

Compuestos bioactivos durante la germinación en cereales: una revisión

Bioactive compounds during cereal germination: A review

K. J. Reyna-Olvera^a, C. B. Muñoz-Landes^{b,*}, F. A. Guzmán-Ortiz^{c,*}

^aÁrea Académica de Química (AAQ), Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad del Conocimiento, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

^bEscuela Superior de Tizayuca, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Tizayuca, Hidalgo, México.

^cSECITHI-Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km 4.5 s/n, Mineral de la Reforma, 42184 Hidalgo, México.

Resumen

Los cereales son cultivos de amplio consumo a nivel mundial por su bajo costo y disponibilidad. Además, los cereales son de gran importancia para la elaboración de una variedad de alimentos, es por ello que los cereales toman mayor relevancia en la industria alimentaria. En diversos estudios se ha demostrado que los cereales no sólo constituyen una fuente importante de carbohidratos, proteínas, vitaminas y minerales, sino también compuestos bioactivos, entre los más relevantes se encuentran los ácidos fenólicos, flavonoides, tocoferoles y carotenoides. Estos compuestos poseen una variedad de beneficios para la salud humana como la prevención de enfermedades no transmisibles (ENT). Un proceso que incrementa la biodisponibilidad y actividad antioxidante de los compuestos bioactivos en cereales, es la germinación, debido a cambios metabólicos en el embrión, principalmente la activación de enzimas y la degradación de compuestos antinutricionales como lectinas, saponinas alcaloides, inhibidores de tripsina etc. aumentando así su valor nutricional.

Palabras Clave: Germinación, Cereales, Compuestos bioactivos, Actividad antioxidante.

Abstract

Cereals are widely consumed crops around the world due to their low cost and availability. In addition, cereals are of great importance in the production of a wide variety of foods, which makes them increasingly relevant in the food industry. Various studies have shown that cereals are not only an important source of carbohydrates, proteins, vitamins, and minerals, but also of bioactive compounds. Among the most significant of these are phenolic acids, flavonoids, tocopherols, and carotenoids. These compounds provide a variety of health benefits, such as the prevention of non-communicable diseases (NCDs). One process that increases the bioavailability and antioxidant activity of bioactive compounds in cereals is germination, due to metabolic changes in the embryo, mainly the activation of enzymes and the degradation of antinutritional compounds such as lectins, saponins, alkaloids, and trypsin inhibitors, thereby enhancing their nutritional value.

Keywords: Germination, Cereals, Bioactive compounds, Antioxidant activity.

1. Introducción

Los granos de cereales han constituido la principal fuente de energía para la especie humana y son una gran fuente de proteína, dado que los cereales proporcionan casi la mitad (47%) de las proteínas de la dieta en el mundo (Charley, 2012). Esto puede deberse a que el bajo contenido en agua de los cereales supone una fuente concentrada de nutrientes, además de posibilitar su conservación durante largos periodos de tiempo (Shewry & Hefferon, 2020; Kropff & Morell, 2019).

La cantidad de polifenoles en los cereales es muy variable, tanto en grano entero como en salvado, y también

depende de la variedad de cereal y del procedimiento de molienda (Adom et al., 2005). Entre los cereales con mayor contenido de compuestos bioactivos se encuentra el maíz, seguido por la avena y el trigo y el arroz de acuerdo a lo reportado por Fărcaș et al. (2022).

Los cereales pueden acumular una gran cantidad de metabolitos secundarios, como ácidos fenólicos, flavonoides, terpenoides, esteroides y alcaloides. Estas moléculas desempeñan diversas funciones beneficiosas para los humanos, como propiedades antitumorales, antiinflamatorias, antioxidantes y neuro protectoras. Muchos ácidos fenólicos, flavonoides, tocoferoles, tocotrienoles, γ -orizanol y ácido

*Autor para la correspondencia: cirobaruchs_27@hotmail.com, fabiguzman01@yahoo.com.mx

Correo electrónico: re463647@uaeh.edu.mx, (Karyme Jareth Reyna-Olvera), cirobaruchs_27@hotmail.com (Ciro Baruchs Muñoz-Llandes), fabiguzman01@yahoo.com.mx, (Fabiola Araceli Guzmán-Ortiz).

fítico presentan actividades antioxidantes (Goufo et al., 2014; Serpen et al., 2007).

Sin embargo, los cereales se procesan antes del consumo humano. Dependiendo del proceso, los niveles y la composición de los compuestos bioactivos disponibles pueden verse afectados. La molienda y la panificación son dos de los procesos más comunes utilizados universalmente para preparar los cereales para el consumo. Estos procesos implican varias etapas y numerosos factores variables que pueden alterar los niveles y el perfil de los fitoquímicos disponibles en el producto final (Ktenioudaki et al., 2015).

La germinación es una técnica efectiva, de bajo costo y sencilla que implica cambios metabólicos en la semilla durante su proceso. Es una alternativa muy efectiva para modificar el contenido y composición de nutrientes y compuestos bioactivos, debido a la actividad enzimática que se genera durante este proceso (Guzmán-Ortiz et al., 2019; Elkhailifa & Bernhardt, 2010). Según Apace Davila (2022) el maíz morado germinado tuvo efecto en la capacidad antioxidante, donde se demuestra que durante el germinado se incrementa, al igual que la cuantificación de polifenoles.

Estos hallazgos coinciden con lo descrito por Becerril (2018), quienes mencionan que el proceso de germinación de la cebada para las variedades Esmeralda, Perla y Cleopatra, favorece el incremento de la concentración de compuestos fenólicos y su actividad antioxidante.

En el proceso de germinación, las semillas activan rutas metabólicas que transforman su composición química inicial, favoreciendo la síntesis y acumulación de compuestos bioactivos como fenoles y flavonoides. Estas transformaciones están relacionadas principalmente con la vía metabólica del fenilpropanoide, una ruta clave en la producción de metabolitos secundarios en plantas (Liu et al., 2021; Zhao et al., 2017).

Además, la germinación promueve la hidrólisis de macromoléculas como almidón, lípidos y proteínas, liberando energía y precursores para la síntesis de compuestos fenólicos (Misra et al., 2012; Zhao et al., 2017). Estos se han relacionado con beneficios en el manejo de enfermedades metabólicas como la diabetes, así como con beneficios generales para la salud del consumidor (Perri et al., 2020).

2. Germinación

Por definición, la germinación incorpora aquellos eventos que comienzan con la captación de agua por la semilla seca quiescente y terminan con la elongación del eje del embrión, usualmente la radícula, que se extiende para penetrar las estructuras que lo rodean (Yu et al., 2020). Generalmente, la semilla seca comienza a germinar cuando encuentra agua en una condición favorable, seguido de la activación en la fisiología, morfología y bioquímica (Hao et al., 2022).

2.1. Proceso fisiológico

El proceso de germinación está constituido por varias fases: i) Absorción de agua por la semilla o imbibición; ii) Activación del metabolismo y proceso de respiración,

síntesis de proteínas y movilización de sustancias de reserva; iii) Elongación del embrión y ruptura de la testa a través de la cual se observa salida de la radícula (Hijlkema et al., 2011; Sánchez-López, et al., 2023). En esta fase se termina la latencia de las semillas al activar y liberar sus enzimas endógenas, como la proteasa, la amilasa y la lipasa (Guzmán-Ortiz et al., 2019).

Las condiciones de germinación, especialmente la temperatura y la humedad, deben controlarse para aumentar la eficacia de la germinación y aprovechar los atributos nutricionales y funcionales de los cereales (Gunathunga et al., 2024). Por ejemplo, las semillas de trigo requieren niveles de humedad del 35-45% para la germinación (Weerakoon et al., 2008), mientras que el maíz y el arroz presentan requerimientos ligeramente distintos: el maíz germina óptimamente con 25-30 % de humedad (Jittanit & Srisawat, 2010), la avena requiere un 60-80% de humedad durante su germinación (Garzón-Salazar et al., 2020), reflejando así adaptaciones específicas de cada especie a su ambiente de cultivo.

2.2. Rutas metabólicas

Los cambios bioquímicos durante la germinación dependen de las condiciones de germinación, así como de los tratamientos de vigorización de semillas aplicados a los granos para mejorar la germinación y el crecimiento de las plántulas después de la germinación. El acondicionamiento de semillas es un tratamiento previo a la siembra durante el cual las semillas se hidratan con una solución que les permite absorber y pasar por la primera etapa reversible de germinación, pero impide la protrusión radicular a través de la testa (Lutts et al., 2016; Benincasa et al., 2019).

Es importante destacar que las condiciones estresantes durante la germinación, así como los tratamientos del grano previos a la siembra, pueden reducir el porcentaje de germinación y/o la producción de materia seca. Por lo tanto, el uso comercial de estas manipulaciones de las condiciones ambientales durante la germinación debe configurarse adecuadamente para cada especie, a fin de obtener brotes con mayores valores nutritivos y beneficiosos para la salud, sin afectar, o con un impacto mínimo, en los niveles de producción (Benincasa et al., 2019).

En la primera fase del proceso de germinación, se activan las enzimas β -amilasas, seguidas de la hidrólisis de maltosa y sacarosa por las enzimas α -amilasas que se activan durante las etapas posteriores de la germinación (Guzmán-Ortiz et al., 2019). Aparte de eso, las enzimas β -glucanasas son responsables de la degradación de los β -glucanos, que son fibras dietéticas solubles en agua. En la etapa primaria de la germinación, la triglicérido hidrolasa induce la hidrólisis de lípidos en las semillas de los granos antes de la degradación del almidón (Gunathunga et al., 2024).

Además, las lipasas son las principales responsables del catabolismo de los diglicéridos y triglicéridos, formando ácidos grasos libres. Durante la germinación, el contenido y la composición de los aminoácidos se modifican, y los granos germinados contienen muchos aminoácidos esenciales debido a la hidrólisis de las proteínas por las proteasas. Los cambios debidos a la actividad enzimática sobre las macromoléculas

aportan energía y otros nutrientes vitales durante la etapa de crecimiento post germinativo de las semillas (Benincasa et al., 2019; Guzmán-Ortiz et al., 2019; Gunathunga et al., 2024).

3. Cambios en compuestos bioactivos durante la germinación

La germinación comienza cuando la semilla seca empieza a absorber agua y se completa cuando el eje embrionario se elonga. En este punto, las reservas dentro de los tejidos de almacenamiento de la semilla se movilizan para apoyar el crecimiento de la plántula (Dekkers et al., 2020). Desde el momento en que la semilla rompe la latencia, surgen respuestas protectoras a través de la síntesis de fenólicos y otros compuestos (Cevallos-Casals et al., 2010).

Generalmente, la germinación produce un leve aumento del contenido total de polifenoles, aunque se observa una contribución diferente de las fracciones libres y ligadas, dependiendo de la especie y las condiciones de brotación (Alvarez-Jubete et al., 2010; Pal et al., 2016). La fracción libre aumenta y la ligada disminuye a medida que avanza la brotación en condiciones controladas (Van Hung et al., 2011).

Los compuestos bioactivos ejercen actividad antioxidante bajo distintos mecanismos, se estima que la principal vía es por la eliminación de radicales libres, mediante la donación de átomos de hidrógeno (Wang et al., 2023). Las plántulas en desarrollo durante la germinación, biosintetizan estos compuestos (fenólicos, flavonoides, etc.) principalmente a través de la vía metabólica del fenilpropano. Se ha reportado que la expresión génica de enzimas como PAL, C4H y 4CL son clave en la síntesis y acumulación de sustancias fenólicas (Vogt, 2010).

La ruta del ácido shikímico es la más importante para originar compuestos fenólicos (Gordo, 2018). La germinación activa la hidrólisis de los principales nutrientes (almidón, proteína, fibra y lípidos) al tiempo que induce la biosíntesis de metabolitos que promueven la salud, como los compuestos fenólicos y el ácido γ -aminobutírico (GABA) (Lemmens, et al., 2019; Ohanenye et al., 2020). Numerosas publicaciones aportan evidencia de que la germinación mejora la calidad nutricional y la bioactividad, y reduce los antinutrientes en comparación con las formas crudas no germinadas de cereales (Gumus et al., 2023; Muñoz-Llandes et al., 2019; Wang et al., 2023).

Los compuestos antioxidantes se utilizan en la industria alimentaria para preservar los alimentos procesados contra la oxidación de lípidos (Piñuel et al., 2019; Vilcacundo et al., 2017).

3.1. Ácidos fenólicos

Los ácidos fenólicos, como un metabolito secundario importante, contiene grupos hidroxilo y carboxílicos fenólicos, y tiene efectos fisiológicos como antioxidantes, anticancerígenos y antibacterianos (Hagos et al., 2023; Van Hung et al., 2011).

La ruta del ácido shikímico es la más importante para originar compuestos fenólicos, e inicia con el acoplamiento

del fosfoenolpiruvato (PEP) y la D-eritrosa-4-fosfato, para obtener el ácido 3-deoxi-D-arabino-heptusolónico-7-fosfato (DAHP). Esta reacción tiene un mecanismo similar a una condensación de Claisen, aunque preferentemente sucede catalizada enzimáticamente (Khan, 2025).

La eliminación de ácido fosfórico del DAHP se lleva a cabo por una oxidación que genera un enol, gracias a la presencia del NAD⁺, y se forma un intermediario que sufre un re arreglo para convertirse en el ácido 3-dehidroquinico, que en presencia del NADH y de la misma enzima que oxida el DAHP, en este caso, reducirá el ácido 3-dehidroquinico a ácido quinico. El ácido shikímico es formado por deshidratación del ácido 3-dehidroquinico, formándose primero el ácido 3-dehidro shikímico, que sufre una reducción en presencia de NADPH (Martín Gordo, 2018).

El efecto de germinación sobre la concentración de ácidos fenólicos ha sido ampliamente estudiado, de acuerdo con lo reportado por Şenlik, (2023), en la cebada germinada durante 4 días, los ácidos fenólicos expresados como miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra (mg GAE/g), aumentaron 27% en comparación con cebada sin germinar.

En el arroz silvestre chino, la concentración de ácidos fenólicos libres, ligados y totales aumentaron significativamente en un 46,60 %, 93,58 % y 57,85 % al final de la germinación, en comparación con las semillas crudas, lo que demuestra que el tipo de fracción también responde de manera diferencial al proceso (Chu et al., 2019).

En el maíz germinado por 4 días, los ácidos fenólicos aumentaron un 80% en comparación con maíz sin germinar (Şenlik, 2023). Kruma et al., (2019) germinó la avena por 2 días y observó un aumento del 165% de ácidos fenólicos mg GAE/g en comparación con la misma semilla sin germinar, lo cual evidencia que, en esta especie, periodos cortos de activación metabólica son suficientes para inducir una acumulación elevada de estos compuestos.

Según lo reportado por Xu et al., (2017), la cebada perlada china germinada aumentó la concentración de ácidos fenólicos un 112,5% en comparación con la misma semilla sin germinar. Las concentraciones de ácidos fenólicos totales en trigo germinado, aumentaron continuamente con la germinación, del día 1 al día 7 (Ahmed et al., 2024). Estos hallazgos confirman que el proceso de germinación favorece en el aumento de ácidos fenólicos en cereales, su efectividad y aumento depende tanto de la especie y cereal como las condiciones de germinación.

3.2. Flavonoides

Los flavonoides son componentes importantes en las plantas. Se ha informado que los flavonoides tienen beneficios para la salud, como actividades antiobesidad, antiinflamatorias, anticardiovasculares, anticancerígenas y antioxidantes (Ah-Reum et al., 2020). La mayor parte de los flavonoides (a excepción de las catequinas) está presente en las plantas y alimentos en forma de β -glucósidos (Estrada-Reyes, et al., 2012). Se encuentran en muchos tejidos vegetales, tanto dentro de las células como en las superficies de diferentes órganos vegetales.

Este grupo de productos naturales puede dividirse en tres clases: los flavonoides (2-fenilbenzopiranos, p. ej.,

kaempferol, apigenina, los isoflavonoides (3-fenilbenzopiranos, p. ej., genisteína, y los neoflavonoides (4-fenilbenzopiranos). Junto con las proantocianidinas, los biflavonoides y triflavonoides constituyen las dos clases principales de fenólicos vegetales complejos C6 - C3 - C6 (Cheynier et al., 2013).

Una vez que son ingeridos y antes de entrar a la circulación general, estos glicósidos pueden sufrir deglicosilación (hidrólisis) de la siguiente forma: debido a que la unión β de estos azúcares resiste la hidrólisis de las enzimas pancreáticas, este proceso se lleva a cabo predominantemente en el lumen intestinal por la acción de dos enzimas: 1. La lactasa-florizina hidrolasa (LPH), que se encuentra en la membrana de los enterocitos (cuando los flavonoides son hidrolizados por esta enzima atraviesan por difusión pasiva la membrana intestinal) y 2. La enzima β -glucosidasa citosólica no específica (CBG), que es capaz de hidrolizar una amplia gama de glicósidos incluyendo glucósidos, galactósidos, xilósidos, arabinósidos y fructósidos (Estrada-Reyes et al., 2012).

Los flavonoides pueden presentar actividad protectora hepática, antiinflamatoria, antialérgica, antibacteriana y antifúngica. Otros muestran efectos inhibidores de enzimas de interés farmacológico o muestran actividad antioxidante de los lípidos con ácidos grasos insaturados a través de su actividad captadora de radicales libres (Al-Khayri et al., 2022; Gómiak et al., 2019; Liao et al., 2024; Hasnat et al., 2024). Otras de las propiedades de los flavonoides pueden ser su capacidad para modificar el sabor y/o gusto de diferentes compuestos y preparados usados en los alimentos (Roland, 2013; Roland, et al., 2014).

Se han demostrado en varios estudios el incremento significativo en los flavonoides durante la germinación de distintos granos de cereales, de acuerdo con lo reportado por García-Castro et al., (2024), en la cebada germinada durante 7 días, expresados como miligramos equivalentes de quercetina por gramo de muestra (mg QE/g), aumentaron 316% en comparación con la cebada sin germinar.

El contenido total de flavonoides en diferentes variedades de trigo germinado aumentó conforme a la duración de la germinación. Después de 72 h de germinación, se observó el nivel más alto de flavonoides totales, que osciló entre 45 % y 235 % (Kaur et al., 2021).

El mijo con diferentes tiempos de germinación de 3 y 5 días incrementó el contenido de flavonoides de 227 % y 418 % mayor, respectivamente en comparación con el mijo sin germinar (Zhang et al., 2024). El contenido total de flavonoides en el arroz pigmentado rojo (*Oryza sativa* L.) aumentó un 21.5 %, pasando de 22,89 $\mu\text{g/g}$ a 27,80 $\mu\text{g/g}$ después de la germinación (Kang et al., 2022).

Según lo reportado por Kim et al., (2013), los germinados de trigo muestran un aumento un 125 % en el contenido de flavonoides en comparación con los niveles previos a la germinación. Los flavonoides son metabolitos significativos en los granos de maíz, y los granos germinados aumentan los ácidos fenólicos libres y unidos, y el contenido de flavonoides unidos en un 169%, 230% y 311%, respectivamente (Gong et al., 2018).

3.3. Tocoferoles

Los tocoferoles representan un grupo de compuestos orgánicos comúnmente conocidos como vitamina E. Estos antioxidantes liposolubles son esenciales para proteger las células y los tejidos contra el daño oxidativo infligido por los radicales libres (Mène-Saffrané et al., 2017; Niu et al., 2022).

El metabolismo del tocoferol en las plantas está regulado de forma intrincada e involucra múltiples procesos. Un aspecto central de esta regulación gira en torno a la biosíntesis del tocoferol, que ocurre principalmente dentro de los plástidos. Los tocoferoles se sintetizan a partir de precursores que surgen de dos vías metabólicas distintas: el ácido homogentísico, que se produce a través de la degradación de aminoácidos aromáticos, y el fitildifosfato, que se deriva de la vía del metileritritol fosfato (Meena et al., 2025; Sadiq et al., 2019;).

Los tocoferoles son un grupo de compuestos que se distinguen por un anillo de cromanol polar que encierra el compuesto fenólico ácido homogentísico (HGA), acompañado de una cadena lateral isoprenoide hidrofóbica. La síntesis de HGA se logra a través de la transformación de 4-hidroxifenilpiruvato (HPP) por la enzima p-hidroxifenilpiruvato dioxigenasa (HPPD). En el reino vegetal, HPP se deriva de la descomposición de la tirosina, un proceso que involucra significativamente a una tirosina aminotransferasa específica (Meena et al., 2025; Riewe et al., 2012).

El metabolismo del tocoferol está vinculado a varias otras vías metabólicas en las plantas. Por ejemplo, la síntesis de carotenoides, que son otra categoría de fitoquímicos, utiliza ciertos intermediarios compartidos con la biosíntesis de tocoferol (Mène-Saffrané et al., 2010; Vidya Muthulakshmi et al., 2023).

Los tocoferoles son uno de los antioxidantes naturales más abundantes, con excelentes propiedades antioxidantes biológicas que protegen las membranas celulares y aumentan la estabilidad en grasas y aceites. El α -T es el isómero con la mayor actividad de vitamina E. Tiene muchas aplicaciones en todo tipo de productos alimenticios (Alberdi-Cedeño et al., 2025).

Diversos estudios han demostrado que el proceso de germinación favorece el incremento de α -Tocoferol en los cereales. En arroz germinado por 1 día, los α -Tocoferol aumentaron un 43% en comparación con el arroz sin germinar según lo reportado por Yamuangmorn y Saenjum, (2024). De forma similar el contenido de α -Tocoferoles aumenta gradualmente a medida que aumenta el tiempo de germinación alcanzando una concentración de 10.92 mg/g en el día 8 de germinación en contraste con el trigo sin germinar obtuvo una concentración de α -Tocoferoles de 4.37 mg/g (Pujara et al., 2023).

Los contenidos de α -tocoferol de trigo fueron 26.99 y 23.77 mg/kg, respectivamente, y estos valores alcanzaron 54.62 y 47.19 mg/kg para sus brotes, respectivamente (Ozturk et al., 2012).

3.4. Carotenoides

Los carotenoides son una clase de compuestos hidrocarbonados de 40 carbonos que se pueden dividir en dos subgrupos: xantofilas y carotenos (Liu et al., 2015). Los

carotenoides son componentes esenciales de las dietas humanas, proporcionando precursores para la biosíntesis de la vitamina A, que es un derivado carotenóide bien conocido con funciones biológicas. Los carotenoides más estudiados son el β -caroteno, el licopeno, la luteína y la zeaxantina (Krinsky & Johnson, 2005), en los últimos años, se han publicado numerosas revisiones que describen los efectos antioxidantes de los carotenoides. Más recientemente, se ha mostrado que los carotenoides dietarios pueden actuar como antioxidantes directos (por ejemplo, por quelación de oxígeno singlete y captura de especies reactivas de oxígeno) y también como moduladores indirectos de la actividad antioxidante endógena mediante activación de vías de señalización como la vía Nrf2 (Terao, 2023; Pérez-Gálvez, et al., 2020; Zhuang et al., 2022).

Los carotenoides participan en una amplia gama de procesos fisiológicos, incluyendo el crecimiento de las plantas (Liu et al., 2015). La biosíntesis de carotenoides depende del suministro de bloques de construcción, isopentenil difosfato (IPP) y su isómero dimetilalil difosfato (DMAPP), en plantas superiores (Sun et al., 2022). Las plantas tienen dos rutas distintas para la biosíntesis de IPP y DMAPP: la vía del ácido mevalónico (MVA) en el citosol y la vía del metileritritol 4-fosfato (MEP) en los plástidos (Lipko et al., 2023; Vranová et al., 2013). Las cadenas de reacción de la biosíntesis de carotenoides ocurren en los plástidos, y la carotenogénesis depende de precursores producidos a través de la vía MEP (Liu et al., 2015).

Los compuestos bioactivos son muy importantes para la salud humana, los carotenoides (β -caroteno, luteína/zeaxantina, licopeno, astaxantina, entre otros) pueden jugar un papel preventivo frente al cáncer, enfermedades cardiovasculares, cataratas y degeneración macular por la edad se basa en pruebas experimentales que sugieren que estos compuestos funcionan como antioxidantes, moduladores de la respuesta inmune, modificadores de procesos inflamatorios y de transducción de señales en y entre células (Carranco Jáuregui et al., 2011).

La concentración combinada de dos carotenoides (luteína y zeaxantina) aumentó significativamente durante la germinación, de 4,08 a 6,65 $\mu\text{g/g}$ en el mijo cola de zorra y de 1,62 a 4,85 $\mu\text{g/g}$ en el mijo poroso rojo después de 72 h de germinación (Maleki et al., 2023). En trigo germinado los carotenoides aumentaron un 91,58% en comparación con el trigo sin germinar (Souto et al., 2025).

El proceso de germinación permitió un aumento de β -caroteno en el trigo, mientras que las maltas de cebada mostraron aumentos o disminuciones limitados, dependiendo de la variedad (Benincasa et al., 2019). La germinación permite un aumento significativo de carotenoides como la luteína, zeaxantina y β -caroteno en distintos cereales.

4. Implicaciones en la salud humana

En la actualidad, diversas patologías se asocian con una alimentación inadecuada, caracterizada por el consumo frecuente de productos con alto contenido de aditivos, conservadores y compuestos potencialmente nocivos para el organismo. Si bien los avances tecnológicos no constituyen la causa directa de los malos hábitos alimenticios, el estilo de vida contemporáneo ha favorecido prácticas que limitan

una nutrición equilibrada. Durante la producción agrícola, es común el uso de plaguicidas y otros agroquímicos que pueden representar un riesgo para la salud humana. Asimismo, la manipulación y exposición de frutas y verduras a contaminantes durante la cadena de distribución compromete su inocuidad, y los tratamientos térmicos aplicados previo al consumo pueden ocasionar una disminución de su valor nutricional (Pérez-Galeano & Zapata Valencia 2015).

Los seres humanos y los seres vivos en general están compuestos de células, que con el tiempo y otros factores (luz solar, problemas de alimentación, etc.) causan efectos secundarios como el estrés oxidativo a causa de la liberación de radicales libres (Apace Davila, 2022).

Los fitoquímicos son moléculas bioactivas características de las plantas y son cruciales para la salud humana al desempeñar una acción pleiotrópica. Los fitoquímicos actúan como antioxidantes o podrían tener un papel en el mantenimiento de la reparación del ADN, el control de la proliferación celular, la diferenciación celular, la apoptosis de las células cancerosas y el metabolismo del ADN (Bartłomiej et al., 2012; Thakur et al., 2020).

Se ha demostrado que la incidencia y la mortalidad de varias enfermedades crónicas no transmisibles, como cánceres, diabetes tipo 2 y enfermedades cardiovasculares, se reducen en personas que consumen granos integrales regularmente (Tierí et al., 2020). En el ambiente gastrointestinal, los polifenoles pueden potencialmente modificar favorablemente el microbioma intestinal (Nignpense, 2021). Permiten igualmente, corregir enfermedades que se desarrollan por la mala alimentación y crean bienestar tanto físico como mental (Souza, 2016).

De esta manera, los efectos positivos de los cereales sobre la salud humana han trascendido más allá del ámbito nutricional, generando un creciente interés en su aprovechamiento dentro de la industria alimentaria.

5. Aplicaciones en la industria alimentaria

La tendencia actual de buscar nuevas alternativas de alimentación y suplementación encaminadas a reducir la utilización de alimentos concentrados, ha conllevado al uso de múltiples fuentes alimenticias, en especial de origen vegetal, por considerarse materias primas de bajo costo y de aceptable valor nutricional (Guerrero & Calderon, 2018). Esta creciente demanda de materias primas vegetales se refleja en la alta producción mundial de cereales. Además, según el Banco Mundial, la producción mundial de cereales para la campaña agrícola de 2021 se estimó en 3.070 millones de toneladas métricas, variando según la cosecha de cereales (Gunathunga et al., 2024).

Durante muchos años, los germinados han atraído el interés de la industria alimentaria por el valor nutricional de sus componentes y sus propiedades biológicas como la actividad antioxidante (Carrillo et al., 2016). Debido a estas propiedades, los cereales germinados se incorporan en múltiples productos alimenticios procesados. Así, el consumo y la demanda de cereales germinados se han convertido en una materia prima clave en muchos productos alimenticios procesados como snacks, productos de panadería y bebidas no lácteas (Gunathunga et al., 2024).

Los compuestos fenólicos con dos grupos hidroxilo en posición orto son excelentes antioxidantes, aunque la

desventaja es su relativa inestabilidad frente a la oxidación a quinonas durante el almacenamiento o el procesamiento de alimentos vegetales (Cheynier et al., 2013). Los compuestos fenólicos se ven afectados durante el procesamiento. Hervir, tostar, hornear y cocinar al vapor son procesos térmicos que parecen estimular la liberación de ciertos compuestos fenólicos libres en varios medios alimenticios (Hwang et al., 2012).

Los alimentos a base de germinados se utilizan comúnmente para mejorar la calidad de diversos productos al suavizar la estructura y aumentar el valor nutricional y la composición bioactiva. Se ha demostrado que la germinación aumenta el valor nutricional de los alimentos mediante la activación de enzimas endógenas implicadas en compuestos bioquímicos y biofuncionales (Islam et al., 2022).

Las harinas de cereales germinados se han utilizado recientemente para fines de panadería, como muffins, pasteles y galletas, con un impacto potencial en el aroma, el colorante y el sentido del gusto (Jribi et al., 2020; Yaqoob et al., 2018). Mohammadi et al. (2021) diseñaron una innovadora bebida simbiótica a base de germinados de sorgo, centeno y alfalfa, y un inóculo de *Lactobacillus casei* y *Lactobacillus plantarum*.

En un estudio de Mridula y Sharma (2015), se produjo una bebida probiótica no láctea (PD) mezclando granos germinados como cebada, mijo y avena, estabilizador, azúcar y *L. acidophilus*.

6. Conclusiones

Los granos germinados representan una gran estrategia para mejorar el contenido y biodisponibilidad de compuestos bioactivos presentes en los cereales aportando un mayor valor nutritivo y funcional para utilizarlos en la elaboración de una gran variedad de alimentos con mayor valor nutricional. Durante el proceso de germinación se encuentra un incremento notable en la concentración de ácidos fenólicos, flavonoides, tocoferoles y carotenoides, sin embargo, esto dependerá de las condiciones de germinación y la variedad de cereales.

Se ha demostrado que el consumo de cereales germinados ayuda a reducir diversas enfermedades crónicas, es por ello que incluirlas en la dieta puede ser una estrategia comprometida para reducir el riesgo a enfermedades. En la actualidad se ha implementado el desarrollo de nuevos productos de panificación como galletas, muffins, barras, incluso snacks, cereales para desayuno, bebidas fermentadas etc. a base de cereales germinados. El proceso de germinación en cereales ofrece oportunidades de innovación para la industria alimentaria, desarrollando productos más saludables y funcionales.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la SECIHTI. Proyecto 7123. Investigadoras e Investigadores por México.

Referencias

- Adom, K. K., Sorrells, M. E., & Liu, R. H. (2005). Phytochemicals and antioxidant activity of milled fractions of different wheat varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(6), 2297-2306. <https://doi.org/10.1021/jf048456d>
- Ahmed, I. A., AlJuhaime, F. Y., Özcan, M. M., Uslu, N., & Karrar, E. (2024). The role of germination in changes in bioactive properties, polyphenols, and biogenic elements of raw and germinated barley (*Hordeum vulgare*) parts. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(2), 1044-1053. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16970>
- Ah-Reum, H., Min Jeong, H., Bomi, N., Bo-Ram, K., Hyeon Hwa, P., Inwoo, B., ... Jin-Baek, K. (2020). Comparison of Flavonoid Profiles in Sprouts of Radiation Breeding Wheat Lines (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy*, 10(10), 1489. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101489>
- Alberdi-Cedeño, J., Martínez-Yusta, A., Ruiz-Aracama, A., Goicoechea-Oses, E., & Nieva-Echevarría, B. (2025). Different effects of tocopherol natural extract on sunflower oil stability under frying and accelerated storage conditions: A comprehensive study on the fate of major and minor components of oil, and added tocopherols. *Food Chemistry*, 407, 142871. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.142871>
- Al-Khayri, J. M., Sahana, G. R., Nagella, P., Joseph, B. V., Alessa, F. M., & Al-Mssalleh, M. Q. (2022). Flavonoids as potential anti-inflammatory molecules: A review. *Molecules*, 27(9), 2901. <https://doi.org/10.3390/molecules27092901>
- Alvarez-Jubete, L., Wijngaard, H., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2010). Polyphenol composition and in vitro antioxidant activity of amaranth, quinoa, buckwheat and wheat as affected by sprouting and baking. *Food Chemistry*, 119(2), 770-778. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.032>
- Apace Davila, B. (2022). Efecto del germinado en la capacidad antioxidante y compuestos fenólicos del grano del maíz morado (*Zeamays* L.) Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Huancavelica. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Huancavelica. <https://hdl.handle.net/20.500.14597/5377>
- Bartłomiej, S., Justyna, R. K., & Ewa, N. (2012). Bioactive compounds in cereal grains—occurrence, structure, technological significance and nutritional benefits—a review. *Food science and technology international*, 18(6), 559-568. <https://doi.org/10.1177/1082013211433079>
- Becerril, M. F. Z. (2018). Evaluación de compuestos fenólicos y actividad antioxidante durante la germinación en diferentes variedades de cebada. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/4082>
- Benincasa, P., Falcinelli, B., Luttis, S., Stagnari, F., & Galieni, A. (2019). Sprouted grains: A comprehensive review. *Nutrients*, 11(2), 421. <https://doi.org/10.3390/nu11020421>
- Carranco Jáuregui, M. E., Calvo Carrillo, M. de la C., & Pérez-Gil Romo, F. (2011). Carotenoides y su función antioxidante: Revisión. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 61(3), 233-241.
- Carrillo, W., Gómez-Ruiz, J. A., Miralles, B., & Recio, I. (2016). Identification of antioxidant peptides of hen egg-white lysozyme and evaluation of inhibition of lipid peroxidation and cytotoxicity in the zebrafish model. *European Food Research and Technology*, 242, 1777-1785. <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2677-1>
- Cevallos-Casals, B. A., & Cisneros-Zevallos, L. (2010). Impact of germination on phenolic content and antioxidant activity of 13 edible seed species. *Food Chemistry*, 119(4), 1485-1490. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.030>
- Charley, H. (2012). Tecnología de Alimentos: Procesos Químicos y Físicos en la Preparación de Alimentos. México D.F, México: Editorial Limusa.
- Cheynier, V., Teissedre, P. L., & Terrier, N. (2013). Plant phenolics: Recent advances on their biosynthesis, genetics and ecophysiology. *Plant Physiology and Biochemistry*, 70, 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.05.009>
- Chu, C., Du, Y., Yu, X., Shi, J., Yuan, X., Liu, X., ... & Yan, N. (2019). Dynamics of antioxidant activities, metabolites, phenolic acids, flavonoids, and phenolic biosynthetic genes in germinating Chinese wild rice (*Zizania latifolia*). *Food Chemistry*, 318, 126483. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126483>
- Dekkers, M. C. M., Pearce, S. R., & Gillmor, J. B. (2020). An Updated Overview on the Regulation of Seed Germination. *Plants*, 9(6), 703. <https://doi.org/10.3390/plants9060703>
- Elkhalifa, A. E. O., & Bernhardt, R. (2010). Influence of grain germination on functional properties of sorghum flour. *Food Chemistry*, 121(2), 387-392. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.04>

- Estrada-Reyes, R., Ubaldo-Suárez, D., & Araujo-Escalona, A. G. (2012). Los flavonoides y el sistema nervioso central. *Salud mental*, 35(5), 375-384.
- Fărcaș, A. C., Socaci, S. A., Nemeș, S. A., Pop, O. L., Coldea, T. E., Fogarasi, M., & Biriș-Dorhoi, E. S. (2022). An Update Regarding the Bioactive Compound of Cereal By-Products: Health Benefits and Potential Applications. *Nutrients*, 14(17), 3470. <https://doi.org/10.3390/nu14173470>
- García-Castro, A., Ortiz, F. A. G., Hernández, G. H., & Román-Gutiérrez, A. D. (2024). Analysis of bioactive compounds in lyophilized aqueous extracts of barley sprouts. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18, 5327–5338. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02569-9>
- Garzón-Salazar, C., Martín-Domínguez, I., & Caballero-Briones, F. (2020). Sprouted oat: a review on the relationship between processing conditions and chemico-physical properties of flour. *Foods*, 9(2), 169. <https://doi.org/10.3390/foods9020169>
- Gong, K., Chen, L., Li, X., Sun, L., & Liu, K. (2018). Effects of germination combined with extrusion on the nutritional composition, functional properties and polyphenol profile and related *in vitro* hypoglycemic effect of whole grain corn. *Journal of Cereal Science*, 83, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.07.002>
- Gordo, D. A. M. (2018). Los compuestos fenólicos: un acercamiento a su biosíntesis, síntesis y actividad biológica. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(1), 4. <https://doi.org/10.22490/21456453.1968>
- Górniak, I., Bartoszewski, R., & Króliczewski, J. (2019). Comprehensive review of antimicrobial activities of plant flavonoids. *Phytochemistry Reviews*, 18, 241–272. <https://doi.org/10.1007/s11101-018-9591-z>
- Goufo, P., & Trindade, H. (2014). Rice antioxidants: phenolic acids, flavonoids, anthocyanins, proanthocyanidins, tocopherols, tocotrienols, γ -oryzanol, and phytic acid. *Food Science & Nutrition*, 2, 75–104. <https://doi.org/10.1002/fsn3.86>
- Guerrero, L., & Calderon, D. (2018). Valoración nutricional y productiva de diferentes granos de cereales germinados Tesis de Licenciatura. Universidad de Nariño. <https://sired.udenar.edu.co/8296/1/92599.pdf>
- Gumus, Z. P., Moulahoum, H., Tok, K., Kocadag Kocazorbaz, E., & Zihnioğlu, F. (2023). Activity-guided purification and identification of endogenous bioactive peptides from barley sprouts (*Hordeum vulgare* L.) with diabetes treatment potential. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(6), 3285–3292. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16172>
- Gunathunga, C., Senanayake, S., Jayasinghe, M. A., Brennan, C. S., Truong, T., Marapana, U., & Chandrapala, J. (2024). Germination effects on nutritional quality: A comprehensive review of selected cereal and pulse changes. *Journal of Food Composition and Analysis*, 128, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106024>
- Guzmán-Ortiz, F. A., Castro-Rosas, J., Gómez-Aldapa, C. A., Mora-Escobedo, R., Rojas-León, A., Rodríguez-Marín, M. L., ... Román-Gutiérrez, A. D. (2019). Enzyme activity during germination of different cereals: A review. *Food Reviews International*, 35(3), 177–200. <https://doi.org/10.1080/87559129.2018.1514623>
- Hagos, M., Singh Chandravanshi, B., Redi-Abshiro, M., & Ele Yaya, E. (2023). Determination of total phenolic, total flavonoid, ascorbic acid contents and antioxidant activity of pumpkin flesh, peel and seeds. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 37(5), 1093–1108. <https://doi.org/10.4314/bcse.v37i5.3>
- Hao, Y., Hong, Y., Guo, H., (2022). Hao, Y., Hong, Y., Guo, H., Qin, P., Huang, A., Yang, X., & Ren, G. (2022). Transcriptomic and metabolomic landscape of quinoa during seed germination. *BMC Plant Biology*, 22(1), 237. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03621-w>
- Hasnat, H., Shompa, S. A., Islam, M. M., Alam, S., Richi, F. T., Emon, N. U., ... & Ahmed, F. (2024). Flavonoids: A treasure house of prospective pharmacological potentials. *Heliyon*, 10(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25643>
- Hijkema, M., Nijse, J., Hilhorst, H., & Groot, S. P. C. (2011). First off the mark: Early seed germination. *Journal of Experimental Botany*, 62(10), 3289–3309. <https://doi.org/10.1093/jxb/err030>
- Hwang, I. G., Shin, Y. J., Lee, S., Lee, J., & Yoo, S. M. (2012). Effects of different cooking methods on the antioxidant properties of red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Preventive Nutrition and Food Science*, 17(4), 286–292. <https://doi.org/10.3746/pnf.2012.17.4.286>
- Islam, M. Z., Shim, M. J., Jeong, S. Y., & Lee, Y. T. (2022). Effects of soaking and sprouting on bioactive compounds of black and red pigmented rice cultivars. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(1), 201–209. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15105>
- Jittanit, W., Chaiwut, P., & Srisawat, N. (2010). Drying temperature affects rice seed vigor via gibberellin, abscisic acid, and antioxidant enzymes. *Journal of Stored Products Research*, 46(4), 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2010.04.003>
- Jribi, S., Sahagún, M., Belorio, M., Debbabi, H., & Gomez, M. (2020). Effect of sprouting time on dough and cookies properties. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14, 1595–1600.
- Kang, S. J., Jeong, S. Y., Islam, M. Z., Shin, B. K., Park, Y. J., Kim, J. K., ... & Lee, J. H. (2022). Bioactive compounds and quality evaluation of red-pigmented rice processed by germination and roasting. *Foods*, 11(18), 2735. <https://doi.org/10.3390/foods11182735>
- Kang, S. J., Lee, J. H., & Kim, Y. S. (2022). Bioactive compounds and quality evaluation of red-pigmented rice during germination. *Food Science & Nutrition*, 10(6), 2001–2010. <https://doi.org/10.3390/foods11182735>
- Kaur, H., & Gill, B. S. (2021). Changes in physicochemical, nutritional characteristics and ATR-FTIR molecular interactions of cereal grains during germination. *Journal of Food Science and Technology*, 58(6), 2313–2324. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04742-6>
- Khan, S. (2025). Multi-Enzyme Synergy and Allosteric Regulation in the Shikimate Pathway: Biocatalytic Platforms for Industrial Applications. *Catalysts*, 15(8), 718. <https://doi.org/10.3390/catal15080718>
- Kim, H. Y., Lee, S. H., Hwang, I. G., Woo, K. S., Kim, K. J., Lee, M. J., Kim, D. J., Kim, T. J., & Lee, J. (2013). Antioxidant and antiproliferation activities of winter cereal crops before and after germination. *Food Science and Biotechnology*, 22, 181–186. <https://doi.org/10.1007/s10068-013-0025-9>
- Krinsky, N. I., & Johnson, E. J. (2005). Carotenoid actions and their relation to health and disease. *Molecular Aspects of Medicine*, 26(6), 459–516. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2005.10.001>
- Kropff, M., & Morell, M. (2019). The cereals imperative of future food systems – cereals provide around 42% of the total protein in developing countries. *International Rice Research Institute*. <https://www.irri.org/news-and-events/news/cereals-imperative-future-food-systems>
- Kruma, Z., Kince, T., Galoburda, R., Tomsone, L., Straumite, E., Sabovics, M., Sturite, L., & Kronberga, A. (2019). Influence of germination temperature and time on phenolic content and antioxidant properties of cereals. *Baltic Conference on Food Science and Technology 1*, 103–108. <https://doi.org/10.22616/FoodBalt.2019.002>
- Ktenioudaki, A., Alvarez-Jubete, L., & Gallagher, E. (2015). A review of the process-induced changes in the phytochemical content of cereal grains: The breadmaking process. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(5), 611–619. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.667848>
- Lemmens, E., Moroni, A. V., Pagand, J., Heirbaut, P., Ritala, A., Karlen, Y., & Delcour, J. A. (2019). Impact of cereal seed sprouting on its nutritional and technological properties: A critical review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 18(1), 305–328.
- Liao, Y., et al. (2024). Flavonoids in natural products for the therapy of liver diseases. *Frontiers in Pharmacology*. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1485065>
- Lipko, A., Pączkowski, C., Perez-Fons, L., Fraser, P. D., Kania, M., Hoffman-Sommer, M., Danikiewicz, W., Rohmer, M., Poznański, J., & Swieżewska, E. (2023). Divergent contribution of the MVA and MEP pathways to the formation of polyphenols and dolichols in *Arabidopsis thaliana*. *The Biochemical Journal*, 480(8), 495–520. <https://doi.org/10.1042/BCJ20220578>
- Liu, L., Shao, Z., Zhang, M., & Wang, Q. (2015). Regulation of carotenoid metabolism in tomato. *Molecular Plant*, 8(1), 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2014.11.006>
- Liu, R., Lu, J., Xing, J., Li, X., & Zhang, Y. (2021). Transcriptome and metabolome analyses revealing the potential mechanism of seed germination in *Polygonatum cyrtoneura*. *Scientific Reports*, 11, 12161. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91598-1>
- Lutts, S., Benincasa, P., Wojtyła, L., Kubala, S., Pace, R., Lechowska, K., Quinet, M., & Garnczarska, M. (2016). Seed Priming: New Comprehensive Approaches for an Old Empirical Technique. InTech Publishers. DOI: 10.5772/64420.
- Martín Gordo, D. A. (2018). Los compuestos fenólicos, un acercamiento a su biosíntesis, síntesis y actividad biológica. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(1), 81–104. <https://doi.org/10.22490/21456453.1968>
- Meena, V. K., Chand, S., Shekhawat, S. (2025). Advances in plant tocopherol biosynthesis: from pathway elucidation to crop biofortification strategies. *Discov. Plants* 2, 9. <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00093-8>
- Mène-Saffrané, L., & DellaPenna, D. (2010). Biosynthesis, regulation and functions of tocopherols in plants. *Plant Physiology and*

- Biochemistry*, 48(5), 301–309. <https://doi.org/10.1016/j.jplaphy.2009.11.004>
- Mène-Saffrané, L., & Pellaud, S. (2017). Current strategies for vitamin E biofortification of crops. *Current Opinion in Biotechnology*, 44, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.01.007>
- Misra, B. B., Mishra, A., & Mohapatra, S. (2012). The flavonoid biosynthesis network in plants. *Frontiers in Plant Science*, 3, 222. <https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00222>
- Mohammadi, M., Nouri, L., & Mortazavian, A. M. (2021). Development of a functional synbiotic beverage fortified with different cereal sprouts and prebiotics. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 1–9.
- Mridula, D., & Sharma, M. (2015). Development of non-dairy probiotic drink utilizing sprouted cereals, legume and soymilk. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1), 482–487. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.07.011>
- Muñoz-Llandes, C., Guzmán-Ortiz, F., & Román-Gutiérrez, A. (2019). Effect of germination on antinutritional compounds of grains and seeds. *Types Process Effects*, 83–99.
- Nignpense, B. E., Francis, N., Blanchard, C., & Santhakumar, A. B. (2021). Bioaccessibility and Bioactivity of Cereal Polyphenols: A Review. *Foods*, 10, 1595. <https://doi.org/10.3390/foods10071595>
- Niu, Y., Zhang, Q., Wang, J., Li, Y., Wang, X., & Bao, Y. (2022). Vitamin E synthesis and response in plants. *Frontiers in plant science*, 13, 994058. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.994058>
- Ohanenye, I. C., Tsopmo, A., Ejike, C. E., & Udenigwe, C. C. (2020). Germination as a bioprocess for enhancing the quality and nutritional prospects of legume proteins. *Trends in Food Science & Technology*, 101, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.003>
- Ozturk, I., Sagdic, O., Hayta, M., & Yetim, H. (2012). Alteration in D-tocopherol, some minerals, and fatty acid contents of wheat through sprouting. *Chemistry of Natural Compounds*, 47(6), 770–772. <https://doi.org/10.1007/s10600-012-0092-9>
- Pal, P., Singh, N., Kaur, P., Kaur, A., Virdi, A. S., & Parmar, N. (2016). Comparison of composition, protein, pasting, and phenolic compounds of brown rice and germinated brown rice from different cultivars. *Cereal Chemistry*, 93(6), 584–592. <https://doi.org/10.1094/CHEM-03-16-0066-R>
- Pérez-Galeano, A., & Zapata Valencia, S. (2015). Evaluación del comportamiento comercial de los germinados y brotes tiernos en la ciudad de Medellín: posibles alternativas de comercialización (Tesis Doctoral, Corporación Universitaria Lasallista). <https://repository.unilasallista.edu.co/items/4695d8ee-8a82-46f2-8165-de5320e1155d>
- Pérez-Gálvez, A., Viera, I., & Roca, M. (2020). Carotenoids and chlorophylls as antioxidants. *Antioxidants*, 9(6), 505. <https://doi.org/10.3390/antiox9060505>
- Perri, G., Calabrese, F. M., Rizzello, C. G., De Angelis, M., Gobbetti, M., & Calasso, M. (2020). Sprouting process affects the lactic acid bacteria and yeasts of cereal, pseudocereal and legume flours. *LWT – Food Science and Technology*, 126, Article 109314. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109314>
- Piñuel, L., Vilcacundo, E., Boeri, P., Barrio, D. A., Morales, D., Pinto, A., Morán, R., Samaniego, I., & Carrillo, W. (2019). Extraction of protein concentrate from red bean (*Phaseolus vulgaris* L.): Antioxidant activity and inhibition of lipid peroxidation. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 9(9), 45–58. <http://dx.doi.org/10.7324/JAPS.2019.90804>
- Pujara, A., Chattopadhyay, P., & Ray, R. (2023). Germination affected vitamin E composition of chia: Changes in tocopherol isomers during sprouting. *Food Chemistry*, 405, 134880. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.134880>
- Riewe, D., Koohi, M., Lise, J., Pfeiffer, M., Lippmann, R., Schmeichel, J., ... & Altmann, T. (2012). A tyrosine aminotransferase involved in tocopherol synthesis in Arabidopsis. *The Plant Journal*, 71(5), 850–859. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2012.05035.x>
- Roland, W. S. U., van Buren, R. J., Gouka, R. J., Gruppen, H., Driesse, M., & Smit, G. (2013). Bitter taste receptor activation by flavonoids and isoflavonoids: Modeled structural requirements for activation of hTAS2R14 and hTAS2R39. *Food Chemistry*, 141(2), 1870–1879. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.04.083>
- Roland, W. S. U., van Buren, R. J., Gruppen, H., Driesse, M., Smit, G., & Vincken, J.-P. (2014). 6-Methoxyflavanones as bitter taste receptor blockers for hTAS2R39. *PLoS ONE*, 9(4), e94451. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094451>
- Sadiq, M., Akram, N. A., Ashraf, M., Al-Qura'iny, F., & Ahmad, P. (2019). Alpha-tocopherol-induced regulation of growth and metabolism in plants under non-stress and stress conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(4), 1325–1340. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-09936-7>
- Sánchez-López, N., García-Méndez, L., & Torres-Martínez, S. (2023). Imbibition and germination of seeds with economic and ecological interest: Physical and biochemical factors involved. *Sustainability*, 15(6), 5394. <https://doi.org/10.3390/su15065394>
- Şenlik, A. S., & Alkan, D. (2023). Improving the nutritional quality of cereals and legumes by germination. *Czech Journal of Food Sciences*, 41(5), 348–357. <https://doi.org/10.17221/44/2023-CJFS>
- Serpen, A., Capuano, E., Fogliano, V., & Gökmen, V. (2007). A new procedure to measure the antioxidant activity of insoluble food components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(19), 7676–7681. <https://doi.org/10.1021/jf071291z>
- Shewry, P. R., & Heffernon, K. L. (2020). Grains – a major source of sustainable protein for health. *Nutrition Reviews*, 80(6), 1648–1661. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuab084>
- Souto, R. N. M., Pinho, J. da S., Peixe, C. L. D., Trindade, M. E. F., Souza, P. G., Silva, P. E., Teixeira-Costa, B. E., Castelo-Branco, V. N., & Teodoro, A. J. (2025). Buriti (*Mauritia flexuosa* L.f.) and Acuri (*Attalea phalerata* Mart. ex Spreng) oils as functional lipid sources in bakery products: Bioactive composition, sensory evaluation, and technological performance. *Foods*, 14(17), 3089. <https://doi.org/10.3390/foods14173089>
- Souza, R. A. (2016). Efeitos dos polifenóis na microbiota intestinal e na saúde metabólica. *Revista Brasileira de Nutrição*, 28(3), 45–58.
- Sun, T., Xu, Z., Zhang, S., & Zhang, Y. (2022). Plant carotenoids: recent advances and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 13, 10515021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.10515021>
- Terao, J. (2023). Revisiting carotenoids as dietary antioxidants for human health and disease prevention. *Food & Function*, 14(17), 7799–7824. <https://doi.org/10.1039/D3FO02330C>
- Thakur, M., Singh, K., & Khedkar, R. (2020). Phytochemicals: Extraction process, safety assessment, toxicological evaluations, and regulatory issues. In *Functional and preservative properties of phytochemicals* (pp. 341–361). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818593-3.00011-7>
- Tieri, M., Ghelfi, F., Vitale, M., Vetrani, C., Marventano, S., Lafranconi, A., ... & Grosso, G. (2020). Whole grain consumption and human health: an umbrella review of observational studies. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 71(6), 668–677. <https://doi.org/10.1080/09637486.2020.1715354>
- Van Hung, P., Hatcher, D. W., & Barker, W. (2011). Phenolic acid composition of sprouted wheats by ultra-performance liquid chromatography (UPLC) and their antioxidant activities. *Food Chemistry*, 126(4), 1896–1901. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.015>
- Van Hung, P., Hatcher, D. W., & Barker, W. (2011). Phenolic acid composition of sprouted wheats by ultra-performance liquid chromatography (UPLC) and their antioxidant activities. *Food Chemistry*, 126(4), 1896–1901. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.015>
- VidyaMuthulakshmi, M., Srinivasan, A., Srivastava, S. (2023). Antioxidant green factories: toward sustainable production of vitamin E in plant *in vitro* cultures. *ACS Omega*, 8(4), 3586–3605. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05819>
- Vilcacundo, R., & Hernández-Ledesma, B. (2017). Nutritional and biological value of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Current Opinion in Food Science*, 14, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2016.11.007>
- Vogt, T. (2010). Phenylpropanoid biosynthesis. *Molecular plant*, 3(1), 2–20.
- Vranová, E., Coman, D., & Gruişsem, W. (2013). Network analysis of the MVA and MEP pathways for isoprenoid synthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 64, 665–700. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120116>
- Wang, R., Li, M., Brennan, M. A., Dhital, S., Kulasiri, D., Brennan, C. S., & Guo, B. (2023). Complexation of starch and phenolic compounds during food processing and impacts on the release of phenolic compounds. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(4), 3185–3211. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13180>
- Weerakoon, W. M. W., Maruyama, A., & Ohba, K. (2008). Impact of humidity on temperature-induced grain sterility in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194(2), 135–140. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00293.x>
- Xu, L., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2017). Changes of the phenolic compounds and antioxidant activities in germinated adlay seeds. *Food Research International*, 100, 1–7. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8298>
- Yamuangmorn, S., & Saenjum, C. (2024). Germination alters the bioactive compounds of pigmented and non-pigmented rice varieties in fresh and year-old stored seeds. *Food Chemistry: X*, 24, 102005. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102005>

- Yaqoob, S., Baba, W. N., Masoodi, F. A., Shafi, M., & Bazaz, R. (2018). Effect of sprouting on cake quality from wheat–barley flour blends. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12, 1253–1265. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9739-y>
- Yu, J., Gao, Y., Wang, Y., Zhu, J., & Zhang, W. (2020). Seed germination commences with the uptake of water by the dry seed (imbibition), and is completed when the radicle extends to penetrate the structures that surround it. *BMC Plant Biology*, 20(274). <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02483-4>
- Zhang, J., Yang, J., & Yin, Y. (2024). Germination promotes flavonoid accumulation of finger millet (*Eleusine coracana* L.): Response surface optimization and investigation of accumulation mechanism. *Plants*, 13(16), 2191. <https://doi.org/10.3390/plants13162191>
- Zhao, J., Li, L., Zhao, C., & Wang, Y. (2017). Phenolic compounds and their biosynthesis in germinated seeds. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(3), 489–509. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12260>
- Zhuang, C., Yuan, J., Du, Y., Zeng, J., Sun, Y., Wu, Y., Gao, X.-H., & Chen, H.-D. (2022). Effects of oral carotenoids on oxidative stress: A systematic review and meta-analysis of studies in the recent 20 years. *Frontiers in Nutrition*, 9, 754707. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.754707>