi.org/10.3390/ijms23031105>

- [31] Marasca E, Boulos S, Nyström L. Bile acid-retention by native and modified oat and barley  $\beta$ -glucan. *Carbohydrate Polymers*. 2020; 236: 116034. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116034>
- [32] Zeng H, Hamlin SK, Safratowich BD, Cheng WH, Johnson LK. Superior inhibitory efficacy of butyrate over propionate and acetate against human colon cancer cell proliferation via cell cycle arrest and apoptosis: Linking dietary fiber to cancer prevention. *Nutrition Research*. 2020; 83: 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2020.08.009>
- [33] Grundy MM, Quint J, Rieder A, Ballance S, Dreiss CA, Butterworth PJ, et al. Impact of hydrothermal and mechanical processing on dissolution kinetics and rheology of oat  $\beta$ -glucan. *Carbohydrate Polymers*. 2017; 166: 387-397. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.02.077>
- [34] Liu JL, Segovia I, Yuan CL, Gao ZH. Controversial roles of gut microbiota-derived short-chain fatty acids (SCFAs) on pancreatic  $\beta$ -cell growth and insulin secretion. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020; 21(3): 910. <https://doi.org/10.3390/ijms21030910>
- [35] Higa M, Fuse Y, Miyashita N, Fujitani A, Yamashita K, Ichijo T, et al. Effect of high  $\beta$ -glucan barley on postprandial blood glucose levels in subjects with normal glucose tolerance: assessment by meal tolerance test and continuous glucose monitoring system. *Clinical Nutrition Research*. 2019; 8(1): 55-63. <https://doi.org/10.7762/cnr.2019.8.1.55>
- [36] Rautmann AW, de La Serre CB. Microbiota's Role in Diet-Driven Alterations in Food Intake: Satiety, Energy Balance, and Reward. *Nutrients*. 2021; 13(9): 3067. <https://doi.org/10.3390/nu13093067>
- [37] Pedersen AM, Sørensen CE, Proctor GB, Carpenter GH. Salivary functions in mastication, taste and textural perception, swallowing and initial digestion. *Oral Diseases*. 2018; 24(8): 1399-1416. <https://doi.org/10.1111/odi.12867>
- [38] Shimizu H, Masujima Y, Ushiroda C, Mizushima R, Taira S, Ohue-Kitano R, et al. Dietary short-chain fatty acid intake improves the hepatic metabolic condition via FFAR3. *Scientific Reports*. 2019; 9(1): 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53242-x>
- [39] Jiao A, Yu B, He J, Yu J, Zheng P, Luo Y, et al. Sodium acetate, propionate, and butyrate reduce fat accumulation in mice via modulating appetite and relevant genes. *Nutrition*. 2021; 87(88): 111198. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2021.111198>
- [40] Yoshida H, Ishii M, Akagawa M. Propionate suppresses hepatic gluconeogenesis via GPR43/AMPK signaling pathway. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2019; 672: 108057. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2019.07.022>
- [41] Brooks L, Viardot A, Tsakmaki A, Stolarczyk E, Howard JK, Cani PD, et al. Fermentable carbohydrate stimulates FFAR2-dependent colonic PYY cell expansion to increase satiety. *Molecular Metabolism*. 2017; 6(1): 48-60. <https://doi.org/10.1016/j.molmet.2016.10.011>
- [42] Ge TT, Yao XX, Zhao FL, Zhao XH, Yang W, Cui RJ, et al. Role of leptin in the regulation of food intake in fasted mice. *Journal of cellular and molecular medicine*. 2020; 24(8): 4524-4532. <https://doi.org/10.1111/jcmm.15110>
- [43] Mollica MP, Raso GM, Cavaliere G, Trinchese G, De Filippo C, Aceto S, et al. Butyrate regulates liver mitochondrial function, efficiency, and dynamics in insulin-resistant obese mice. *Diabetes*. 2017; 66(5): 1405-1418. <https://doi.org/10.2337/db16-0924>
- [44] Liu H, Peng H, Xiang H, Guo L, Chen R, Zhao S, et al. TWEAK/Fn14 promotes oxidative stress through AMPK/PGC 1 $\alpha$ /MnSOD signaling pathway in endothelial cells. *Molecular Medicine Reports*. 2018; 17(1): 1998-2004. <https://doi.org/10.3892/mmr.2017.8090>
- [45] He J, Zhang P, Shen L, Niu L, Tan Y, Chen L, et al. Short-chain fatty acids and their association with signalling pathways in inflammation, glucose and lipid metabolism. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020; 21(17): 6356. <https://doi.org/10.3390/ijms21176356>
- [46] Zheng F, Cai Y. Concurrent exercise improves insulin resistance and nonalcoholic fatty liver disease by upregulating PPAR- $\gamma$  and genes involved in the beta-oxidation of fatty acids in ApoE-KO mice fed a high-fat diet. *Lipids in Health and Disease*. 2019; 18(1): 1-8. <https://doi.org/10.1186/s12944-018-0933-z>
- [47] Hong J, Jia Y, Shifeng S, Jiia L, Li H, Han Z, et al. Butyrate alleviates high fat diet-induced obesity through activation of adiponectin-mediated pathway and stimulation of mitochondrial function in the skeletal muscle of mice. *Oncotarget*. 2016; 7(35): 56071-56082. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.11267>
- [48] Zhou H, Yu B, Sun J, Liu Z, Chen H, Ge L, et al. Short-chain fatty acids can improve lipid and glucose metabolism independently of the pig gut microbiota. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2021; 12(1): 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00581-3>
- [49] Sepahi A, Liu Q, Friesen L, Kim CH. Dietary fiber metabolites regulate innate lymphoid cell responses. *Mucosal Immunology*. 2021; 14(2): 317-330. <https://doi.org/10.1038/s41385-020-0312-8>
- [50] Riddy DM, Delerive P, Summers RJ, Sexton PM, Langmead CJ. G protein-coupled receptors targeting insulin resistance, obesity, and type 2 diabetes mellitus. *Pharmacological Reviews*. 2018; 70(1): 39-67. <https://doi.org/10.1124/pr.117.014373>
- [51] Barella LF, Jain S, Kimura T, Pydi SP. Metabolic roles of G protein-coupled receptor signaling in obesity and type 2 diabetes. *The FEBS Journal*. 2021; 288(8): 2622-2644. <https://doi.org/10.1111/febs.15800>
- [52] Chambers ES, Preston T, Frost G, Morrison DJ. Role of gut microbiota-generated short-chain fatty acids in metabolic and cardiovascular health. *Current Nutrition Reports*. 2018; 7(4): 198-206. <https://doi.org/10.1007/s13668-018-0248-8>
- [53] Cerf ME. Beta Cell Physiological dynamics and dysfunctional transitions in response to islet inflammation in obesity and diabetes. *Metabolites*. 2020; 10(11): 452. <https://doi.org/10.3390/metabo10110452>
- [54] Frampton J, Murphy KG, Frost G, Chambers ES. Short-chain fatty acids as potential regulators of skeletal muscle metabolism and function. *Nature Metabolism*. 2020; 2(9): 840-848. <https://doi.org/10.1038/s42255-020-0188-7>