



**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
CIENCIAS AGROAMBIENTALES Y AGROALIMENTARIAS**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**GRANOS ANCESTRALES COMO FUENTE
SOSTENIBLE DE ALIMENTOS**
Ancient grains as a sustainable food source.

M^a CRISTINA ESCUDERO ALMARAZ

TUTORA: ÁNGELES FARRÁN MORALES

FEBRERO, 2024

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL TRABAJO FIN DE MASTER

Fecha: 28/1/2024.

Quién suscribe:

Autor(a): MARÍA CRISTINA ESCUDERO ALMARAZ

Hace constar que es la autor(a) del trabajo:

Título completo del trabajo.

GRANOS ANCESTRALES COMO FUENTE SOSTENIBLE DE ALIMENTOS *Ancient grains as a sustainable food source*

En tal sentido, manifiesto la originalidad de la conceptualización del trabajo, interpretación de datos y la elaboración de las conclusiones, dejando establecido que aquellos aportes intelectuales de otros autores, se han referenciado debidamente en el texto de dicho trabajo.

DECLARACIÓN:

- ✓ Garantizo que el trabajo que remito es un documento original y no ha sido publicado, total ni parcialmente por otros autores, en soporte papel ni en formato digital.
- ✓ Certifico que he contribuido directamente al contenido intelectual de este manuscrito, a la génesis y análisis de sus datos, por lo cual estoy en condiciones de hacerme públicamente responsable de él.
- ✓ No he incurrido en fraude científico, plagio o vicios de autoría; en caso contrario, aceptaré las medidas disciplinarias sancionadoras que correspondan.

Fdo. M Cristina Escudero Almaraz

Índice

| | |
|---|----|
| Listado de abreviaturas..... | 6 |
| Resumen..... | 8 |
| 1. Introducción..... | 9 |
| 1.1 Objetivos..... | 10 |
| 2. Características de los granos ancestrales..... | 11 |
| 2.1 Clasificación de los granos ancestrales..... | 11 |
| 2.2 Estructura de los granos..... | 12 |
| 2.3 Composición de los granos ancestrales..... | 13 |
| 2.4 Características de los trigos antiguos..... | 16 |
| 2.5 Características de los pseudocereales..... | 18 |
| 2.6 Otros granos ancestrales..... | 25 |
| 3. Composición fenólica..... | 28 |
| 3.1 Contenido fenólico en trigos antiguos..... | 30 |
| 3.2 Contenido fenólico en pseudocereales..... | 32 |
| 4. Consideraciones genéticas..... | 38 |
| 4.1 Genética de los trigos antiguos..... | 38 |
| 4.2 Genética de los pseudocereales..... | 41 |
| 5. Conclusiones..... | 45 |
| 6. Bibliografía..... | 48 |

Listado de abreviaturas

4-OHBA: Ácido Hidroxibenzoico

A.C.: Antes de Cristo.

Al: Aluminio

BOSTED: Panel de ciencia y tecnología para el desarrollo internacional en la Academia nacional de EEUU de ciencias.

CA: Ácido cafeico

Cu: Cobre

Fe: Hierro

FeALS3: Gen sensible al aluminio 3 en *F. esculentum*

HEALTHGRAIN: “*Exploiting Bioactivity of European Cereal Grains for Improved Nutrition and Health Benefits*” un proyecto integrado de la Unión Europea dentro del sexto programa enmarcado en la Calidad y seguridad alimentaria.

HPLC-UV: Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia con detector Ultravioleta

LCHb: Light-Harvesting Chl a/b-binding

MALONYL CoA: Malonyl Coenzima A

Mo: Molibdeno

Mn: Manganeso

Ni: Níquel

p-CA: Ácido p-cumárico

RubisCO: Ribulosa-1,5-Bisfosfato Carboxilasa/Oxigenasa

SCFA: Ácidos Grasos de Cadena Corta

SRA: Ácido Siríngico

SUBSP: Subespecie

trans-FA: Ácido trans-Ferúlico

TROLOX: Ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico

VA: Ácido Vainillínico

Zn: Zinc

Resumen

El reto actual de la industria alimentaria y la agricultura es conseguir aumentar la producción de alimentos de cara al incremento de población en los años venideros, pero de una manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente, teniendo en cuenta la problemática que supone el cambio climático en el mismo. Frente a la masificación de los cultivos de ciertos cereales como el trigo, el maíz o el arroz, está la recuperación y potenciación de los granos ancestrales como una alternativa a explorar. Estos granos se caracterizan por mantener propiedades de sus ancestros antiguos, debido a que no han sido modificados o seleccionados genéticamente para su producción intensiva. Tienen un valor nutricional mayor que los cereales modernos en cuanto a composición protéica y fenólica. Además, son capaces de tolerar diferentes tipos de estrés abiótico y por ello, son fuentes de genes involucrados en la resiliencia.

ABSTRACT

The current challenge for the food industry and agriculture is to increase food production for the population growth in the next years, but in a sustainable and environmentally friendly way, taking into account the problems posed by climate change. An alternative to the massive cultivation of certain cereals such as wheat, corn or rice, is the recovery and enhancement of ancestral grains. These grains are characterized by maintaining properties of their ancient ancestors, because they have not been genetically modified or selected for intensive production. They have a higher nutritional value than modern cereals in terms of protein and phenolic composition. In addition, they are capable to cope with different types of abiotic stress and therefore, they are sources of genes involved in resilience.

1. Introducción

En la actualidad, se conocen unas 30.000 especies de plantas comestibles, pero solo 30 de ellas son las que alimentan a la población mundial. Además, solo 5 cereales (arroz (*Oryza sativa*), trigo (*Triticum aestivum ssp. aestivum*), maíz (*Zea mays*), mijo (*Pennisetum glaucum*, *Setaria italica*, *Panicum miliaceum*, *Eleusine coracana*), y sorgo (*Sorghum bicolor*)) proporcionan el 60% de la energía metabólica en forma de carbohidratos consumida por la población (LONGIN & WÜRSCHUM, 2016).

Para hacer frente a la bajada continuada de los precios que se pagaban por los cultivos mayoritarios y amortizar las inversiones realizadas, en los años 50 y 60 surgió la denominada Revolución verde, durante la cual, los esfuerzos en la tecnificación de la agricultura se centraron en la selección de variedades de alto rendimiento, resistentes a enfermedades, etc. Muchos granos que se utilizaban hasta entonces fueron quedando en desuso por su bajo rendimiento. Por ejemplo, algunos trigos antiguos crecían con altura excesiva, siendo por tanto más susceptibles al encamado, proceso por el cual la espiga pierde la verticalidad, pudiendo culminar en plantas dobladas, tumbadas en el suelo e incluso con tallos rotos. Esta situación genera dificultades en la cosecha y bajos rendimientos (BOUKID, F. et al, 2018). Por ello, en el caso del trigo, se hicieron mayoritarios los cultivos de las variedades *aestivum* (también llamado trigo común o harinero y utilizado en panificación) y *durum* (también conocido como candeal y utilizado para producción de pasta). Además, se llevaron a cabo sobre ellos mejoras genéticas para insensibilizar a la planta al fotoperiodo, evitar ciertas enfermedades como la roya, reducción en altura, etc.

La Revolución verde trajo consigo una masificación de cultivos intensivos y de variedades seleccionadas, disminuyendo la biodiversidad de los ecosistemas (AMEEN & RAZA, 2018). La agricultura intensiva agota los campos, ya que si cada año se repite el mismo cultivo, el suelo va perdiendo nutrientes y capacidad de recuperación natural de recursos como materia orgánica o microelementos. Si bien se pueden añadir en forma de preparados sintéticos, las necesidades del suelo para llegar a los mismos rendimientos cada vez serán más elevadas. Asimismo, el uso de maquinaria pesada sobre estas áreas provoca la compactación del suelo, aumentando su densidad y empeorando su estructura, de manera que la arquitectura radicular del cultivo será menos favorable. Además, los consumidores hoy en día buscan productos realizados mediante buenas prácticas agrícolas, el menor uso posible de aditivos y productos de síntesis y bajo contenido en residuos de estos contaminantes, pero manteniendo la calidad del alimento. Para ello, los granos ancestrales pueden tomar partida en este cambio de paradigma.

Los granos ancestrales son aquellos que no han sufrido selecciones genéticas y contienen características de sus antecesores salvajes. En el caso del trigo, hay variedades antiguas que cayeron en desuso como son el trigo emmer, einkorn, kamut y espelta. Por otra parte, también hay pseudocereales considerados granos ancestrales, como la quinoa, el amaranto y el alforfón. Actualmente estos cultivos son prácticamente marginales si se comparan con los de los 5 cereales mayoritarios. Es por ello que no ha habido un desarrollo científico y modificaciones de este tipo de granos con el objetivo de aumentar rendimientos y mantener características originales. Parte de la popularidad reciente de este tipo de alimento también es debida a sus propiedades nutricionales y composición, así como sus interesantes características organolépticas. Los granos ancestrales tienen un balance adecuado de micronutrientes y en general, alto contenido en proteínas. También destacan por su contenido en polifenoles.

Los polifenoles derivados de plantas son fitoquímicos beneficiosos para la salud y con la misión de regular las barreras intestinales, evitando la inflamación y enfermedades relacionadas. Según los resultados del estudio HEALTHGRAIN (*Exploiting Bioactivity of European Cereal Grains for Improved Nutrition and Health Benefits, an Integrated Project of the European Union's Sixth Framework Programme's "Food Quality and Safety" activity*), se demostró que el contenido en compuestos fenólicos

era generalmente alto en las especies de trigos antiguos einkorn, emmer y espelta, y mayor que en las variedades actuales. El contenido total de polifenoles y flavonoides también fue mayor en las harinas del trigo Kamut y del Khorasan frente a las actuales. Combinar por tanto variedades antiguas y modernas conseguirá mejoras en las dietas destinadas a población con enfermedades crónicas e intestinales (TRUZZI, et al, 2019).

Los trigos antiguos se pueden utilizar tanto en elaboraciones tradicionales como en nuevas recetas. Pequeños molinos tradicionales y familiares así como obradores de panificación se han visto impulsados al trabajo con este tipo de granos para diferenciarse del resto del mercado y poder realizar un producto de calidad a un precio justo y por el cual el consumidor está dispuesto a pagar. Si se descascarillan las especies einkorn, emmer y espelta, se pueden utilizar como granos integrales en ensaladas o sopas. Industrialmente, einkorn y emmer se utilizan principalmente para fabricar pasta o snacks y la espelta para panificación. Los pseudocereales, por su parte, son semillas sin gluten, perfectas para compensar las deficiencias de la dieta de la población celiaca, ya que habitualmente los productos que encuentran en el mercado están formulados en base a harinas refinadas o almidones de maíz o arroz, caracterizados por bajos contenidos de proteína, fibra, calcio y hierro (BOUKID, F. et al, 2018).

Estructuralmente, también presentan diferencias con las variedades modernas, ya que éstas se han seleccionado para evitar ciertos problemas que hacían reducir los rendimientos de las cosechas y procesado de las variedades antiguas. Por ejemplo, hay trigos antiguos con alturas de la planta mayores, presentan raquis quebradizo y en algunos taxones, granos vestidos (ZAMARATSKAIA, et al, 2021).

Finalmente, hay que destacar que los granos ancestrales presentan mayor adaptabilidad a las condiciones climáticas. Por ejemplo, los trigos antiguos requieren pocos recursos y son resistentes a algunas enfermedades como el mildiu o la roya. Por tanto, incluso son variedades interesantes para cultivar en ecológico (BOUKID, F. et al, 2018). Los pseudocereales como la quinoa, amaranto y trigo sarraceno son cultivos resistentes al estrés salino (BOUKID, F. et al, 2018).

Para el año 2050 la población mundial se estima que aumentará en unos 2000 millones de personas (ZAMARATSKAIA, et al, 2021). La industria alimentaria y la agricultura debe hacer frente al reto de poder generar alimentos suficientes de calidad y seguros en una situación de cambio climático para el cual los cereales cultivados en intensivo no están preparados. Hasta el momento, los programas de selección de semillas y generación de organismos modificados genéticamente se han basado en mejorar la resistencia frente a enfermedades, patógenos o fitosanitarios entre otros. Para poder tolerar diferentes fuentes de estrés abiótico (temperaturas extremas, sequía, salinidad en los suelos, etc), no solo se debe potenciar el cultivo de granos ancestrales como alimentos alternativos, si no que se pueden tomar de ellos los genes involucrados en la resistencia y promover programas de selección genética e hibridación enfocados a este nuevo objetivo.

1.1 Objetivos

El objetivo principal del presente estudio es realizar una revisión bibliográfica de las propiedades nutricionales y genéticas de diferentes granos ancestrales, dividiéndolos en cereales y pseudocereales. Los granos ancestrales que se evaluarán serán la familia de los trigos antiguos y pseudocereales (en concreto quinoa, amaranto y trigo sarraceno).

Como objetivos específicos, se llevará a cabo una comparación de los granos ancestrales frente a los modernos en cuanto a la composición química, antioxidantes y otras sustancias relevantes en el valor nutricional. Existen evidencias sobre el potencial que tienen los granos ancestrales en proporcionar compuestos fenólicos en las dietas y, dada la importancia que tienen sus propiedades (antioxidantes, anticancerígenas, antiinflamatorias, etc), en este trabajo se revisará en concreto el contenido en estos nutrientes.

Los buscadores de información y bibliografía utilizados han sido las base de datos online:

-Research Gate

-Science Direct

-PubMed

Y los artículos científicos se han obtenido de las páginas de las editoriales

-Elsevier

-Frontiers

-Springer

2. Características de los granos ancestrales

La concentración excesiva de esfuerzos y recursos utilizados en las pocas especies que alimentan al mundo ha llevado a una pérdida global de biodiversidad con consecuencias negativas como extinción de especies, vulnerabilidad de los ecosistemas y dificultades para cumplir con las futuras demandas de alimentos agrícolas, cada vez más crecientes, debido a la aparición de plagas y enfermedades resistentes y cambio climático. Es por ello, que urge la reintroducción de cultivos de otras variedades por motivos ecológicos y ambientales. Se debe promocionar mediante la creación de mercados específicos para los mismos y descubriendo nuevas recetas culinarias con propiedades nutricionales mejoradas y ampliando así la diversidad en la alimentación.

Los granos ancestrales tienen mucho que ofrecer en esta línea. Se trata de aquellos granos que no han sufrido selecciones genéticas por la agricultura intensiva y contienen características de sus antecesores salvajes.

2.1 Clasificación de los granos ancestrales

Se pueden subdividir en diferentes clasificaciones según se muestra en la Figura 1. Se pueden establecer dos grandes grupos, atendiendo a su tipo o a su contenido en gluten.

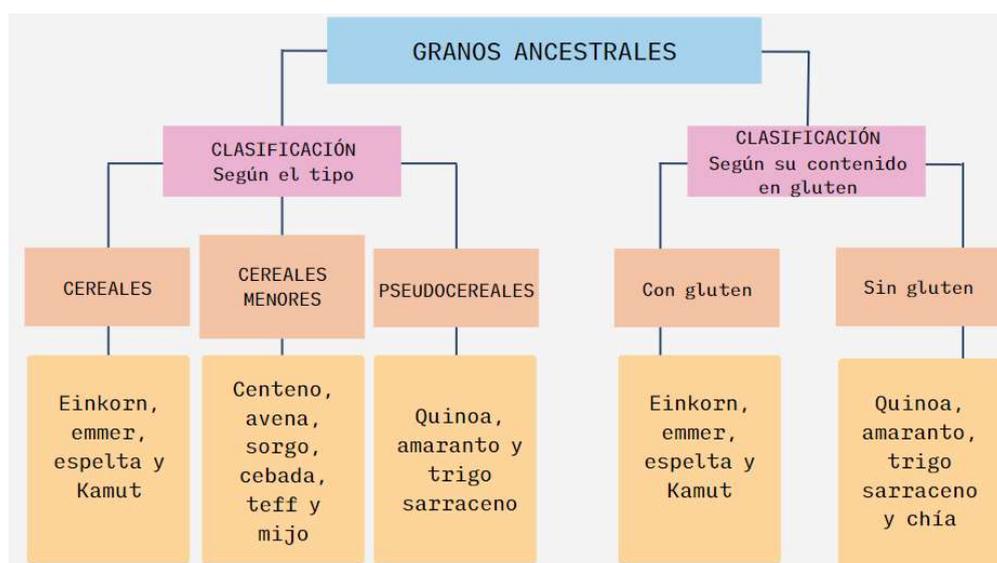


Figura 1: Clasificación de granos ancestrales (BOUKID, F. et al, 2018)

Según el tipo de grano, se encuentran los grupos de Cereales, Cereales menores y Pseudocereales:

-En el grupo de los cereales destacan variedades de trigo antiguas que han caído en desuso y que están adquiriendo mayor popularidad, como el emmer, einkorn, Espelta y Kamut.

-Los cereales menores son por ejemplo el centeno, mijo, avena, sorgo, cebada y teff.

-Pseudocereales se definen como granos de la familia de las dicotiledóneas que divergen en diferentes familias como el amaranto, quinoa o trigo sarraceno (alforfón). La chía recientemente también ha ganado interés debido a sus propiedades nutricionales y funcionales.

2.2 Estructura de los granos

Los granos de cereales tienen varias partes básicas, llamadas pericarpio, cutícula, endospermo y germen:

- El pericarpio es la parte más externa y forma la cascarilla exterior, rica en minerales y fibra. No todos los cereales tienen esta parte.

- La cutícula es la piel que envuelve el endospermo y germen. Es una fracción rica en celulosa.

- El endospermo es la parte más voluminosa y en la que se encuentran la mayor parte de hidratos de carbono y proteínas del grano.

- El germen es la parte más interna del grano y contiene los nutrientes necesarios para germinar una nueva planta, rico en minerales, vitaminas, ácidos grasos y compuestos antioxidantes. En esta parte están los cotiledones que se utilizan para clasificar a las plantas en monocotiledóneas (como el trigo) o dicotiledóneas (como el amaranto).

Estructura de los granos de trigo

En la Figura 2 se puede observar un esquema de la estructura de los granos de trigo. En este grupo en particular, la presencia o ausencia del pericarpio se utiliza para diferenciarlos como “trigos vestidos” o no. Además, durante la molienda, la fracción generada como subproducto formada únicamente por la cutícula del grano se denomina salvado.

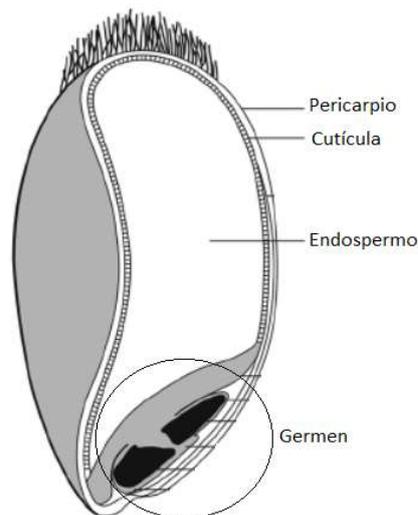


Figura 2: Esquema de la estructura de un grano de trigo (IJI, P. et al, 2019)

Estructura de los granos de pseudocereales

Las partes de los pseudocereales son las mismas que en los granos de trigo, si bien la disposición es diferente dada la forma de la semilla. Como se observa en la Figura 3, el amaranto y la quinoa tienen el germen colocado de manera circular rodeando el endospermo, que es la parte rica en almidón. Todo ello queda recubierto por la cutícula y el pericarpio. Por su parte, en el trigo sarraceno el germen se extiende a través del endospermo.

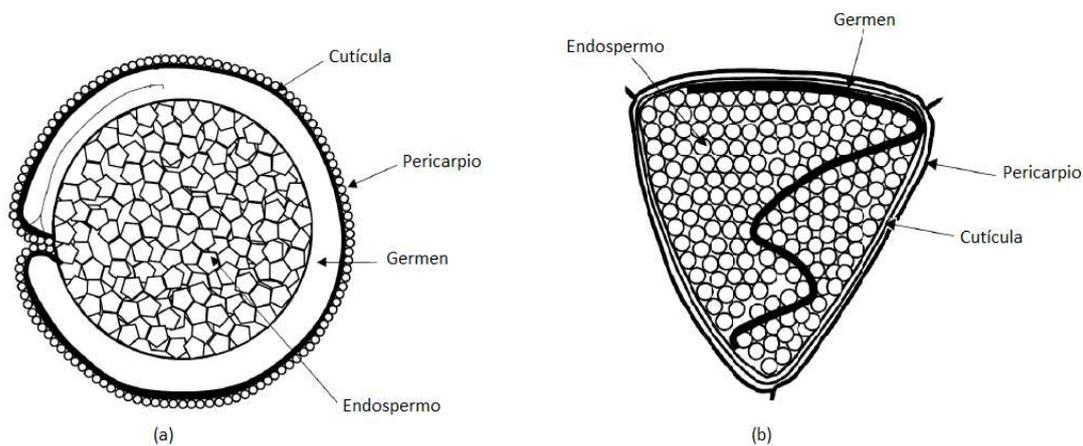


Figura 3: Esquema de la estructura de granos de pseudocereales: (a) quinoa y amaranto, (b) trigo sarraceno. (ALONSO-MIRAVALLÉS & O'MAHONY, 2018)

2.3 Composición de los granos ancestrales

En los apartados 2.4 y 2.5 se tratará la composición nutricional de cada tipo de grano con mayor detalle. En líneas generales, la composición de los granos ancestrales se puede resumir según:

Hidratos de carbono

El componente principal de los granos ancestrales es el almidón, que se presenta en aglomeraciones semicristalinas y que, dependiendo de la naturaleza de la planta, tiene diferentes ratios de sus componentes amilosa y amilopectina. Se concentra en el endospermo.

Proteínas

Las proteínas de los granos tienen contenidos bien balanceados de los aminoácidos esenciales, si bien los trigos son deficitarios en lisina. Las proteínas de los pseudocereales tienen mayores contenidos y por tanto, mayor calidad nutricional. En el caso del trigo sarraceno, el aminoácido limitante es la leucina. En términos generales, están formadas principalmente por globulina, albúmina, prolaminas (también llamadas gliadinas en el caso de los trigos) y gluteninas. Las prolaminas en combinación con las gluteninas forman una red proteica denominada gluten. Debido a que los pseudocereales tienen muy bajos los niveles de prolaminas, el gluten no llega a generarse y son aptos en las dietas celiacas.

El contenido de proteína de los granos ancestrales está entre 13 y 15% del valor nutricional frente a los granos modernos, que contienen entre 7 y 10%. Esto es debido a las modificaciones genéticas realizadas en los granos modernos que buscan un mayor rendimiento en forma de almidón durante la molturación para obtener harina. Cuanto mayor sea el contenido proteico, menor será el contenido en almidón. En ese caso, si se moltura el grano, las propiedades de la harina en cuanto a gelificación y retrogradación serán diferentes. Sin embargo, debido a la mejora genética de las variedades de trigo modernas, éstas son capaces de generar harinas con fuerza en gluten similar, aunque tengan un menor contenido proteico. Es decir, se han seleccionado los trigos que presentaban proteínas más relacionadas con el grado de fortaleza del gluten, mejorando el rendimiento del grano pero haciendo que las harinas sean más tenaces y menos extensibles en general (GOMEZ PALLARÉS, M. et al, 2023).

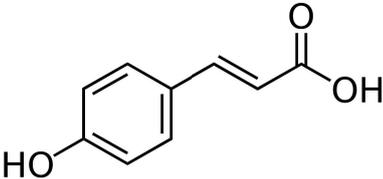
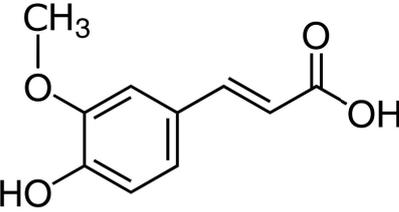
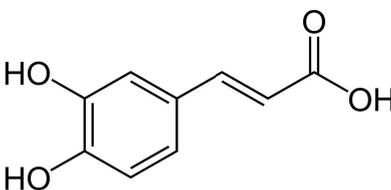
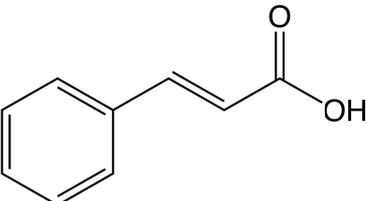
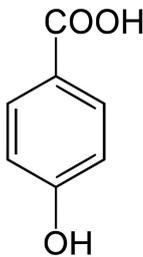
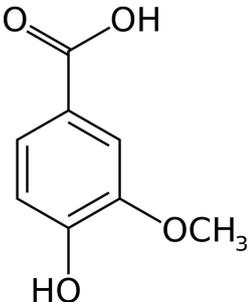
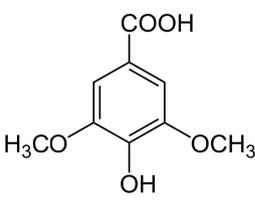
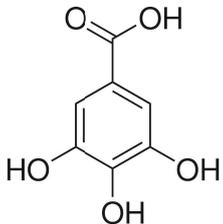
Además, los harineros también pueden hacer mezclas de variedades distintas para conseguir harinas homogéneas y adaptadas a las distintas necesidades del mercado (panificación, repostería, etc). Pero, en el caso de los trigos antiguos, dado que el cultivo de los mismos es más limitado y no tan seleccionado, es más complejo obtener harinas de calidad homogénea entre lotes. Es por ello, que estos trigos quedan más asociados a procesos artesanos y producciones ecológicas, con elaboraciones más

respetuosas con el medio ambiente y tradicionales (como molinos de piedra, panes de largas fermentaciones, etc).

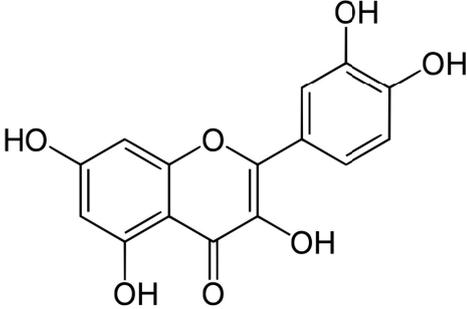
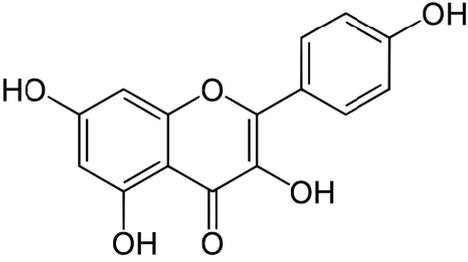
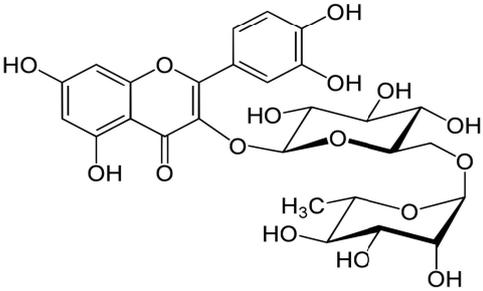
Antioxidantes

Los granos ancestrales se caracterizan por un contenido mayor en antioxidantes que los granos modernos en la forma de compuestos fenólicos. Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios derivados generalmente de la fenilalanina (uno de los nueve aminoácidos esenciales para el ser humano). Están compuestos por un anillo aromático con uno o más grupos hidroxilo, además de los sustituyentes que aportan el carácter funcional de la molécula. Todos ellos son antioxidantes, antimicrobianos y antiinflamatorios.

En los granos ancestrales, destacan de la familia del ácido cinámico (tabla 1), los ácidos ferúlico, p-cumárico y ácido cafeico; y de la familia del ácido benzoico (tabla 2), los ácidos 4-hidroxibenzoico, ácido vainillínico y ácido gálico.

| <i>Tabla 1: Fenoles derivados del ácido del cinámico</i> | | | |
|---|--|--|---|
|  |  | | |
| Ácido p-cumárico | Ácido ferúlico | | |
|  |  | | |
| Ácido cafeico | Ácido cinámico | | |
| <i>Tabla 2: Fenoles derivados del ácido benzoico</i> | | | |
|  |  |  |  |
| Ácido 4-hidroxibenzoico | Ácido vainillínico | Ácido siríngico | Ácido gálico |

También contienen fenoles más complejos como son los flavonoides (tabla 3), derivados de las chalconas con varios anillos aromáticos en su estructura. A continuación se muestran las estructuras de estos compuestos.

| <i>Tabla 3: Flavonoides</i> | |
|---|------------|
|  | Quercitina |
|  | Kaempferol |
|  | Rutina |

Fibra

Los pseudocereales son granos muy pequeños y por tanto son buenas fuentes de fibra alimentaria. Elaboraciones a base de granos ancestrales pueden ayudar a aumentar el consumo de productos integrales. El consumo de granos integrales proporciona beneficios en la salud mediante un aporte extra de fibra, vitaminas y minerales que en ella están contenidos. La recomendación nórdica sobre el consumo de granos integrales es de 70g al día para mujeres y 90g al día para hombres, sin embargo, hay países en los que no se llega a estas dosis, como por ejemplo en Suecia, donde la media de consumo es de 39g en mujeres y 46g en hombre (ZAMARATSKAIA, et al, 2021).

Grasa, vitaminas y minerales

Los contenidos en grasa de los pseudocereales son mayores que los del grupo del trigo, aunque se mantienen en niveles por debajo del 7% del contenido nutricional. Son ricos en calcio y mayoritariamente, sus vitaminas son del grupo B.

2.4 Características de los trigos antiguos

El trigo es uno de los cereales más consumidos y ha ido evolucionando desde que se conoce, a razón de las demandas de los agricultores por obtener mayores rendimientos y por ende, de los consumidores, que demandan harinas y derivados más baratos. Los trigos originarios eran diploides, aunque fueron evolucionando y pasando a ser tetraploides y hexaploides, como los actuales (BOUKID, F. et al, 2018).

En la Figura 4, se pueden observar las diferencias físicas de las espigas y los granos de variedades de trigo antiguas y modernas.



Figura 4: Trigo einkorn, emmer, Durum, Espelta y común (LONGIN & WÜRSCHUM, 2016)

Trigo einkorn (*Triticum monococcum* L. subsp. *Monococcum*)

Tiene como genoma la configuración diploide (AA). Es un trigo derivado de especies de *Aegilopoides* a través de la adquisición de un rachis quebradizo.

Es una de las primeras variedades de trigo cultivadas junto con el emmer. Se han encontrado granos de einkorn en zonas Epi-Paleolíticas y fue sembrado aproximadamente en el 7500 A.C en la zona del sur de Turquía. Su producción disminuyó en la Edad del bronce y aún sigue siendo un cultivo muy minoritario, con destino para alimentación animal, en zonas montañosas de Francia, Marruecos o Turquía entre otros. Es capaz de subsistir en suelos pobres donde otros trigos no podrían crecer (COOPER R. 2015).

Trigo emmer (*Triticum turgidum dicoccum*)

También conocido como “farro” en Italia, tiene genoma tetraploide (AABB). Deriva del *T. urartu*, que le dona el genoma A, y otra especie del género *Sitopsis* que dona el genoma B.

Fue muy cultivado en la antigüedad en zonas como Siria, Palestina o Jordania, pero ahora es un cultivo marginal en áreas montañosas de Europa y Asia. Hay evidencias etnográficas de que en Turquía y Egipto se contemplaba para panificación (COOPER R. 2015). Se utiliza también para alimentación animal. En Italia y Suiza se puede encontrar aún pan con este trigo y también pasta. emmer también se ha utilizado para producción de cerveza en Bavaria (Alemania).

Trigo Khorasan (*Triticum turgidum* subsp. *Turanicum*)

Es un trigo tetraploide (AABB) originario de la región Khorasan (en el actual Irán) y conocido en la zona mediterránea en general. Actualmente, se comercializa bajo la marca comercial Kamut y debe ser cultivada en ecológico. Es similar al trigo duro que se utiliza para elaborar semolas para pasta.

El Kamut se considera que reduce el riesgo de enfermedades crónicas debido al consumo integral de su grano y por sus antioxidantes. Estudios demuestran que animales alimentados con trigo Kamut tienen mejor respuesta al estrés oxidativo que con el trigo moderno (COOPER R. 2015).

Trigo Espelta (*Triticum aestivum* subsp. *Spelta*)

Se trata de un trigo vestido hexaploide (AABBDD). Se considera que es un antecesor del trigo común (*Triticum aestivum*), aunque también cabe la posibilidad de que derive de una hibridación entre el emmer y un trigo hexaploide como el *T. aestivum* L. ssp. *Compactum Host em*.

El trigo espelta, es un ejemplo de como una variedad antigua ha conseguido ser redescubierta y volver a tener cierta popularidad en la industria alimentaria hoy en día. Era un cereal cultivado ampliamente en Alemania, Austria y Suíza, pero a principios del siglo XX la producción disminuyó hasta casi desaparecer, debido a los bajos rendimientos de cosecha debido a la altura de la planta (LONGIN & WÜRSCHUM, 2016).

A principios de la década de 1980, se realizaron estudios sobre la problemática existente para la cosecha de la espeta. En este momento, la universidad de Hohenheim comienza un programa de originación. A partir de los 2000, todas las variedades de espelta son de altura baja, aunque mantienen el fenotipo y la calidad, pero suponiendo una mejora del 20% del rendimiento de la cosecha (LONGIN & WÜRSCHUM, 2016). Además, esta universidad lanzó diferentes programas y proyectos para el estudio de ingredientes de calidad y que además promueven la alimentación saludable, lo que supuso una publicidad importante para este cereal. Finalmente, hay que destacar la actividad de algunos panaderos innovadores, que han sabido redescubrir recetas tradicionales para productos de alta calidad y que les han permitido llegar a los consumidores más exigentes, como la receta de las pastas Seelen, típicas de la región alemana de Swabia.

A nivel nutricional, se muestran a continuación en la Tabla 4 los valores de diferentes trigos antiguos y su comparativa frente a los modernos (durum y común (*Triticum aestivum*)):

Tabla 4: Valores nutricionales de trigos antiguos (USDA Food Composition Database)

| | Einkorn | Emmer | Espelta | Kamut | Durum | Común |
|---------------------------|----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| Energía / kcal | 333 | 362 | 324 | 337 | 339 | 340 |
| Carbohidratos /g | 67 | 72 | 68 | 71 | 71 | 75 |
| Proteína /g | 13,3 | 12,8 | 14,7 | 14,5 | 13,7 | 10,7 |
| Fibra /g | 6,7 | 10,6 | 5,9 | 11,1 | 11,6 | 12,7 |
| Grasas /g | 1,7 | 2,1 | 2,9 | 2,1 | 2,5 | 2 |
| Minerales por 100g | | | | | | |
| Calcio /mg | - | - | 17,6 | 22 | 34 | 34 |
| Hierro /mg | 3,6 | 1,5 | 3,1 | 3,8 | 3,2 | 5,4 |
| Magnesio /mg | 200 | 128 | - | 130 | 144 | 90 |
| Fósforo /mg | - | - | - | 364 | 508 | 402 |
| Potasio /mg | - | - | - | 403 | 431 | 435 |
| Sodio /mg | - | - | - | 5 | 2 | 2 |
| Zinc /mg | 15 | 4,8 | - | 3,7 | 4,2 | 3,5 |
| Vitaminas por 100g | | | | | | |
| Vitamina A /µg | - | - | - | 0,3 | 0 | 0 |
| Vitamina B6 /µg | 0,4 | - | - | 0,26 | 0,42 | 0,38 |
| Vitamina C /µg | - | - | - | 0 | 0 | 0 |
| Vitamina E /µg | - | - | - | 0,61 | 0 | 1,01 |

Los principales componentes de los trigos antiguos son carbohidratos, proteína y fibra, al igual que los modernos. Sin embargo, los contenidos en carbohidratos de los trigos modernos son algo mayores, siendo el einkorn el que menor contenido presenta (67%) seguida de la espelta (68%). El einkorn también contiene muy baja proporción de fibra comparado con el trigo común. En cuanto a proteína, los valores en el trigo *aestivum* son los menores. La grasa es un componente minoritario, pero se puede observar que, excepto en el einkorn, estos granos ancestrales tienen contenidos de grasa mayores que los del trigo común. Además, el trigo einkorn tiene mayor contenido en ácidos grasos monoinsaturados y menor contenido en poliinsaturados y saturados que el trigo durum, siendo por tanto más beneficioso para la salud (BOUKID, F. et al, 2018).

En cuanto a composición mineral, el Kamut tiene contenidos similares a los trigos modernos y la espelta destaca por su bajo contenido en calcio en comparación a los modernos. El trigo einkorn posee mayor cantidad de magnesio que el resto de trigos. Por otra parte, el trigo durum tiene menores contenidos en vitaminas A y E que el Kamut. El contenido en el trigo einkorn en antioxidantes como los tocoles y carotenoides es muy elevado y mayor que el trigo durum. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que el área de cultivo y el genotipo afecta en el contenido final de tocoles y carotenoides (BOUKID, F. et al, 2018).

A parte de estas diferencias nutricionales, cabe destacar que los trigos modernos tienen el gen del enanismo, que evita que el cultivo se encame. En los trigos antiguos, las espigas eran más altas y finalmente se doblaban, disminuyendo el rendimiento de la cosecha pero también apareciendo otros problemas secundarios de contaminación cruzada por estar cerca del suelo (humedad elevada, micotoxinas, microorganismos, etc).

Otro aspecto importante es el vestido de los trigos. Muchos trigos antiguos son vestidos y las partes externas del grano permanecen con él tras la recolección, siendo por tanto necesario retirar la cáscara antes de procesar el grano con un equipo específico (GOMEZ PALLARÉS, M. et al, 2023). El rendimiento en harina es menor y se genera subproducto fibroso que se puede valorizar mediante su uso como combustible, materia prima para fermentaciones, etc.

2.5 Características de los pseudocereales

En la Tabla 5 se muestran las composiciones nutricionales de diferentes pseudocereales y su comparativa frente a cereales más desarrollados tecnológicamente (maíz y arroz):

Tabla 5: Valores nutricionales de pseudocereales y cereales (USDA Food Composition Database)

| | Trigo sarraceno | Quinoa | Amaranto | Maíz | Arroz |
|---------------------------|------------------------|---------------|-----------------|-------------|--------------|
| Energía / kcal | 343 | 368 | 378 | 370 | 363 |
| Carbohidratos /g | 71,5 | 64,2 | 66,7 | 85,2 | 76,5 |
| Proteína /g | 13,25 | 14,1 | 15,5 | 7,4 | 7,2 |
| Fibra /g | 1 | 7 | 8,9 | 7,4 | 4,6 |
| Grasas /g | 3,4 | 6,1 | 6,7 | 3,7 | 2,8 |
| Minerales por 100g | | | | | |
| Calcio /mg | 18 | 47 | 133 | - | 11 |
| Hierro /mg | 2,8 | 4,57 | 8 | 2,67 | 1,98 |
| Magnesio /mg | 321 | 197 | - | 259 | 112 |
| Fósforo /mg | 347 | 457 | - | - | 337 |
| Potasio /mg | 460 | 563 | - | - | 289 |
| Sodio /mg | 1 | 5 | 22 | - | 8 |
| Zinc /mg | 2,4 | 3,1 | - | - | 2,45 |
| Vitaminas por 100g | | | | | |
| Vitamina A /µg | - | 4,2 | - | - | - |
| Vitamina B6 /µg | 0,21 | 0,48 | - | - | 0,73 |
| Vitamina C /µg | - | - | 5,3 | - | - |
| Vitamina E /µg | - | 2,44 | - | - | 0,6 |

El maíz y el arroz contienen los valores más elevados de carbohidratos, mientras que el amaranto y la quinoa proporcionan mayor cantidad de fibra. Los pseudocereales aportan mayor cantidad de proteína que el arroz y maíz. El amaranto por ejemplo tiene contenidos elevados en lisina y triptófano, de manera que se puede utilizar como ingrediente para el refuerzo de alimentos como el maíz o el sorgo, que tienen

menores cantidades (BOUKID, F. et al, 2018). Tanto el amaranto como la quinoa poseen contenidos de grasa similares y mayores a los del arroz y maíz. Los aceites obtenidos del amaranto contienen ácido linoleico. La quinoa también es particularmente rica en linoleato y linolenato (BOUKID, F. et al, 2018).

Trigo sarraceno, amaranto y quinoa se consideran buenas fuentes de minerales como zinc, cobre, manganeso, potasio, sodio, calcio y magnesio. El sarraceno también es rico en tiamina (vitamina B1), riboglavina (vitamina B2) y piridoxina (vitamina B6), así como ser abundante en antioxidantes naturales como tocoferoles, quercitina, flavonoides o ácidos fenólicos (BOUKID, F. et al, 2018). Comparando los datos de las tablas 1 y 2, se puede observar que los contenidos en vitamina A y E que presenta la quinoa son mucho mayores al resto de cereales y trigos antiguos. Si bien los datos de proteína son similares (excepto en arroz y maíz, que son menores al resto), los valores en grasa de los pseudocereales destacan por ser más elevados frente al resto. Asimismo, cabe destacar el alto contenido en hierro del amaranto, muy superior a los demás.

Trigo sarraceno

El trigo sarraceno o alforfón (Figura 5) es un pseudocereal, y no debe relacionarse con la familia *Triticum*. La familia está compuesta por 19 especies, siendo las dos especies mayoritarias son el sarraceno común (*Fagopyrum esculentum Moench*) y el tartárico (*Fagopyrum tataricum Gaertn.*), cultivado en zonas del Himalaya. Recientemente se ha desarrollado una nueva variedad del trigo sarraceno tartárico (*Manten-Kirari*), que destaca por tener alto contenido en rutina y sabor no amargo (KREFT, M., 2016).



Figura 5: Planta trigo sarraceno (COLOMER, J. 2023)

Es una planta cultivada tradicionalmente en Asia y la parte de Europa del este, Turquía y Rusia. Posteriormente pasó a Norteamérica y actualmente se cultiva en todo el mundo. El mayor auge de producción fue en el siglo XIX, y posteriormente disminuyó debido a problemas de originación, respuestas menores a fertilizantes que otros cereales, etc. China es el mayor productor, con 1.500.000 Mtm en 2004, seguido por Rusia (con 649.560 Mt) y Ucrania (con 293.400 Mt). En 1970, China centró las ayudas agrícolas en productos de alto rendimiento, como la patata o el maíz, lo que hizo disminuir la producción de alforfón. En los últimos años se ha vuelto a demandar debido a su calidad nutricional y la ausencia de gluten.

El trigo sarraceno es un grano de forma triangular con aristas marcadas y color marrón oscuro, con cáscara (también llamada pericarpio) que debe eliminarse antes del procesado. Tras este descascarillado, el alforfón puede comercializarse entero o molturarse. Su microestructura se muestra en la Figura 6. La diferencia principal con los cereales es que es dicotiledónea, frente a la mayoría de cereales que son monocotiledóneos. El embrión está en el centro del endospermo, que tiene finas paredes celulares y consiste básicamente en almidón.

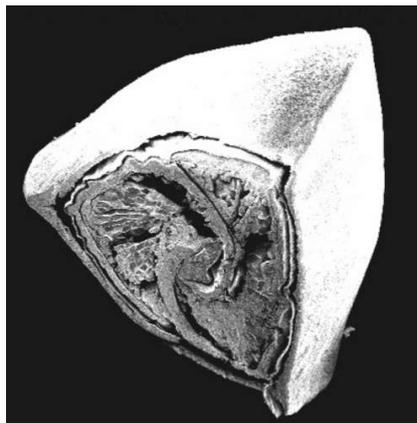


Figura 6: Microestructura del trigo sarraceno (WIJNGAARD & ARENDT, 2006)

El contenido en proteínas se reparte entre 64,5% de globulina, 12,5% de albúmina, 8% de glutelina y un bajo contenido de prolaminas, lo que hace que sea apto para celíacos. Se han reportado valores de 6,1% de lisina, elevado contenido de arginina (9,7%) y de ácido aspártico (11,3%) (WIJNGAARD & ARENDT, 2006). En los lípidos se identifican unos 18 ácidos grasos, de los cuales 14 aparecen en todos los tejidos del grano. El 93% de los ácidos grasos son esenciales: oleico, linoléico, palmítico, linolénico, lignocérico, esteárico, behénico (Figura 7) y araquidónico (WIJNGAARD & ARENDT, 2006). El trigo sarraceno tiene actividad de enzima triacilglicerol lipasa, con un óptimo a 30°C de temperatura para disgregar los lípidos.

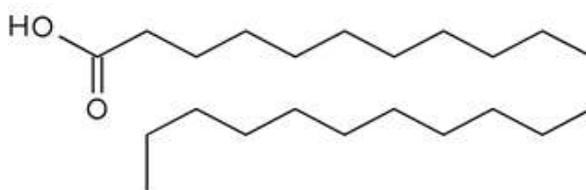


Figura 7: Estructura química del ácido behénico

En cuanto a los minerales, la harina de trigo sarraceno presenta contenido en magnesio que en la mayoría de los cereales. Minerales como Fe, Zn, Mn, Cu, Mo, Ni y Al se localizan tanto en el pericarpio como en el endospermo (WIJNGAARD & ARENDT, 2006). Calcio y boro se encuentran básicamente en el pericarpio.

El alforfón contiene ácido fítico en 10mg/g, conocido antinutriente, aunque también contiene otras moléculas más destacables por sus propiedades beneficiosas, como son el D-chiro-inositol, los fagopiritoles, la rutina y la quercetina. El D-chiro-inositol, es un isómero del inositol que se encuentra en valores relativamente altos en el trigo sarraceno. Su estructura se muestra en la Figura 8. Es conocido que dosis entre 10-20mg de esta molécula hacen disminuir la glucosa en sangre en un 12-19% en ratas (WIJNGAARD & ARENDT, 2006).

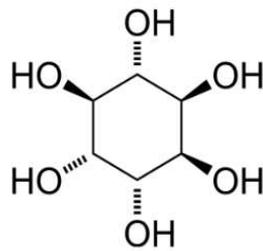


Figura 8: Estructura química D-chiro-inositol

Los fagopiritoles son oligosacáridos solubles que se encuentran en el germen en un 71,4%. el Fagopiritol B1 (cuya estructura se muestra en la Figura 9), es el más abundante, en un 41%, aunque se pueden encontrar otros cuatro (el A1, por ejemplo). Su contenido se puede aumentar con procesos como el malteado. La germinación a 18°C también aumenta el contenido en el fagopiritol B1 y a 25°C aumenta tanto en el A2 como en el B2 (WIJNGAARD & ARENDT, 2006).

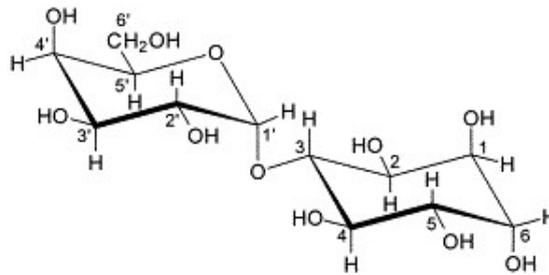


Figura 9: Estructura fagopiritol B1

La rutina y la quercetina son polifenoles, compuestos antioxidantes que se concentran en la parte de la cáscara y piel externa del grano. El pericarpio contiene altos contenidos de ambos (0,84-4,4 mg/g de rutina y 0,009-0,029mg/g de quercitina) (WIJNGAARD & ARENDT, 2006). La quercetina tiene propiedades antivirales y la rutina tiene potencial antiinflamatorio y se considera que puede ser efectiva para prevenir enfermedades como el Alzheimer o la diabetes (KREFT, M., 2016).

Como aplicaciones del trigo sarraceno (además de su posible consumo en grano tras su cocción), está el uso como harina sin gluten en panificación o repostería. Puede aportar en estos productos fibra alimentaria (al considerarse harina integral) y proteínas añadidas, si bien puede aportar sabores fuertes, lo que limita la dosificación de su uso. Tanto el D-chiro-inositol como los fagopiritoles son efectivos para bajar niveles de glucosa en sangre y proporcionar efectos positivos en personas que sufren de diabetes, pudiendo hacer del trigo sarraceno un ingrediente destinado a la producción de alimentos funcionales.

Finalmente cabe destacar la alergia al trigo sarraceno, que puede causar reacciones similares a aquellas causadas por la soja o el cacahuete (con síntomas como asma, urticaria, shock anafiláctico, etc). En general, los casos se concentran en niños japoneses, aunque personas que trabajen de manera continuada con este grano pueden desarrollar sensibilidad también. Además, dado que muchos celíacos consumen este alimento de manera habitual, es común encontrar muchos alérgicos entre ellos (WIJNGAARD & ARENDT, 2006).

Quinoa

La quinoa (*Chenopodium quinoa*) es uno de los cultivos más populares de las regiones andinas, habiendo dos variedades comerciales pertenecientes a la familia amarantáceas: Amarilla de Marangani y Blanca de Junin. Es un alotetraploide con 36 cromosomas. Eran ya consumidos por los Incas y

culturas anteriores a estos desde hace unos 7000 años, si bien se ha vuelto popular recientemente en zonas occidentales por sus cualidades nutricionales y facilidad de uso. Además, las Naciones Unidas declararon el año 2013 como “año internacional de la quinoa”, haciendo que la producción mundial creciera de manera importante, pasando de cultivos locales a ser producida en áreas donde no eran comunes con anterioridad. En la Figura 10 se muestra un detalle de la flor.



Figura 10: Planta de quinoa (TvAGRO, 2016)

No está claro cuándo la quinoa llegó a Europa, si bien se exportó por primera vez a USA a finales de los años 70. Posteriormente, se hicieron estudios de adaptación del cultivo en Inglaterra, Dinamarca y Holanda seguidos por otros países europeos y zonas templadas. Hay poca información sobre las necesidades del cultivo. Aunque se conocen algunos temas como las variedades, la calidad del agua necesaria así como la dosis de la misma, necesidades de fertilización, no se disponen de estudios sobre las prácticas agronómicas y control de malas hierbas (HAROS, C.M. Et al, 2023). Esto está ligado al propio origen de la quinoa y su arraigo a cultivos familiares y minoritarios.

En las regiones del Altiplano, donde se produce mayoritariamente y con tendencia creciente, ha provocado algunos cambios socioeconómicos. Aquellos agricultores con mayor poder adquisitivo con grandes parcelas y maquinaria agrícola, a menudo ofrecen peores condiciones laborales a los labradores, promoviendo así la diferencia y el conflicto social. Para mejorar esta situación es necesaria la mejora y optimización del modelo de cultivo, como el uso de técnicas más respetuosas con el uso de recursos.

La quinoa es un cultivo muy resiliente debido a su origen andino. Está adaptada a suelos salinos y escasez de lluvias. Si bien es resistente a un rango amplio de temperatura (desde -8 hasta 35°C), temperaturas superiores a 35°C durante la floración reducen el rendimiento de la cosecha (RODRIGUEZ, J.P. et al, 2020).

El grano de quinoa es pequeño y redondeado (unos 2mm de diámetro), con colores desde blanco a negro pasando por tonos crema o rojizos. El nutriente mayoritario son los carbohidratos, entre los cuales destaca el almidón (entre 52-60% de los mismos. El contenido en amilosa es del 11% aproximadamente, menor que otros cereales como en el arroz (17%) o trigo (22%) (JANCUROVÁ, M. et al, 2009). La quinoa contiene entre 2-10% de grasa, cuya composición es similar a la de la soja. Los lípidos de la quinoa son ricos en ácido linolénico (19%) y linoléico (15%) (JANCUROVÁ, M. et al, 2009). Los triglicéridos representan el 50% de la fracción lipídica neutra seguidos por los diglicéridos en un 20%. En cuanto a fosfolípidos, se puede resaltar la fosfatidiletanolamina (JANCUROVÁ, M. et al, 2009), formada por ácido palmítico, esteárico u oléico entre otros.

La quinoa es una fuente de proteína, aunque en menor nivel que las legumbres. Destaca por su contenido en albúmina y globulina y por un contenido de aminoácidos bien balanceado, destacando por lisina y metionina. Asimismo, sus aportes de hierro, calcio y zinc son reseñables, así como su contenido en isoflavonas (daidzeína (hasta 2mg/10g) y genisteína (hasta 0,4 mg/100g) cuya estructura se puede observar en la Figura 11), que tienen capacidad de actuar como fitoestrógenos (AHUMADA, A et al, 2016). Es un pseudocereal que no contiene gluten debido a su bajo contenido en prolaminas.

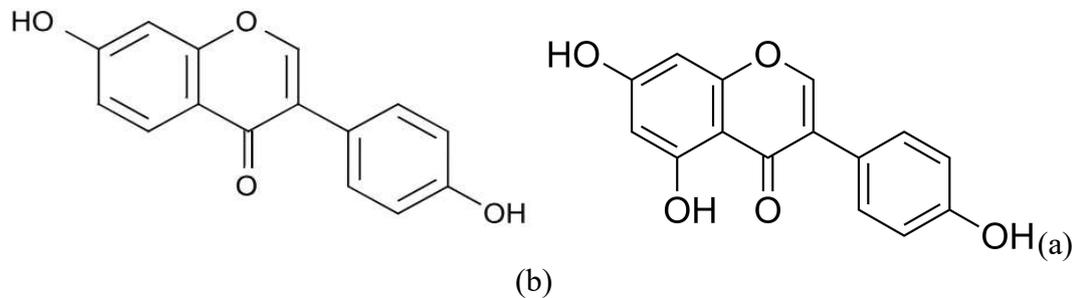


Figura 11: Estructura química de daidzeína (a) y genisteína (b)

Sin embargo, la quinoa tiene saponinas, que aportan gran sabor amargo, y deben ser eliminadas antes de su consumo, aunque hay variedades de quinoa dulce con menor contenido de este elemento (alrededor de 0,5g/kg de saponinas en la quinoa dulce frente a 10g/kg en la quinoa amarga) (REPO-CARRASCO-VALENCIA & TOMÁS, 2022). En las semillas se encuentran contenidas en el pericarpio, pero también se han detectado en las hojas de la planta, flores y frutos, de manera análoga a otras plantas como *Allium nigrum* o algunas leguminosas (AHUMADA, A et al, 2016). En estos casos, las saponinas actúan como protección contra ataque de patógenos y hongos, de manera que tienen cierto interés en la industria farmacéutica como remedio natural contra estos microorganismos.

Estos compuestos son metabolitos secundarios constituidos por un anillo terpenoide sustituidos por oligosacáridos a través de enlaces glucosídicos, que les confieren carácter anfifílico. Se han identificado alrededor de 30 saponinas derivadas de la hederagenina y de los ácidos oleanólico, fitolacagénico y serjanico en la planta (AHUMADA, A et al, 2016). Las saponinas tienen poder espumante y emulsionante pero también efecto hemolítico y antiinflamatorio. Son capaces de unirse al zinc y hierro y evitar su absorción en la digestión.

Para eliminarla se puede optar por métodos húmedos, secos o mezcla de ambos. Además, las saponinas resisten temperaturas superiores a 150 °C e inferiores a 400 °C, temperatura a la cual se inicia el proceso de carbonización de la molécula, posibilitando la implementación de procesos de extracción convencionales que usualmente son favorecidos por el uso de calor (AHUMADA, A et al, 2016). El método húmedo consiste en mojar la quinoa y por fricción, hacer que las saponinas pasen al agua, si bien se generan altos efluentes de agua residual y es necesario el posterior secado del grano, para evitar fermentaciones, germinaciones o aparición de mohos u otros microorganismos no deseados. El método seco se basa en la retirada de las capas superficiales por abrasión, aunque no es tan efectivo como el anterior y genera una mayor merma de producción y pérdida de nutrientes contenidos en las capas externas como fibra o minerales (hasta un 15% de hierro, zinc y potasio y hasta un 27% de cobre y 3% de magnesio) (JANCUROVÁ, M. et al, 2009). En esta quinoa, llamada “perlada”, se puede identificar un contenido de unos 0,50g de saponinas por cada kg de quinoa, es decir, como la quinoa dulce.

Otro factor antinutricional de la quinoa es el ácido fítico, encontrado en las capas superficiales. Este compuesto forma complejos con algunos metales, al igual que la saponina, evitando su absorción. El contenido está en torno a 1% en semillas en base seca (REPO-CARRASCO-VALENCIA & TOMÁS, 2022). Los procesos de lavado y perlado pueden retirar hasta un 30% de este compuesto, y la fermentación también se valora como un método efectivo para este propósito.

En cuanto a las posibles aplicaciones de la quinoa, destaca su consumo en forma de grano en ensaladas u otras elaboraciones culinarias, pero también como harina sin gluten. Al igual que el trigo sarraceno, puede generar sabores fuertes en productos de panificación o repostería, de manera que hay que cuidar la dosis utilizada. Asimismo, debido a la ausencia de gluten, la panificación con harina de quinoa debe aditivarse con fibras u otros que ayuden a mantener la red gaseosa generada en la fermentación (psyllium, hidroxipropilmetilcelulosa, etc).

Amaranto

El amaranto (Figura 12) es una planta conocida desde la cultura Azteca e Inca, pero fue reemplazada en gran medida por otros granos como maíz o alubias tras la conquista. Si bien hay algunos agricultores dedicados a este cultivo, en muchas zonas ha quedado como un mero cultivo ornamental o para alimentación animal. En los últimos años, el amaranto ha tenido una nueva expansión como una planta prometedora en países en vías de desarrollo, ya que es capaz de crecer en climas con altas temperaturas, sequía y suelos salinos (PAREDES LÓPEZ, O, 2018). Esta capacidad está asociada a unas largas raíces pivotantes y capacidad de mantener la absorción de agua a pesar del estrés.

Hay unas 60 especies en la familia, siendo el *Amaranthus cruentus*, *Amaranthus ypochochriacus* y el *Amaranthus caudatus* los más cultivados para obtener grano y otros como *Amaranthus blitum*, *Amaranthus dubius* y *Amaranthus tricolor* como verdura.



Figura 12: Planta del amaranto (MAITEZUDAIRE, 2008)

En 1981, el amaranto fue seleccionado como una investigación prioritaria en el Panel de ciencia y tecnología para el desarrollo internacional (BOSTED), en la Academia nacional de EEUU de ciencias. Algunos de los objetivos de este proyecto fueron la determinación de las condiciones climáticas necesarias para que el cultivo fuera posible en un rendimiento adecuado, identificación de variedades o el desarrollo de técnicas agroclimáticas adaptadas.

En 1990, la producción de este pseudocereal fue de más de 100.000 hectáreas en la Unión Soviética, usándose principalmente para alimentación animal. Otros productores son China, México, Guatemala, Perú, India o Kenya (PAREDES LÓPEZ, O, 2018). En África hay algunos cultivos, aun muy minoritarios, que pretenden ser para Europa una fuente de este pseudocereal más cercana que América.

México es el mayor productor, con 6000 tm en 2019. (GRAZIANO, S. et al, 2022). La cadena de suministro está manejada por cooperativas, lo que provoca que los pequeños agricultores tengan menor capacidad de toma de decisión sobre sus producciones y transacciones comerciales. Todo ello unido al hecho de que se cultiva en regiones aisladas, con dificultades de acceso a internet y poca capacidad de marketing, hace una barrera para la expansión del amaranto. Para aliviar esta presión, el gobierno mejicano debería poner énfasis en los pequeños productores y fomentar su independencia o formación de asociaciones de productores minoritarios así como incrementar los recursos destinados a la investigación y mejora de la producción (uso de recursos, fitosanitarios, etc).

Al igual que la quinoa, posee alto contenido en proteína de alta calidad por su contenido completo en aminoácidos entre los que destacan la valina, leucina e histidina (QUINTANA FUENTES, L.F. et al, 2021). En este pseudocereal, la cantidad de prolaminas es baja pero la de glutelinas es muy importante (PAREDES LÓPEZ, O, 2018). Destaca también su contenido en albúmina, de la cual se ha aislado un grupo de proteínas rico en metionina (MRPs), con un 16-18% molar de este aminoácido y 6,1-6,4% molar de lisina (PAREDES LÓPEZ, O, 2018).

Por otra parte, se han identificado dos péptidos análogos de la cisteína y glicina con propiedades antimicrobianas en el *A. caudatus*, capaces de inhibir el crecimiento fúngico (PAREDES LÓPEZ, O, 2018). Destaca por su elevado contenido en calcio y hierro frente al resto de cereales. Dispone también de vitaminas del grupo B y E y alto contenido en polifenoles, como ácido cafeico, ácido p-hidroxibenzoico y ácido ferúlico (QUINTANA FUENTES, L.F. et al, 2021).

Por todo ello, el amaranto también tiene potencial para ser fuente de genes interesantes que se puedan utilizar en la mejora de variedades de otros cultivos. Se puede consumir en grano cocido o incluso inflado por calor seco o en forma de harina sin gluten, con la que se puede elaborar barras de cereales, productos integrales, galletas y panes. También se está investigando la extracción del aceite del amaranto para aprovechar sus propiedades antioxidantes y poder utilizarlo en alimentos funcionales o nutracéuticos o incluso aplicarlo en sectores como cosmético o farmacéutico.

2.6 Otros granos ancestrales

Muchos de los pseudocereales y granos ancestrales son originarios de América, en concreto de las regiones andinas. Algunos de ellos son cultivos en riesgo de extinción, cuya promoción para mejorar la dieta podría ayudar a fomentar la agricultura regional y sus exportaciones al resto del mundo. La región andina es una parte importante de América latina, en la cual se pretende incrementar la producción de cultivos protegiendo a su vez el frágil ecosistema de la zona. Es por ello que se utilizan en general técnicas de agricultura ecológica y técnicas de cultivo antiguas adaptadas al clima, que en ocasiones es extremo. Así, se busca el manejo eficiente del suelo y agua en combinación con terrazas, paredes de piedra y otras separaciones artificiales que permiten cultivar en el altiplano.

Estos cultivos se han mantenido en niveles marginales debido a su bajo mercado de consumo, de manera que se han mantenido como alimentos de subsistencia en las zonas cercanas por su uso tradicional, teniendo dificultades por tanto de llegar a otros mercados internacionales. Si bien en los últimos años, algunos como la quinoa han tenido una gran expansión, hay otros minoritarios interesantes como:

Kañawa (*Chenopodium pallidicaule*)

Pertenece a la familia de las *amaranthaceae*, es resistente al frío y heladas, es un grano sin gluten y con contenido bajo en saponina. El contenido en proteínas es entre 15-18%, como la quinoa, y tiene también alto contenido en hierro y zinc (HAROS, C.M. Et al, 2023). La planta genera varios frutos a partir de inflorescencias distribuidas en las ramas que se pueden observar en la Figura 13. Bolivia y Perú son los mayores productores de Kañawa (HAROS, C.M. Et al, 2023). En las zonas rurales, la población

tuesta los granos y los muele en un molino de piedra. La harina obtenida se puede mezclar con otras como trigo o amaranto para realizar productos de repostería como galletas.



Figura 13: Cultivo de Kañawa (HAROS, C.M. Et at, 2023)

Chía (*Salvia hispanica*)

En la época precolombina, la chía (Figura 14) era un cultivo esencial y se producía en gran cantidad por los Aztecas y los Mayas junto con maíz, alubias y amaranto para preparaciones culinarias y medicina.

Recientemente, debido a que se ha considerado un superalimento, la chía está ganando interés y es cultivo emergente en muchos países. El término superalimento, no tiene una definición oficial, si bien se utiliza para alimentos que pueden aportar nutrientes en altas cantidades y contribuir al correcto funcionamiento del cuerpo humano. Así, el mercado de la chía se prevé que crezca en un 6,5% cada año entre 2022 y 2027, convirtiéndose Europa en el mayor consumidor, donde la población busca estos superalimentos y donde hay un aumento de las dietas veganas o vegetarianas (MELO FERREIRA, D. et al, 2023). Norteamérica es actualmente el consumidor principal y América latina el mayor proveedor (desde países como Argentina (con el 35% de la producción mundial), Paraguay, Bolivia y México) (HAROS, C.M. et at, 2023). Sin embargo, no se sabe mucho sobre la forma de cultivo y prácticas agronómicas y tampoco hay variedades o híbridos capaces de subsistir en otros climas.



Figura 14: Cultivo de chía (HOUSING NEWS, 2023)

Las semillas de chía son muy pequeñas y ovaladas, de unos 2mm de largo, entre 1 y 1.5mm de ancho y menos de 1mm de grosor. El color puede ser negro, gris o con manchas blancas, pero los valores nutricionales se mantienen similares a pesar de ello. Tiene alto contenido en grasas (un 32% aproximadamente) formadas por ácidos grasos omega 3 ricos en linoleico y linoléico. El contenido en carbohidratos está entre 26 y 41%, y en fibra entre 18 y 30% (KNEZ HRNCIC, M et al, 2019). Las proteínas presentes en un 17% aproximadamente hacen que este grano proporcione mayor cantidad de este nutriente que otros cereales, como se puede observar en las Tablas 1 y 2. Además, son proteínas sin gluten.

La chía contiene minerales como calcio, fósforo, potasio y magnesio y vitaminas B1 y B2. El contenido en calcio es mayor que el del maíz, arroz o la avena (KNEZ HRNCIC, M et al, 2019). En cuanto a compuestos fenólicos, se caracteriza por altos niveles de ácido cafeico, ácido clorogénico, ácido gálico, ácido cinámico así como de quercitina y kaempferol. Por tanto, es beneficioso para la salud previniendo el cáncer, la diabetes, inflamaciones, estreñimiento, etc (MELO FERREIRA, D. et al, 2023).

En industria alimentaria, las semillas de chía pueden utilizarse en grano, en harina, en aceite o en gel. Si las semillas se muelen o maceran en agua se obtiene un gel mucilaginoso, que se puede utilizar como espesante o gelificante. Este gel puede sustituir al huevo en productos de repostería. Germinadas, se pueden utilizar en ensaladas.

Sacha inchi (*Plukenetia volubilis*)

Procedente de América tropical y utilizada por los Incas, Sacha inchi (Figura 15) posee excepcional composición y gran aceptación entre el público. Es una semilla oleaginosa, con un 45-50% de lípidos en su composición, siendo los mayoritarios ácido linoleico y linoléico. También tiene alto contenido en proteínas (22-30%) y antioxidantes (HAROS, C.M. Et al, 2023). Tiene diversos usos, en la cocina se pueden tostar las semillas y en cosmética se ha utilizado para generar cremas antiedad. En Europa está autorizado el consumo del aceite pero no las semillas como tal, ya que aún está en estudio el contenido en alcaloides.



Figura 15: Planta Sacha inchi (IICA, s.f.)

Se han estudiado los beneficios del aceite de Sacha Inchi como ingrediente. No solo disminuye los valores de triglicéridos y colesterol, sino que también hace reducir los marcadores de estrés oxidativo en sangre. Es debido a los agentes antioxidantes que posee como tocoferoles y compuestos fenólicos que además, juegan un papel importante en la conservación de este aceite con el paso del tiempo, evitando enranciamientos y proporcionando estabilidad. Contiene el doble de compuestos fenólicos que el aceite

de girasol. Por ello, se puede almacenar durante un largo periodo de tiempo sin aditivos (LIU, Q. Et al, 2014).

Teff (*Eragrotis tef*)

El teff (Figura 16) ha existido por más de 6000 años, siendo Etiopía el lugar de origen, donde se considera que se comenzó su cultivo entre los años 4000 y 1000 A.C. (CHENG, A, et al, 2017). Sigue siendo hoy día un cereal mayoritario en Etiopía y Eritrea, aunque recientemente ha ganado popularidad al ser asociado a una buena composición y sin gluten. Su uso principal es para molienda y obtención de una harina con la que se prepara el “injera”, un pan fermentado etíope. Es fuente de 9 aminoácidos esenciales, entre los cuales está la lisina, ausente en otros cereales comunes (CHENG, A, et al, 2017).



Figura 16: Planta Teff (UNIVERSITY OF BERN, s.f.)

El grano de teff es muy pequeño, aproximadamente de 1x1,5mm y con colores blancos, marrones o rojizos. Puede crecer en zonas áridas y con sequía, si bien no tolera las heladas. Por ello, se puede cultivar en multitud de áreas diferentes de África y por ello es un cultivo prometedor para mejorar la biodiversidad y la agricultura sostenible.

Sin embargo, es necesario que se realicen mejoras genéticas ya que la altura de la planta es elevada y el tamaño de grano muy pequeño, lo que la hace susceptible a daños por vientos y causa bajos rendimientos de cosecha (CHENG, A, et al, 2017).

3. Composición fenólica

Las plantas tienen de manera natural compuestos fenólicos, que son metabolitos secundarios derivados de la fenilalanina o de la tirosina. Su composición se basa en un anillo aromático con grupos hidroxilo y otros sustituyentes que aportan carácter funcional de la molécula.

Se pueden encontrar gran cantidad de compuestos en esta familia, como fenoles, fenilpropanoides, derivados del ácido benzoico, flavonoides, estilbenos, taninos, lignanos y ligninas. Además, forman parte de otros compuestos de cadena larga como suberina o cutina. Todos ellos presentan funciones antifúngicas y antimicrobianas en las plantas, esenciales para su crecimiento y desarrollo correcto. Además, son responsables del color de las diferentes partes de la planta.

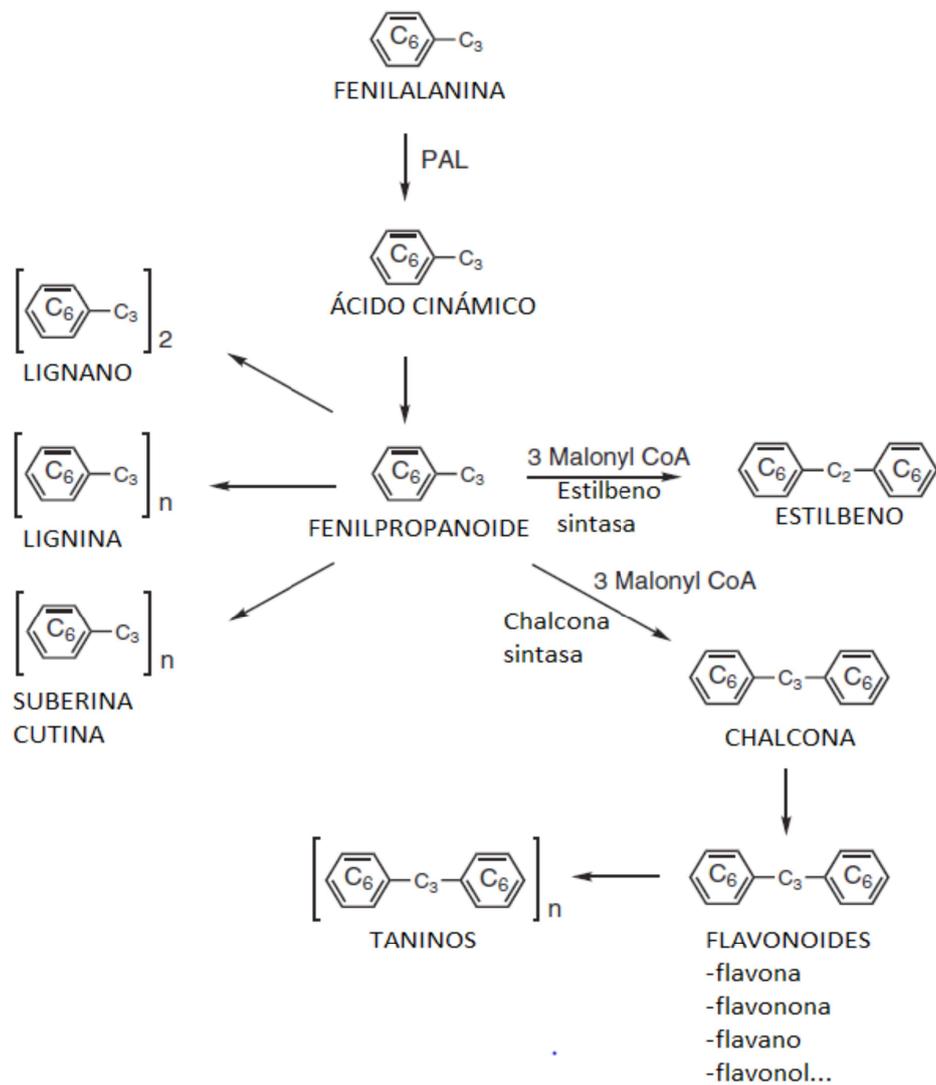


Figura 17: Rutas de obtención de compuestos fenólicos a partir de fenilalanina (SHAHIDI & NACZK, 2004)

En la Figura 17 se resumen las rutas de obtención de compuestos fenólicos a partir de fenilalanina. La transformación de fenilalanina a ácido cinámico está catalizada por la enzima fenilalanina-amonio liasa (PAL). Paralelamente, en algunas plantas, la tirosina es convertida en ácido 4-hidroxicinámico mediante la acción de la tirosin-amonio liasa (TAL) (SHAHIDI & NACZK, 2004). Surge entonces la familia de las moléculas derivadas del ácido cinámico que, junto con la familia del ácido benzoico, colectivamente se denominan ácidos fenólicos, si bien, químicamente, no es una nomenclatura correcta desde el punto de vista estructural.

A partir del fenilpropanoide derivado del ácido cinámico y con la participación de 3 moléculas de malonyl coenzima A, surgen las chalconas que posteriormente pueden dar lugar a los flavonoides. Entre los flavonoides, los más destacados son las antocianinas y las catequinas, estas últimas son taninos condensados a partir de varias unidades de flavonoides. En los granos ancestrales, destacan la quercitina, el kaempferol (Figura 18) y sus derivados.

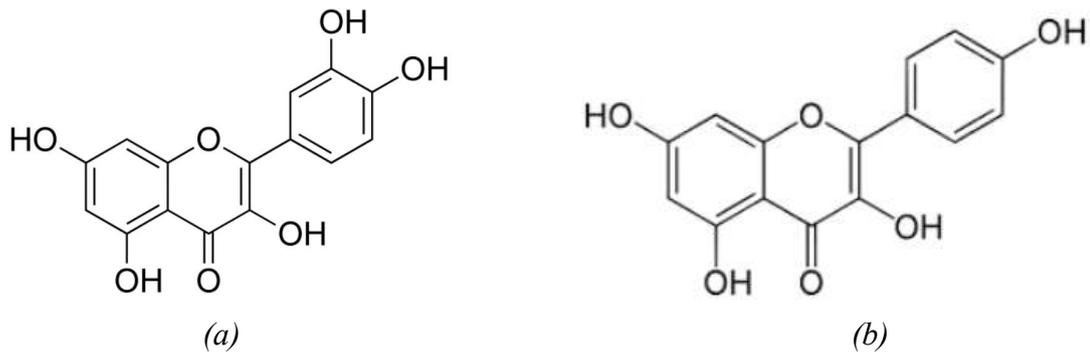


Figura 18: Estructura química de la quercitina (a) y del kaempferol (b)

Cabe decir que no todos los taninos proceden de los flavonoides, ya que hay otros grupos de taninos como los hidrolizables, los complejos o los florotaninos que se escapan del alcance de este trabajo.

En los granos ancestrales, destacan de la familia del ácido cinámico, los ácidos ferúlico, p-cumárico y ácido cafeico; y de la familia del ácido benzoico, los ácidos 4-hidroxibenzoico, ácido vainillínico y ácido gálico. En los alimentos, los compuestos fenólicos suelen estar como ácidos libres. Pero si se toma en cuenta no solo el contenido en ácidos libres si no también aquellos fenoles ligados, se puede calcular el contenido fenólico total. Los fenoles ligados son aquellos de mayor peso molecular, como los taninos.

Presentan beneficios en la salud humana como reducción de riesgo de muerte por enfermedades cardiacas o cáncer (WIJNGAARD & ARENDT, 2006). Todos ellos son antioxidantes, y actúan bloqueando los radicales libres y por tanto, previniendo el envejecimiento de los tejidos y mejorando su elasticidad. Al igual que en las plantas, en el cuerpo humano también tienen efecto antimicrobiano y antiinflamatorio. Alimentos ricos en compuestos fenólicos son el cacao, el té, las legumbres o las uvas, en las cuales hay grandes cantidades de antocianidinas y taninos. En los granos ancestrales se han cuantificado cantidades significantes de compuestos fenólicos, lo que implica beneficios en las dietas que incluyen estos alimentos.

3.1 Contenido fenólico en trigos antiguos

En los trigos, los ácidos fenólicos presentes son derivados del ácido hidroxicinámico y del hidroxibenzoico, y en su mayoría se encuentran formando parte de la pared celular. El predominante es el ácido ferúlico, proporcionando el grueso de la actividad antioxidante. También se pueden encontrar ácidos vainillínico, cafeico, siringico y p-cumárico (BENINCASA, P. et al., 2014).

El contenido fenólico en los trigos depende del cultivar y de las condiciones edafoclimáticas durante la generación de las espigas y granos así como de aquellas postcosecha. Los brotes germinados son una forma de aumentar el valor nutricional de los alimentos de una manera natural. El contenido polifenólico de hecho evoluciona desde la semilla, pasando por el brote germinado y finalmente en la planta. A continuación, en la Tabla 6, se muestran datos de contenidos fenólicos libres de trigo monococcum (einkorn) [TmoM], trigo emmer [TdiA], trigo durum [TDuC], trigo espelta [TspG] y trigo aestivum [TaeO] encontrados en las semillas, brotes germinados tras 5 días y planta crecida tras 12 días (BENINCASA, P. et al., 2014).

En términos totales, a nivel de semilla, se puede observar que los contenidos fenólicos libres de los trigos einkorn, emmer y aestivum son mayores a los de los trigos espelta y el moderno durum, si bien a nivel de planta se estabilizan resultando valores similares e incluso mayores en los trigos modernos.

El ácido 4-hidroxibenzoico y el vainillínico aumentan con la evolución del grano. El resto, aumentan en la fase de brote mayormente y posteriormente disminuyen en planta, excepto el siringico, que aumenta desde la no detección en la fase de semilla hasta llegar a 3 µg /g peso fresco en el trigo einkorn tras 12

días de desarrollo. Estos resultados concuerdan con el estudio llevado a cabo por TRUZZI, F. y colaboradores en 2019 en el que compararon diferentes trigos modernos y antiguos en contenido polifenólico y capacidad antioxidante.

Tabla 6: Contenido de fenoles libres: ácido hidroxibenzoico (4-OHBA), ácido vainillínico (VA), ácido cafeico (CA), ácido siríngico (SRA), ácido p-cumárico (p-CA) y ácido trans-ferúlico (trans-FA) (BENINCASA, P. et al., 2014).

| Contenido fenólico (ácidos libres) / µg/g peso fresco | | | | | | | |
|--|---------------|-----------|-----------|------------|-------------|-----------------|--------------|
| | 4-OHBA | VA | CA | SRA | p-CA | trans-FA | TOTAL |
| Semillas | | | | | | | |
| TmoM | 0,12 | 0,41 | ND | ND | 0,18 | 0,78 | 1,59 |
| TdiA | 0,17 | 0,34 | 0,11 | ND | 0,34 | 0,61 | 1,46 |
| TduC | 0,09 | 0,27 | ND | ND | 0,28 | 0,68 | 1,32 |
| TspG | 0,11 | 0,34 | ND | ND | 0,31 | 0,54 | 1,3 |
| TaeO | 0,13 | 0,56 | ND | ND | 0,33 | 0,44 | 1,46 |
| Brotes | | | | | | | |
| TmoM | 0,32 | 0,97 | ND | ND | 0,49 | 1,1 | 2,91 |
| TdiA | 0,44 | 0,61 | 0,24 | ND | 0,82 | 1 | 3,11 |
| TduC | 0,25 | 0,59 | ND | ND | 0,57 | 1,29 | 2,69 |
| TspG | 0,47 | 0,76 | 0,19 | ND | 0,75 | 1,12 | 3,27 |
| TaeO | 0,45 | 1,12 | 0,12 | ND | 0,76 | 1,67 | 4,11 |
| Planta | | | | | | | |
| TmoM | 1,2 | 4,75 | ND | 3,13 | 0,35 | 1,77 | 11,2 |
| TdiA | 1,7 | 2,2 | ND | 0,44 | 0,72 | 0,97 | 6,06 |
| TduC | 0,92 | 7,33 | ND | 1,85 | 0,75 | 0,82 | 11,65 |
| TspG | 1,17 | 1,49 | ND | 1,54 | 0,32 | 0,36 | 4,87 |
| TaeO | 1,71 | 6,43 | ND | 1,16 | 0,51 | 0,35 | 10,1 |

En general, estos contenidos de ácidos fenólicos libres son muy bajos. Si comparamos los valores obtenidos en este mismo estudio para fenoles ligados, se observa que el contenido total de los mismos son el doble en las semillas del trigo einkorn [TmoM] y emmer [TdiA] que las otras variedades, como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7: Contenido de fenoles ligados: ácido hidroxibenzoico (4-OHBA), ácido vainillínico (VA), ácido cafeico (CA), ácido siríngico (SRA), ácido p-cumárico (p-CA) y ácido trans-ferúlico (trans-FA) (BENINCASA, P. et al., 2014).

| Contenido fenólico (fenoles ligados) / µg/g peso fresco | | | | | | | |
|--|---------------|-----------|-----------|------------|-------------|-----------------|--------------|
| | 4-OHBA | VA | CA | SRA | p-CA | trans-FA | TOTAL |
| Semillas | | | | | | | |
| TmoM | 2,56 | 5,23 | 6,49 | ND | 310,3 | 303,1 | 627,7 |
| TdiA | 2,14 | 5,41 | 7,16 | ND | 251,3 | 296,1 | 562,2 |
| TduC | 1,14 | 2,15 | 1,16 | ND | 14,2 | 225,7 | 244,3 |
| TspG | 1,21 | 2,41 | 5,61 | ND | 35,7 | 274,2 | 319,1 |
| TaeO | 1,42 | 2,98 | 3,58 | ND | 21,7 | 227,9 | 257,6 |

Además, se puede observar que el contenido total de compuestos fenólicos en las semillas de einkorn y emmer es debido a las concentraciones de ácido p-cumárico (pCA) y de ácido trans-ferúlico (FA)

(representando cada uno casi el 50% del total de fenoles ligados). El ácido trans-ferúlico (FA) en el resto de variedades representa casi el 90% del total de fenoles ligados. Las concentraciones totales de fenoles ligados disminuyen desde el estado de semilla hasta el desarrollo de la planta, ya que, los trans-ferúlico (FA) y p-cumárico (pCA) son aquellos involucrados en la estructura y desarrollo de la pared celular. Los contenidos totales de las diferentes variedades en el estado brote y planta son más homogéneos que en las semillas, ya que en einkorn y emmer el descenso es más pronunciado.

Las propiedades antioxidantes y antiinflamatorias del trigo Khorasan son conocidas desde hace mucho tiempo. Hay estudios que comparan la harina de trigo Khorasan Kamut (de origen norteamericano y origen Italia) frente a harina de trigo durum en los que se evidencia que la capacidad antioxidante y protectora frente al estrés oxidativo es mayor con la del trigo antiguo (ZAMARATSKAIA, et al, 2021). Es interesante que el Kamut cultivado en Norteamérica tuvo mayor capacidad antioxidante que el italiano, posiblemente debido al mayor contenido en selenio del grano, originado por el medio edáfico de la zona de cultivo.

Por otra parte, las propiedades antiinflamatorias de estos granos antiguos residen en su capacidad de aumentar la concentración de ácidos grasos de cadena corta (SCFA) en el intestino humano. Varias enfermedades intestinales como la colitis ulcerosa o la enfermedad de Crohn se consideran el resultado de desequilibrios en las concentraciones de SCFAs. Los SCFA por tanto tienen un papel fundamental en respuestas inmunes e inflamación crónica, ya que protegen la barrera epitelial y ayudan a reparar el epitelio dañado. Asimismo, contribuyen en la regulación del metabolismo de la glucosa y los lípidos, contribuyendo a la homeostasis energética.

Estudios revelan un aumento de SCFAs en el intestino humano en dietas basadas en trigo Khorasan en comparación con dietas basadas en trigo durum, y también se obtienen resultados similares en experimentos llevados a cabo con cerdos y dietas basadas en trigo einkorn frente a trigo durum (ZAMARATSKAIA, et al, 2021).

3.2 Contenido fenólico en pseudocereales

Trigo sarraceno

Entre los compuestos fenólicos del trigo sarraceno, destacan la rutina (que estructuralmente es un glucósido flavonoide, también presente en otros alimentos como la piel del tomate o en el vino tinto) y la quercitina (que es un flavonol, también presente en la cebolla, el brocoli o el té). Se pueden encontrar también compuestos de la familia del kaempferol.

El nivel de rutina en las semillas es menor que el presente en brotes germinados y en la planta desarrollada, donde se detectan los valores más elevados, tanto de rutina como de epicatequina y otros, ya que están concentrados en las hojas y flores (KREFT, M., 2016). Coincide con los estudios realizados por ZHANG, G. et al en 2015 sobre brotes germinados, en los que aumenta significativamente el contenido fenólico, flavonoideo y de taninos totales, y con ello la capacidad antioxidante.

En la Figura 19, se puede observar que los menores contenidos se detectan en el grano sin germinar (línea c), aumentan tras germinar durante 48 horas (línea b) y siguen desarrollándose tras germinar 72 horas (línea a), presentándose incluso algunos compuestos ausentes en el grano inicial. Los picos corresponden (en orden desde el número 5 al 11) a rutina, kaempferol-3-rutinósido, quercetina, miricetina, luteolina y kaempferol.

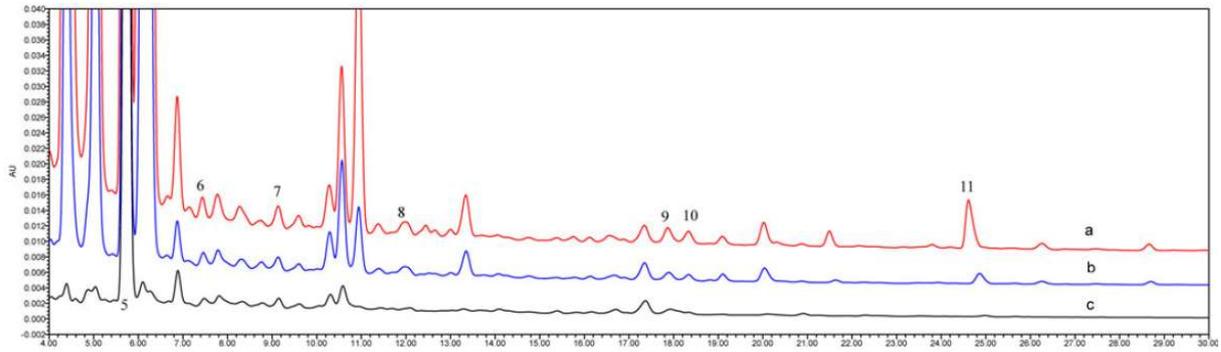


Figura 19: Cromatograma HPLC-UV de flavonoides en trigo sarraceno a 335nm (nota: el tiempo de retención del eje de abscisas está expresado en minutos) (ZHANG, G. et al, 2015)

Si se compara la composición del sarraceno común (*Fagopyrum esculentum Moench*) y el tartárico (*Fagopyrum tataricum Gaertn.*), se detectan diferentes actividades antioxidantes (KREFT, M., 2016), siendo el tartárico el que tiene mayor actividad contra radicales libres que los del común, probablemente por su mayor contenido en rutina y quercitina.

El trigo sarraceno, al igual que la quinoa y amaranto, contienen entre 25-60 mg/100g de ácidos fenólicos libres totales, entre los que destaca el ácido p-hidroxibenzoico, el cafeico y el clorogénico (que es un éster formado por el ácido cafeico y el ácido quínico, con estructura representada en la Figura 20).

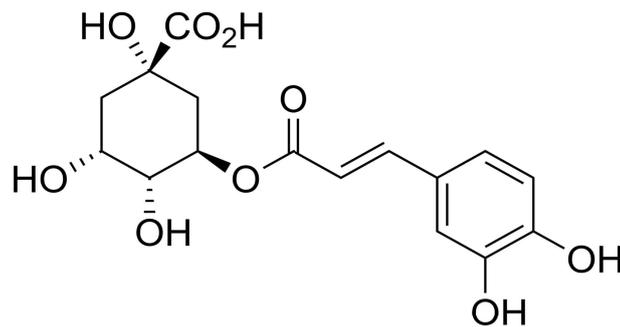


Figura 20: Estructura química del ácido clorogénico

El contenido de ácidos fenólicos totales es menor que el nivel detectado en algunos cereales como el trigo, en los que se puede detectar en torno a 135mg/100g en grano integral. Esto es debido a que el mayor contenido está disponible en la fibra exterior, con niveles entre 419 – 453g/100g (PILCO-QUESADA, S. et al, 2020).

En la tabla 8 se pueden observar los contenidos unitarios de diferentes fenoles y flavonoides en el trigo sarraceno.

Tabla 8: Contenido fenólico y flavonoideo en trigo sarraceno (ZHANG, G. et al, 2015)

| | contenido µg/g peso fresco |
|-----------------------------|----------------------------|
| Fenoles del benzóico | |
| Ácido p-hidroxibenzóico | 19,6 |
| Ácido vanílico | 1,2 |
| Ácido gálico | 2,6 |
| Fenóles del cinámico | |
| Ácido p-cumárico | 1,74 |
| Ácido ferúlico | 4,37 |
| Ácido cafeico | 8 |
| Ácido clorogénico | 7,8 |
| Flavonoides | |
| Quercitina | ND |
| Kaempferol | 0,95 |
| Rutina | 131,2 |

Los glucósidos flavonoides son resistentes a la hidrólisis ácida del estómago y por tanto, se suelen hidrolizar por las enzimas y microorganismos presentes en la flora intestinal. Así, *Eubacterium ramulus*, bacteria del intestino, degrada aquellos flavonoides disponibles en el trigo sarraceno (WIJNGAARD & ARENDT, 2006). La rutina se transforma en quercitina por la flora y se metaboliza como dióxido de carbono (KREFT, M., 2016).

Los estudios sobre el potencial del trigo sarraceno para mejorar la dieta, mostraron que el extracto de esta planta presenta mejores efectos que la rutina administrada pura. Del mismo modo, al suministrar este extracto, el nivel de metabolitos de quercitina potencialmente bioactivos en el plasma sanguíneo fue 1,33 veces mayor. Sin embargo, el estado antioxidante de este plasma no se vio afectado (WIJNGAARD & ARENDT, 2006). Por su parte, cuando se administró miel de trigo sarraceno, la capacidad antioxidante sérica aumentó significativamente (un 7%) (WIJNGAARD & ARENDT, 2006). El potencial anticancerígeno del trigo sarraceno requiere de una investigación más profunda. Se llevó a cabo un estudio epidemiológico en 738 hombres que tomaron flavonoides derivados de este pseudocereal y no se pudo predecir un menor riesgo (KREFT, M., 2016).

Cuando este pseudocereal se calienta a 150°C, parte de los flavonoides se destruyen y el contenido disminuye. Se han reportado hasta 20% de reducción durante 10 minutos y hasta 40% de reducción durante 70 minutos a dicha temperatura (WIJNGAARD & ARENDT, 2006). La elaboración de pan con harina de trigo sarraceno también conlleva una pérdida de rutina, aunque no de quercitina (KREFT, M., 2016). Sin embargo, alimentos extrusionados como la pasta no muestran una pérdida tan elevada como con los tratamientos anteriores, posiblemente debido a que, aunque la temperatura de proceso sea similar, el tiempo durante el que se aplica es menor (unos 10-20 segundos de retención). Así se evidencia en la Tabla 9 donde se muestra la actividad antioxidante del trigo sarraceno tras diferentes tratamientos expresada en equivalentes de trolox. El trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico) es un análogo de la vitamina E soluble en agua con capacidad antioxidante que se utiliza en biotecnología para reducir el estrés oxidativo. Los equivalentes de trolox son una unidad de medida utilizada para comparar la capacidad antioxidante de una matriz compleja, como los alimentos.

Tabla 9: Actividad antioxidante de trigo sarraceno tras diferentes tratamientos expresada en equivalentes de trolox (SENSOI, I. et al, 2006).

| | Equivalentes de trolox /μmol/g en base seca |
|--------------|--|
| Sin tratar | 2,14 |
| Extrusionado | 2,12 |
| Tostado | 1,85 |

Es por ello, que las elaboraciones culinarias o alimentos nutracéticos o funcionales deben cuidar estas temperaturas para evitar pérdidas elevadas de contenido antioxidante durante el proceso.

Quinoa

En la quinoa, los compuestos fenólicos están en concentraciones menores que otros cereales como el trigo o el centeno, aunque en niveles similares a la avena, cebada, maíz o arroz. Los contenidos presentes además dependen de la variedad, aunque en todas ellas destaca el ácido 4-hidroxibenzoico (REPO-CARRASCO-VALENCIA & TOMÁS, 2022). La quinoa roja presente el mayor contenido fenólico y flavonoideo, seguida por la negra, que tiene mayor concentración de ácidos fenólicos. Asimismo se encuentran altos contenidos de tocoferoles en la quinoa negra y roja comparada con la blanca. En las dos primeras, los compuestos fenólicos están en formas ligadas frente a la variedad blanca, que se encuentran libres en mayor proporción. Además, se considera que los pigmentos de la quinoa roja y negra son betacianinas, que al igual que las antocianidinas, tienen poder antioxidante.

El contenido fenólico total de ácidos libres es aproximadamente de 40 mg/100 g en base seca. Los compuestos fenólicos de la familia del benzoico están en mayor proporción que los de la familia del cinámico, como se observa en la Tabla 10. Los flavonoides totales se pueden encontrar entre 36 y 73 mg/100 g. Entre ellos, destacan los glucosidos de flavonoides de la familia de la quercitina y del kaempferol (REPO-CARRASCO-VALENCIA & TOMÁS, 2022).

Tabla 10: Contenido fenólico y flavonoideo en quinoa (CARCIOCHI, R.A. et al, 2014)

| | contenido μg/g (base seca) |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| Fenoles del benzóico | |
| Ácido p-hidroxibenzoico | 2,2 |
| Ácido vanílico | 8,8 |
| Fenoles del cinámico | |
| Ácido p-cumárico | 0,90 |
| Ácido ferúlico | 5,7 |
| Flavonoides | |
| Quercitina | 2,3 |
| Kaempferol | 1,5 |

Este pseudocereal también posee fitoecdisteroides, una clase de compuestos que la planta genera para protegerse del ataque de insectos, pero que en la dieta humana se ha comprobado que reduce la grasa y mejora el estado físico de la persona y reducen la resistencia a la insulina que presentan algunas personas y les ayuda a mejorar la absorción de la glucosa.

Hay estudios de como evoluciona el contenido fenólico tras diferentes procesos industriales (REPO-CARRASCO-VALENCIA & TOMÁS, 2022).

Tras procesos de secado de grano postcosecha (a temperaturas entre 40-70 °C) el contenido fenólico puede disminuir. Los efectos observados después de realizar lavado, lavado e hidratado, cocinado (con y sin presión) y tostado también se han reportado. El mayor contenido se observa tras cocinado con presión después de lavar los granos, y el proceso que más pérdidas presenta es el tostado. Tras la molienda integral del grano de quinoa blanca, se ha observado una disminución de hasta 30% del contenido fenólico. Antes del proceso, se pudieron identificar compuestos como dadzeina (una isoflavona), pero no posteriormente. Además, tras la molienda, se observó mayor capacidad antinutricional de quelar metales.

Finalmente, cabe decir que en la quinoa al igual que lo comentado anteriormente en los trigos, los brotes germinados son un método que ayuda a incrementar el contenido fenólico y capacidad antioxidante, llegando hasta un aumento de 80 y 30% respectivamente tras germinar durante 42 horas a 20°C, y hasta un 100% en contenidos fenólicos tras 82 horas (CARCIOCHI, R.A. et al, 2014).

Así, en la Figura 21, se puede observar que los menores contenidos se detectan en el grano sin germinar (línea b), aumentan tras germinar durante 72 horas (línea c). La línea A corresponde a muestras patrón de los compuestos estudiados, correspondiendo los picos (en orden desde el número 1 al 9) a ácido gálico, ácido p-hidroxibenzoico, ácido clorogénico, ácido vainillínico, ácido cafeico, ácido p-cumárico, ácido ferúlico, quercitina y kaempferol. En las semillas, el ácido ferúlico es el más abundantes mientras que en los brotes germinados es el ácido vainillínico.

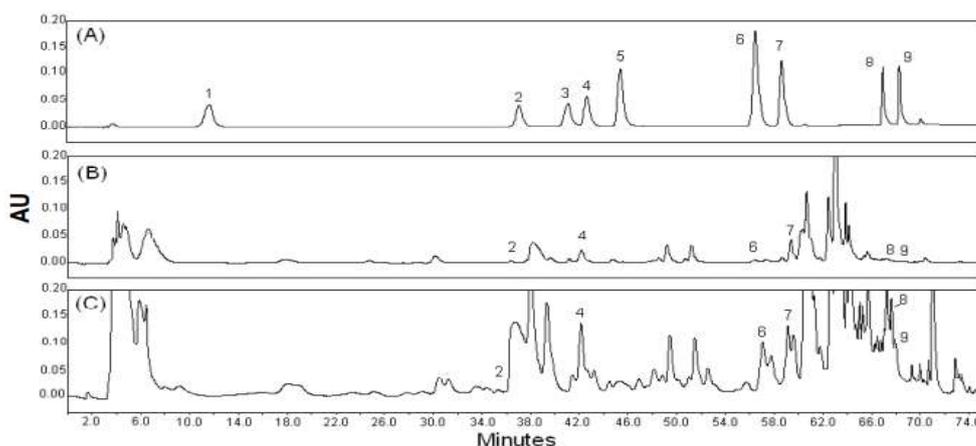


Figura 21: Cromatograma HPLC-UV de compuestos fenólicos en quinoa a 280nm (CARCIOCHI, R.A. et al, 2014)

Amaranto

En los últimos años se ha estudiado considerablemente el perfil fenólico del amaranto y sus propiedades bioactivas. La capacidad antioxidante, como se ha comentado anteriormente, depende de las condiciones edafoclimáticas, la variedad del cultivo, la madurez de la planta, el color del pigmento y por último, el método analítico utilizado para esta determinación.

Las concentraciones más elevadas se observan en los primeros estadios vegetativos (brotes germinados) y en las últimas etapas (floración y generación de grano). Por el contrario, el menor contenido se observa durante el crecimiento de la planta tras varios días de cultivo y antes de la aparición de órganos reproductivos (KARAMAC, M. et al, 2019).

Se ha detectado que las partes aéreas de la planta son importantes fuentes de estos compuestos, y son un alimento muy utilizado en zonas como Malasia. Autores como Amin, I (AMIN, I, et al, 2004) y Karamac, M. (KARAMAC, M. et al, 2019) coinciden en que hay mayor concentración de compuestos fenólicos en las hojas de varias especies de amaranto (*A. hypochondriacus*, *A. caudatus* y *A. cruentus*) frente al tallo y semillas, que muestran los menores contenidos. Las hojas destacan por los carotenoides, ácido ascórbico, flavonoides y otros ácidos fenólicos, y si la variedad es rojiza, tendrá antocianinas y betacianinas.

Si se comparan granos obtenidos de diferentes variedades de *Amaranthus hypochondriacus*, en todas se pueden identificar y cuantificar rutina, ácido 4-hidroxibenzoico, ácido vainillínico y nicotiflorina, como se resume en la Tabla 11. Ésta última se considera que tiene efectos que favorecen el mantenimiento de la memoria y tiene potencial como remedio contra enfermedades isquémicas cerebrales. Se observa por ejemplo, que la rutina se encuentra en mayor concentración en la variedad Tulyehualco y la nicotiflorina en mayor concentración en la variedad Gabriela.

Tabla 11: Contenido fenólico de diferentes variedades de *A. hypochondriacus* (BARBA DE LA ROSA, A.P. Et al, 2009)

| Contenido µg/g | Tulyehualco | DGETA | Gabriela | Nutrisol |
|-----------------------------|-------------|-------|----------|----------|
| Fenoles del benzóico | | | | |
| Ácido p-hidroxibenzoico | 1,7 | 2 | 2,2 | 1,9 |
| Ácido vanílico | 1,8 | 1,7 | 1,8 | 1,5 |
| Ácido siríngico | 0,8 | 0,7 | ND | ND |
| Flavonoides | | | | |
| Nicotiflorina | 5,5 | 5,6 | 7,2 | 4,8 |
| Rutina | 10,1 | 5,8 | 4 | 4,7 |
| Isoquercitina | 0,5 | 0,5 | 0,3 | ND |

Comparando estas cantidades con los flavonoides disponibles en la quinoa, se podría decir que están a nivel de trazas.

Entre especies de amaranto ocurre lo propio. Aunque *A. paniculatus* y *A. Caudatus* en total tengan contenidos entre 39-56 mg/100g de semillas, hay diferencias significativas en los valores de los compuestos unitarios. Así en *A. paniculatus* destaca el ácido protocatecuico, pero en *A. caudatus* es el ácido cafeico el mayoritario (KLIMCZAK, I, et al, 2002), como se observa en la tabla 12.

Tabla 12: Contenido fenólico de dos especies de amaranto (KLIMCZAK, I, et al, 2002).

| | <i>A. paniculatus</i> | <i>A. caudatus</i> |
|--------------------------|-----------------------|--------------------|
| Metabolito / µg/g | | |
| Ácido protocatecuico | 101 | 4,65 |
| Ácido p-hidroxibenzoico | 15,6 | 20,9 |
| Ácido caféico | 51,7 | 55,8 |
| Ácido p-cumárico | 43,6 | 5,2 |
| Ácido ferúlico | 40 | 18,4 |
| Ácido salicílico | 2,65 | 1,92 |

Para aumentar los contenidos fenólicos y flavonoides, al igual que en el resto de granos ancestrales, está comprobado que la germinación es un método adecuado. Compuestos que no están presentes en las semillas alcanzan valores elevados tras germinar 72 horas, como la quercitina-3-O-rutinósido, el

ácido cafeoilquínico o el ácido cumaroilquínico (PILCO-QUESADA, S. et al, 2020). Además, si tras las 72 horas de germinación se lleva a cabo un malteado, los valores obtenidos se mantienen en valores similares.

Finalmente, cabe decir que tras realizar tratamientos culinarios en amaranto, como la cocción de las semillas, se estima que se pueden perder hasta el 82% de compuestos fenólicos tras 15 minutos de hervido en agua (AMIN, I, et al, 2004).

4. Consideraciones genéticas

Los cultivos intensivos de cereales han ido mejorando genéticamente no por una cuestión de azar y selección natural, si no por la selección humana de variedades con mayores rendimientos y mejora genética contra enfermedades, plagas o fitosanitarios. Es decir, la domesticación de los cultivos intenta ser similar a la especiación en la naturaleza, pero bajo la selección artificial por los humanos. Esto hace que muchas plantas utilizadas como cultivos, sin la protección y cuidados de los agricultores, no saldrían adelante por si mismos.

Si se analizan los genomas de especies de plantas locales de diferentes regiones, se pueden observar diferencias notables debido a las hibridaciones con otras plantas autóctonas que han permitido su permanencia en dichos lugares y afrontar variaciones climáticas o agentes bióticos. Incluso en una misma región pero a diferente altitud o características edáficas se podrían observar estas adaptaciones.

Los ascendientes de los cultivos modernos pueden servir como fuentes de genes diversos para aumentar la resiliencia de estas plantas, mejorando aspectos como la resistencia a las enfermedades o mejora en la calidad del grano. Por ello, se han realizado comparativas genómicas entre los cultivos intensivos actuales y sus ancestros salvajes para esta estrategia, con el objetivo de detectar y seleccionar alelos y variaciones estructurales en el genoma que hayan sido consecuentes de la evolución y la selección natural con el paso del tiempo.

Cabe destacar que en los bancos de genes, para cada uno de los géneros, existen multitud de variedades disponibles. Para poder gestionar este gran número de opciones, se debe atender a criterios como su posible desempeño frente al cambio climático, importancia histórica en ciertas regiones, etc. Por ejemplo, mientras que el trigo emmer tiene un perfil agrícola muy prometedor y enfocado a la producción de alimentos nuevos y de gran calidad, el trigo einkorn tiene alto contenido en luteína, vitamina E y sales minerales, favoreciendo su uso en alimentos funcionales y dotando a los mismos de un aroma profundo y color característico (LONGIN & WÜRSCHUM, 2016). Sin embargo, dado el bajo rendimiento y características de cultivo del trigo einkorn es probable que sea descartado del portfolio de los granos ancestrales a ser reintroducidos (LONGIN & WÜRSCHUM, 2016).

4.1 Genética de los trigos antiguos

Actualmente, las dos variedades de trigo más cultivadas son el durum (tetraploide AABB), para la producción de pasta y el aestivum (hexaploide AABBCC), para uso panario. Algunos trigos antiguos, como el einkorn, son diploides (AA).

El trigo durum actual (DWC) deriva de variedades durum locales seleccionadas (DWL), que surgieron a partir del trigo emmer domesticado (DEW), y éste de su ancestro salvaje (WEW). Si bien las primeras muestras de trigo durum son de hace unos 7000 años, se consolidó como cultivo mayoritario hace unos 1500 años.

El paso desde un trigo diploide hasta uno hexaploide deriva de una intrincada historia basada en general, por dos eventos. Una primera hibridación hace unos 0,8 millones de años entre el *Triticum*

urartu (AA) y especies diploides relacionadas con *Aegilops speltoides* (BB), generando el trigo emmer salvaje (BBAA). A continuación, éste junto con *Aegilops tauschii* (DD) produjeron una segunda hibridación que dió como resultado los primeros trigos hexaploides. Los ejemplares más antiguos datan de hace unos 8400 años en Turquía.

Tras las sucesivas selecciones de semillas buscando el máximo rendimiento de los cultivos, el trigo pierde diversidad genética. Se puede observar en la figura 22 un análisis de la diversidad de los genomas de diferentes especies de trigos. Frente a la amplia dispersión que muestra el trigo emmer, está el trigo durum, que se ve claramente limitado. También se puede observar una reducción de este frente a sus antecesores los trigos durum locales.

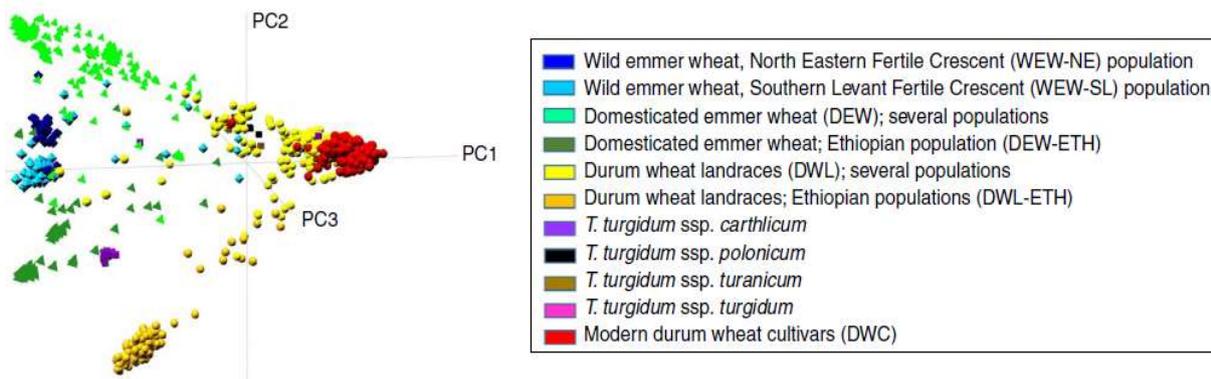


Figura 22: Gráfico de análisis de componentes principales de la Colección Global de Trigo Tetraploide sobre la base de distancias por pares de todo el genoma calculadas sobre la base de SNP podados por desequilibrio de ligamiento (MACCAFERRI, M. et al., 2019).

Con la selección de variedades y la ingeniería genética a partir de la Revolución verde, la pérdida genética y de biodiversidad se ha dejado en un segundo plano, potenciando mejoras para la resistencia contra enfermedades, coloración amarillenta, altura de la planta, tamaño del grano, etc. También se eliminó el handicap del raquis frágil que disponen tanto el trigo einkorn como el emmer, que facilita la dispersión de las semillas y por tanto hace disminuir los rendimientos de la cosecha.

A continuación, se muestra como ejemplo la evolución en los trigos de los alelos *TdHMA3-B1a* y *TdHMA3-B1b* en la figura 23, donde se muestran las proporciones de los mismos en diferentes variedades.

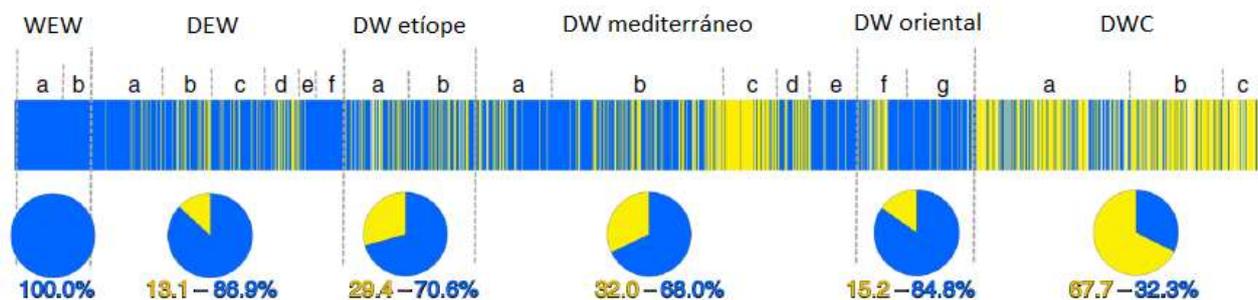


Figura 23: *TdHMA3-B1a/b* proporción relativa en los principales grupos de germoplasma tetraploide. Barras azules: accesiones con *TdHMA3-B1a*; Barras amarillas: accesiones con *TdHMA3-B1b* (MACCAFERRI, M. et al., 2019).

La expresión de estos alelos regula el contenido de cadmio y zinc en la planta. El alelo *TdHMA3-B1a* influye en el transporte y acumulación del cadmio y zinc al interior de las vacuolas radiculares mientras

que el *TdHMA3-B1b* por su parte, reduce la retención de cadmio en las raíces pero potencia el transporte de éste hacia las partes aéreas.

Muchas de las mejoras genéticas se han realizado frente a agentes bióticos (resistencia contra patógenos o parásitos por ejemplo). Así, el gen SR35 clonado desde el trigo einkorn proporciona resistencia a la cepa Ug99 de roya negra, un patógeno del trigo, ya que este gen no está en los trigos hexaploides. Asimismo, el gen Yr34 también se ha clonado desde el einkorn para proporcionar resistencia a la roya lineal (MAHMOOD & MANSOOR, 2023). Sin embargo, en las mejoras genéticas no se ha proporcionado suficiente interés en la resistencia contra agentes abióticos. Actualmente, con el cambio climático, se evidencia que es necesaria otra línea de actuación para poder asegurar una cadena alimentaria lo suficientemente robusta y sostenible para hacer frente a la demanda de una población cada vez más creciente. Para ello, se busca en las variedades antiguas aquellos genes que proporcionen resistencia a la sequía, altas temperaturas, al estrés salino, etc.

Gracias a la disponibilidad masiva de datos genómicos, hay varios métodos que se han desarrollado para clonar genes, como la secuenciación de enriquecimiento genético (RenSeq), mapeo de asociaciones de marcadores k-mer o el MutlsoSeq, basado en la secuenciación del ARNm en vez del ADN genómico (WANG, Z., 2023). También hay bases de datos disponibles y herramientas de secuenciación para promover los avances en la mejora genética de las especies.

Para hacer uso de la diversidad genética del trigo einkorn en los trigos modernos, la ruta más común suele ser la hibridación entre ambos, seguida de la duplicación de los cromosomas para desarrollar un trigo hexaploide sintético. También se podría realizar la hibridación directa, pero requiere retrocruzamiento con los cultivares modernos para eliminar aquellas características no deseadas de los antiguos y restaurar aquellas óptimas para el uso final (MAHMOOD & MANSOOR, 2023).

El trigo es una planta que necesita un clima templado, con temperaturas óptimas por el día entre 17 y 23°C y por la noche menores a 14°C para generar el máximo rendimiento (BALLA, M. Y, 2022). El calor por encima de 23°C altera los ritmos fisiológicos, biológicos y bioquímicos. La etapa de crecimiento del grano es la más sensible, y el estrés térmico con temperaturas estivales entre 20 y 35°C puede hacer disminuir el rendimiento en un 63% en el número de granos por espiga y 29% en el peso (BALLA, M. Y, 2022).

El trigo emmer tiene potencial genético para mejorar en este sentido la resistencia del trigo común y durum actual, debido al linaje procedente de zonas cálidas como Iran, Palestina, Siria, Líbano o Jordania. Gestiona mejor el estrés térmico, y esta capacidad es necesaria para mejorar la tolerancia de los trigos cultivados en intensivo (BALLA, M. Y, 2022). Los recursos que utiliza el emmer contra la sequía incluyen adaptación de la pared celular, deposición de cera cuticular, lignificación, cambios en la regulación osmótica y redox e incluso senescencia inducida. También se han observado cambios en la expresión hormonal de giberelinas, auxina o en el ácido abscísico (mayor cantidad de éste en las raíces mejora la respuesta a la sequía) (NEVO, E, 2014). El trigo emmer también es capaz de hacer frente al estrés salino. Muestras tomadas en diferentes zonas de Israel mostraron diferencias genéticas que regulan el comportamiento frente a la absorción del sodio. Las muestras de zonas más áridas y cálidas (sur y este del país), evidenciaron una menor absorción de sodio frente a las muestras procedentes del oeste. (NEVO, E, 2014). La respuesta frente al estrés salino se identificó con una mayor peroxidación lipídica y aumento del malonaldehído así como pérdida de electrolitos.

Sobre muestras de emmer tomadas en Israel en 1980 y de nuevo en 2008 se estudiaron los cambios adaptativos frente al calentamiento global. Se pudo observar que fenotípicamente, los cultivos han procedido a adelantar la floración en una media de 8,5 días (NEVO, E, 2014). Genotípicamente, se detectaron nuevos alelos en las muestras de 2008 frente a las anteriores que muestran una mejor tolerancia a la sequía (NEVO, E, 2014).

La fotosíntesis puede ser otro camino para aumentar rendimientos y resistencia a la sequía, ya que se ha reportado menor capacidad fotosintética en los trigos modernos frente a los antiguos. Una mayor capacidad de fotosíntesis, genera mayor rendimiento de la nutrición de la planta y mayor cantidad de metabolitos asociados disponibles. También se puede trabajar en la arquitectura radicular, tomando ciertos genes del trigo emmer para mejorar rendimientos en lugares áridos (MERCHUK-OVNAT, L. et al., 2016).

4.2 Genética de los pseudocereales

Trigo sarraceno

La mayoría de especies de este pseudocereal son diploides excepto el *F. Cymosum* y el *F. gracilipes*, que son tetraploides. La diversidad genética del trigo sarraceno se ha visto empobrecida en las últimas décadas debido a los cambios en las formas de cultivar y los hábitos alimenticios. Además, es una planta que se autopoliniza, de modo que la manera de conseguir una mayor diversidad es mediante programas de hibridación con otras variedades o selección de semillas.

Se ha realizado una investigación importante para entender las propiedades del alforfón y cómo sus proteínas, flavonoides y otros elementos están relacionados con su estructura genética. Aproximadamente, el 52% de la colección mundial de genes descritos están en el sudeste asiático, con 5000 accesiones disponibles (RODRIGUEZ, J.P. et al, 2020).

Los objetivos de los programas de hibridación y selección de semillas se basan en mejorar la productividad de los cultivos, mejorando el tamaño del grano, el momento de la maduración, etc. También se busca mejorar la calidad del grano y sus propiedades tecnológicas como un pelado sencillo, mejora de la relación grano/cascarilla, eliminación de las propiedades alergénicas y el incremento de la vida útil de la harina. Para conseguirlo, se deben examinar minuciosamente las colecciones disponibles e identificar las características asociadas a los diversos genes. Así por ejemplo, el análisis del transcriptoma ha facilitado el estudio del grupo de genes asociados en la toxicidad al aluminio, tolerancia a los suelos salinos y la estructura de la flor, identificándose la expresión de unos 11676 genes en diversos tejidos del trigo sarraceno tartárico (GRAZIANO, S. et al, 2022).



Figura 24: Granos de trigo sarraceno descascarillado (fuente propia)

El trigo sarraceno, mostrado en detalle en la Figura 24, se puede cultivar incluso en suelos ácidos, donde la toxicidad por aluminio generalmente es un factor limitante para el crecimiento de otras plantas. Este grano ancestral secreta oxalato a la rizosfera para detoxificar el área, y particularmente,

F. esculentum además puede acumular aluminio en las partes aéreas (SELWAL, N. et al., 2022). La exposición al aluminio además hace incrementar el contenido total de polifenoles, como flavonoides y antocianinas, y la actividad de la enzima PAL. Los estudios de expresión genética revelaron que, esta situación, se induce o por la activación del gen FeALS3 o por la estimulación de altos niveles de ácido abscísico (SELWAL, N. et al., 2022).

El trigo sarraceno también es capaz de sobrevivir a las sequías. Los mecanismos observados son reduciendo el uso de agua perdida por estomas y en la fotosíntesis, disminuyendo la actividad de las clorofilas y la RubisCO (HOU, Z. Et al, 2019). También se reduce la actividad enzimática de las oxidoreductasas y kinasas. Los genes clasificados como captadores de luz y los que reaccionan con la luz y la expresión de los genes LCHb (que codifican la proteína de unión a clorofila a/b) y PASN (que codifican la proteína de la subunidad N del centro de reacción del fotosistema I) se redujeron notablemente en condiciones de sequía (HOU, Z. Et al, 2019).

En clima con altas temperaturas, las plantas sufren estrés oxidativo debido a la sobreproducción de especies reactivas al oxígeno. Por ello, el metabolismo antioxidante del trigo sarraceno se promueve y aumentan los contenidos polifenólicos, sobre todo en las hojas (SELWAL, N. et al., 2022). Las especies con mayor capacidad de producir polifenoles, serán capaces de tolerar más altas temperaturas. Por otra parte, la transpiración y la fotosíntesis se reducen en esta situación, al igual que la germinación de las semillas, el peso fresco y la tasa de crecimiento de los brotes.

El estrés salino también hace incrementar los niveles de metabolitos secundarios como compuestos fenólicos y carotenoides en el trigo sarraceno. Se han podido obtener a un bajo coste híbridos estables del alforfón capaces de tolerar suelos con altas concentraciones de sal mediante el uso de etil metil sulfona (SELWAL, N. et al., 2022). Para proteger el cultivo de este tipo de suelos también se puede utilizar uniconazol, un derivado del triazol, que es un antitranspirante que ayuda a incrementar el contenido de agua en el interior de la planta por el cierre de los estomas (SELWAL, N. et al., 2022). Por ende, también ayudaría a reanudar las tasas normales de fotosíntesis en las situaciones comentadas anteriormente.

Quinoa

La demanda creciente de este cultivo ha impulsado la producción del mismo en zonas como África, Europa o Norteamérica, teniendo en cuenta que las especies de quinoa se caracterizan por su gran diversidad y adaptabilidad, pero para que éstos sean prolíferos hay que tener en cuenta ciertos aspectos para que los rendimientos sean similares a aquellos en su lugar de origen.

La quinoa, mostrada en detalle en la Figura 25, es altamente sensible al fotoperiodo, y, en las zonas andinas, la floración y crecimiento del grano se realizan en días de pocas horas de luz. Por ello, el cultivo en áreas donde los días son más largos en ésta época hacen reducir el rendimiento y la calidad del grano. Por otra parte, la quinoa es capaz de tolerar heladas y calor hasta 35°C, pero es sensible a temperaturas mayores, como las registradas en África y algunos lugares del Mediterráneo.

Estos obstáculos pueden salvarse con programas de hibridación y selección de variedades. Si se tiene en cuenta que hay unas 6000 variedades de quinoa en todo el mundo, hay un gran potencial de encontrar características genéticas distintivas y que pueden ser explotadas en estos programas (GRAZIANO, S. et al, 2022).



Figura 25: Granos de quinoa (fuente propia)

En general, los estudios genéticos se han centrado en entender la diversidad de sus genes y en la evolución a lo largo de la historia, pero pocos intentos se han realizado en la mejora molecular de este pseudocereal. Aquellos programas de mejora e hibridación se han llevado a cabo buscando el aumento de productividad de los cultivos, así como la búsqueda de quinoa con bajo contenido en saponina. Usando plataformas de nueva generación, tres equipos de investigación completaron la secuenciación del genoma de la quinoa, haciéndose patente la amplia variabilidad de las accesiones (RODRIGUEZ, J.P. et al, 2020).

Los genes TSARL1 y TSARL2 involucrados en la regulación de la producción de saponinas fueron aislados secuenciando el genoma de la variedad quinoa Costal, producida principalmente en Chile (GRAZIANO, S. et al, 2022). Estos genes han sido muy utilizados como marcadores en los programas de selección de semillas y desarrollo de quinoa no amarga. La calidad de las proteínas de la quinoa radica en el alto contenido en lisina debido al alto número de genes que convierten el aspartato en este aminoácido (RODRIGUEZ, J.P. et al, 2020). También se ha encontrado que el alto contenido de vitaminas B y E es debido al alto número de enzimas codificadoras de genes que producen la biosíntesis de vitamina B6 y dihidrofolato (RODRIGUEZ, J.P. et al, 2020).

La tolerancia a la sequía se ha analizado en dos genotipos de quinoa utilizando el instrumento HiSeq 2000 de la marca Illumina, con el que se pudo identificar los genes y las rutas con las que la quinoa hace frente a este estrés abiótico (RODRIGUEZ, J.P. et al, 2020). Estudios llevados a cabo en países áridos como Marruecos, Egipto o Emiratos Árabes Unidos demuestran que el estrés salino no afecta al rendimiento y calidad de la quinoa. Así, puede ser regada con agua que contenga altas concentraciones de sal. Dependiendo de dicha concentración, la longitud y morfología de las raíces y partes aéreas se ajusta, así como los pesos frescos y secos, ya que la quinoa tolera la sal debido al ajuste osmótico y la diferente capacidad de acumulación de iones en las diversas partes de la planta. Otros genes secuenciados han sido aquellos que regulan el equilibrio del ácido abscísico, secuestro iónico, etc, y que también ayudan a tolerar el estrés abiótico (RODRIGUEZ, J.P. et al, 2020).

Amaranto

Desde una perspectiva agronómica, el amaranto ha sido poco estudiado. El rendimiento del cultivo varía ampliamente y depende del lugar de cultivo y del genotipo. La densidad plantada es crucial para maximizar este rendimiento, pero no hay bibliografía disponible sobre técnicas agrícolas. Por ello, el objetivo principal de los programas de selección del amaranto es facilitar la cosecha y reducir las pérdidas de semillas, reduciendo para ello la altura de la planta y la posibilidad de rotura de los granos.

Otro objetivo es la creación de híbridos. Teniendo en cuenta que el amaranto es autógamo con una estructura floral única que limita la efectividad de los procedimientos convencionales, se opta por la provocación de la esterilidad masculina de una manera genética como vía para producir estos híbridos.

También se ha llevado a cabo la investigación sobre el comportamiento del amaranto en lugares fuera de su lugar nativo, encontrando que es posible su producción en el este de Canadá aunque con un rendimiento menor del obtenido en Europa. La limitación principal es la identificación de accesiones que encajen en el clima del área seleccionada para el cultivo.



Figura 26: Granos de amaranto (fuente propia)

La secuenciación completa del *Amaranthus hypochondriacus* (mostrado en detalle en la Figura 26), se completó recientemente, aunque los trabajos genéticos sobre esta planta están mucho menos desarrollados que aquellos para la quinoa o el alforfón (GRAZIANO, S. et al, 2022). *A. hypochondriacus* tiene una gran diversidad genética frente al *A. cruentus*. El análisis de transcriptoma del *A. hypochondriacus* generó información para entender el mecanismo y los genes involucrados en la adaptación de las especies frente los estreses medioambientales. También se generó la hipótesis de que el alto contenido en lisina del amaranto es debido a la presencia de solo un gen ortólogo de aspartato kinasa 1 y alta expresión del gen dihidrodipicolinato sintasa (DHDPS) en las semillas (RODRIGUEZ, J.P. et al, 2020).

Los mecanismos responsables de la tolerancia a la salinidad implican tolerancia al estrés osmótico e iónico. El estrés osmótico causa inhibición de la absorción de agua debido al alto contenido salino en el suelo que recubre las raíces. Para poder hacer frente a esta situación, se puede hacer un reajuste osmótico por el cual las plantas acumulan solutos orgánicos e inorgánicos en las raíces, reduciendo así la diferencia entre ambos medios. Otros mecanismos son por ejemplo reducir la pérdida de agua por transpiración, que depende de la densidad y capacidad de cierre de los estomas.

Por otra parte, el estrés iónico lo abordan mejor las plantas halófitas, y está relacionada con la acumulación de sodio en las hojas. Si bien esta situación está muy estudiada en la quinoa, también es interesante investigarla en el amaranto. La quinoa tiene gran capacidad para ajustar el potencial osmótico y mantener la transpiración sin cambios. El amaranto por el contrario, actúa reduciendo la cantidad de agua perdida por las partes aéreas. Además, el amaranto también muestra un alto ratio de agua en raíces frente a las hojas, mayor que en la quinoa, acumulando por tanto menor cantidad de sales en dicha zona (ESTRADA, Y. Et al, 2021).

5. Conclusiones

El reto de la agricultura actual y desde la Revolución verde sigue siendo conseguir aumentar la producción de alimentos seguros, con la particularidad de que se deben buscar formas de hacerlo de manera sostenible. Se necesita no solo por el aumento de población mundial, si no por la demanda de alimentos más nutritivos, de alta calidad y, si pueden ser, funcionales y nutracéuticos. Sin embargo, la agricultura intensiva ha conllevado daños en los ecosistemas y, la sequía actual, no ayuda en este sentido. Además, las reservas de agua en los suelos y acuíferos serán cada vez menores si aumenta la demanda de la población e industrial por este recurso.

Por ello se requiere el uso de técnicas de agricultura sostenible que devuelvan al suelo sus propiedades y fertilidad de una manera más natural así como rotación de cultivos y uso de variedades adaptadas a menor irrigación y altas temperaturas. No es sostenible seguir basando nuestra alimentación en 5 cereales mayoritarios, se debe volver a tener mayor biodiversidad en los ecosistemas y una dieta más variada.

Tolerancia a las diferentes formas de estrés abiótico se puede encontrar en plantas autóctonas de regiones áridas, ancestros salvajes de los cultivos actuales, etc. Se caracterizan por tener mayor diversidad genética así como hibridaciones con alta resiliencia. Los mayores handicaps son debidos a la falta de agua, en concreto la sequía, temperaturas altas y suelos salinos.

Los granos ancestrales que cayeron en desuso por sus bajos rendimientos son prometedores para esta misión. Presentan mayor adaptabilidad a las condiciones, por ejemplo, los trigos antiguos requieren pocos recursos y son resistentes a algunas enfermedades. Algunos como el einkorn y el emmer son originarios de zonas áridas como Turquía o Egipto, como el teff, que también encuentra su desarrollo en zonas cálidas como Etiopía. Las estrategias de estas plantas para soportar estos climas se basan en la reducción de la actividad fotosintética y en la arquitectura radicular.



Figura 27: Pseudocereales: amaranto, trigo sarraceno y quinoa (fuente propia)

La quinoa y el amaranto por su parte, se pueden cultivar en áreas con temperaturas extremas, estrés hídrico y suelos salinos como son las regiones andinas. Las estrategias que tienen ambos se basan por una parte en la actividad de la hormona ácido abscísico combinada con el reajuste osmótico en el interior de la planta en la quinoa y cerramiento de los estomas en el amaranto. El trigo sarraceno también fuerza el cerramiento de los estomas junto con una bajada de la actividad fotosintética. Amaranto, trigo sarraceno y quinoa se pueden observar en la Figura 27.

Otros menos extendidos y en general, presentes en la zona Andina, requieren de mayor estudio y desarrollo de técnicas agrícolas para la exportación de estos cultivos a otras áreas. Asimismo, quedan a disposición todas las semillas en los bancos de genes para la búsqueda de variedades con potencial.

Nutricionalmente, el contenido de carbohidratos de todos los granos ancestrales estudiados no difiere en gran medida, estando entre 64% - 72%, valores menores que otros cereales cultivados en intensivo como el maíz (85%), arroz (76,5%) y trigo aestivum (75%). Estos contenidos se compensan con las proteínas, que en los granos ancestrales varían entre 12,8% - 15,5%, valores mayores que en los cereales modernos como el maíz (7,4%), arroz (7,2%) y trigo aestivum (10,7).

Los contenidos en grasa de los pseudocereales son mayores que en el resto, sobre todo en quinoa y amaranto, con un 6,5% aproximadamente frente a un 2,5% que de media tienen los trigos. En el caso de la quinoa, son ricas en ácidos linoleico y linolénico. El trigo sarraceno y la quinoa poseen el antinutriente ácido fítico, y el sarraceno además es conocido por ser alérgeno. Junto con el amaranto, se pueden utilizar en forma de harina en panificación y repostería cuidando las cantidades, ya que tienen un sabor fuerte.

Los trigos antiguos tienen gluten pero los pseudocereales no, siendo aptos para dietas celiacas. Al ser consumidos de manera integral, proporcionan los nutrientes contenidos en estas capas externas (minerales, compuestos fenólicos etc). Sin embargo, hay que tener presente que con algunos procesos de las elaboraciones culinarias, como el lavado y cocción a temperaturas elevadas, se pierde parte de estos compuestos antioxidantes. Ocurre de manera similar durante las moliendas y otros procedimientos como el perlado de la quinoa para retirar la saponina que causa amargor. La extrusión puede ser un método eficiente para eliminar sabores intensos de las harinas de estos pseudocereales manteniendo el nivel de compuestos fenólicos, ya que se ha podido comprobar que no es un tratamiento tan intenso como para mermar el nivel de los mismos.

Los trigos antiguos einkorn y emmer presentan mayor contenido fenólico que el trigo durum. En la familia de los trigos, los ácidos transferúlico y p-cumárico son los que más destacan, seguidos por el hidroxibenzoico y el vainillínico. Este perfil difiere de los pseudocereales, en los cuales, también juegan un papel importante la presencia de flavonoides.

Estos valores disponibles en bibliografía se muestran resumidos en la Tabla 13. Hay que tener en cuenta que proceden de estudios separados y cuyas técnicas de extracción y análisis pueden hacer que sean poco comparables. Es necesaria una investigación conjunta de los 3 pseudocereales mayoritarios con el mismo método y teniendo en cuenta factores como variedad del cultivo y zona de origen, factores que modifican los valores nutricionales de los alimentos.

Tabla 13: Resumen del contenido fenólico y flavonoideo en pseudocereales

| | Trigo sarraceno contenido µg/g peso fresco | Quinoa contenido µg/g base seca | Amaranto contenido µg/g peso fresco |
|-----------------------------|---|--|--|
| Fenoles del benzóico | | | |
| Ácido p-hidroxibenzoico | 19,6 | 2,2 | 2,2 |
| Ácido vanílico | 1,2 | 8,8 | 1,8 |
| Fenoles del cinámico | | | |
| Ácido p-cumárico | 1,74 | 0,9 | - |
| Ácido ferúlico | 4,37 | 5,7 | - |
| Flavonoides | | | |
| Quercitina | ND | 2,3 | - |
| Kaempferol | 0,95 | 1,5 | - |
| Rutina | 131,2 | - | 4 |

En cualquier caso, los contenidos fenólicos totales de los pseudocereales se encuentran en el rango 35-65 mg/100 g en base seca, menor que en la familia de los trigos que está en torno a 130 mg/100 g. Sin embargo, este valor en los trigos hay que tener en cuenta que es de la semilla integral, y las harinas y

elaboraciones habituales se realizan con harinas refinadas. Se requiere por tanto investigación comparativa de estos valores en las harinas comerciales, tanto integrales como refinadas, ya que además, como se ha comentado anteriormente, la molienda también puede afectar a estos valores.

Se ha observado en el trigo sarraceno que, en presencia de suelos salinos, con alto contenido en aluminio o en climas con altas temperaturas, es capaz de aumentar su contenido fenólico y antioxidante, como medio de resistencia. Pudiera ser ésta la misma razón para quinoa y amaranto, que consiguen salir adelante en situaciones similares, pero al ser cultivos menos extendidos, no hay investigación al respecto.

Los contenidos fenólicos elevados en los trigos antiguos implican mayor capacidad antioxidante y protectora frente al estrés oxidativo comparada con una dieta basada en otros cereales. Asimismo, se han demostrado propiedades antiinflamatorias del intestino humano en dietas a base de trigo khorasan y einkorn. Las mismas razones se pueden atribuir a los pseudocereales por la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides en sus semillas, pero no se ha encontrado investigación al respecto. El potencial anticancerígeno del trigo sarraceno se estudió sin llegar a resultados concluyentes. Puede ser que estos cultivos sean fuente de antioxidantes para su extracción y uso en otras industrias como concentrados (farmacéutica, cosmética e incluso alimentaria para alimentos funcionales y nutracéuticos), pero contenidos en el alimento como tal no sean suficientes como para implicar mejoras en el bienestar y la salud. Se requiere mayor investigación para obtener el perfil de compuestos fenólicos de diferentes pseudocereales con un mismo método analítico y comparativa en formas de harina (integral y refinada) con la familia del trigo.

La germinación es el método más efectivo para mejorar la composición nutricional de los granos antiguos. En este proceso ocurren cambios significativos a nivel bioquímico, nutricional y sensorial debido a la activación de ciertas enzimas. Los brotes obtenidos son superiores nutricionalmente que las semillas de origen, con mayores contenidos en nutrientes y compuestos fenólicos, mayor cantidad de proteína, mejor disposición a la digestibilidad de los almidones y menos presencia de antinutrientes (ZHANG, G. et al., 2015).

En definitiva, los granos ancestrales son cultivos prometedores para generar alimentos en aquellas zonas con condiciones edafoclimáticas extremas y fomentar la biodiversidad de especies vegetales en los campos. Su perfil nutricional es similar a los cereales cultivados en intensivo como el maíz, arroz y los trigos durum y aestivum, si bien contienen menos hidratos de carbono y más proteínas. En todos ellos se identifican ácidos fenólicos y flavonoides, compuestos antioxidantes, que pueden ser menguados tras procesos de elaboración como la cocción pero potenciados mediante germinación. Se debe promocionar su cultivo y producción, haciendo campañas para fomentar su consumo y depender menos de otros cereales intensivos. Además, se requieren estudios agronómicos para mejorar los rendimientos de las parcelas actuales, optimizar las producciones y poder trasladarlos a otros lugares para acortar las cadenas de suministro.

Finalmente, será necesario seguir investigando aquellos genes de los granos ancestrales que los hace tolerantes a los climas extremos. Puede que esta sea la única vía para poder generar híbridos o mutantes de los cultivos intensivos actuales y que estas producciones puedan subsistir en un futuro reciente en el que las nuevas condiciones edafoclimáticas habrán cambiado los ecosistemas.

6. Bibliografía

- Ahmed, H.I., Heuberger, M., Schoen, A. *et al.* Einkorn genomics sheds light on history of the oldest domesticated wheat. *Nature* 620, 830–838 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06389-7>
- Ahumada, A., Ortega, A., Chito, D., & Benítez, R. (2016). Saponinas de Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Un subproducto con alto potencial biológico. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 45(3), 438–469. <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v45n3.62043>
- Alonso-Miravalles, L., & O'Mahony, J. A. (2018). Composition, Protein Profile and Rheological Properties of Pseudocereal-Based Protein-Rich Ingredients. *Foods (Basel, Switzerland)*, 7(5), 73. <https://doi.org/10.3390/foods7050073>
- Ameen, A., & Raza, S. Green (2018) Revolution: A Review. *International Journal of Advances in Scientific Research*. Vol. 3, n. 12, p. 129 -137.
- Amin, I., Norazaidah, Y., & Hainida, K. I. E. (2006). Antioxidant activity and phenolic content of raw and blanched *Amaranthus* species. *Food Chemistry*, 94(1), 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.10.048>
- Balla, M. Y., Gorafi, Y. S., Kamal, N. M., Abdalla, M. G., Tahir, I. S., & Tsujimoto, H. (2022). Exploiting wild emmer wheat diversity to improve wheat A and B genomes in breeding for heat stress adaptation. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.895742>
- Barba de la Rosa, A. P., Fomsgaard, I. S., Laursen, B., Mortensen, A. G., Olvera-Martínez, L., Silva-Sánchez, C., Mendoza-Herrera, A., González-Castañeda, J., & De León-Rodríguez, A. (2009). Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) as an alternative crop for sustainable food production: Phenolic acids and flavonoids with potential impact on its nutraceutical quality. *Journal of Cereal Science*, 49(1), 117–121. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.07.012>
- Benincasa, P., Galieni, A., Manetta, A. C., Pace, R., Guiducci, M., Pisante, M., & Stagnari, F. (2014). Phenolic compounds in grains, sprouts and wheatgrass of hulled and non-hulled wheat species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(9), 1795–1803. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6877>
- Boukid, F., Folloni, S., Sforza, S., Vittadini, E., & Prandi, B. (2018). Current trends in ancient grains-based foodstuffs: Insights into nutritional aspects and technological applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(1), 123–136. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12315>
- Carciochi, R. A., Manrique, G. D., & Dimitrov, K. (2014). Changes in phenolic composition and antioxidant activity during germination of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.). *International Food Research Journal*, 21(2), 767-773. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/11336/33691/1/CONICET_Digital_Nro.11568.pdf
- Cheng, A., Mayes, S., Dalle, G., Demissew, S. and Massawe, F. (2017), Diversifying crops for food and nutrition security – a case of teff. *Biol Rev*, 92: 188-198. <https://doi.org/10.1111/brv.12225>.
- Colomer, J. (2023, 20 marzo). *Trigo sarraceno: qué es, beneficios para la salud, apto para celíacos*. Blog de Fitness, nutrición, salud y deporte. Blog HSN. <https://www.hsnstore.com/blog/nutricion/plantas/trigo-sarraceno/> Fecha visita 16-12-23
- Cooper R. (2015). Re-discovering ancient wheat varieties as functional foods. *Journal of traditional and complementary medicine*, 5(3), 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2015.02.004>

Estrada, Y., Fernández-Ojeda, A., Morales, B., Egea-Fernández, J. M., Flores, F. B., Bolarín, M. C., & Egea, I. (2021). Unraveling the strategies used by the underexploited amaranth species to confront salt stress: similarities and differences with quinoa species. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.604481>

Gómez Pallarés, M. et al. Grupo de investigación y blog sobre cereales, legumbres y otros granos INNOGRAIN España, 2023. [On line]. Disponible en; <https://innograin.uva.es/>

Graziano, S., Agrimonti, C., Marmiroli, N., & Gullì, M. (2022). Utilisation and limitations of pseudocereals (quinoa, amaranth, and buckwheat) in food production: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 125, 154-165. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.007>

Haros, C. M., Sammán, N., Reguera, M., & Paredes-López, O. (2023). *Latin-American seeds: Agronomic, Processing and Health Aspects*. CRC Press. ISBN: 9780367531454

Hou, Z., Yin, J., Lü, Y., Song, J., Wang, S., Wei, S., Liu, Z., Zhang, Y., & Fang, Z. (2019). Transcriptomic analysis reveals the temporal and spatial changes in physiological process and gene expression in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum moench*) grown under drought stress. *Agronomy*, 9(10), 569. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100569>

Housing News. (2023, 9 julio). *Chia seeds plant: Facts, benefits, uses and maintenance tips*. <https://acortar.link/HWclhh> Fecha visita 16-12-23

Iji, P., Omede, A. A., Abdallah, M. E., & Ahiwe, E. U. (2019). The role of specific cereal grain dietary components in poultry gut function. En *Burleigh Dodds series in agricultural science* (pp. 493-514). <https://doi.org/10.19103/as.2019.0059.23>

IICA, IICA y CEDAF realizan taller sobre sacha inchi. (s.f.). IICA.INT. <https://acortar.link/5G9QRm>. Fecha visita 16-12-23

Jancurová, M., Minarovičová, L., & Dandár, A. (2009). Quinoa - a review. *Czech Journal of Food Sciences*, 27(2), 71-79. <https://doi.org/10.17221/32/2008-cjfs>

Karamać, M., Gai, F., Longato, E., Meineri, G., Janiak, M., Amarowicz, R., & Peiretti, P. G. (2019). Antioxidant activity and phenolic composition of amaranth (*Amaranthus caudatus*) during plant growth. *Antioxidants*, 8(6), 173. <https://doi.org/10.3390/antiox8060173>

Kreft, M. (2016). Buckwheat phenolic metabolites in health and disease. *Nutrition Research Reviews*, 29(1), 30-39. <https://doi.org/10.1017/s0954422415000190>

Klimczak, I., Małeczka, M., & Pacholek, B. (2002). Antioxidant activity of ethanolic extracts of amaranth seeds. *Nahrung*, 46(3), 184. [https://doi.org/10.1002/1521-3803\(20020501\)46:3](https://doi.org/10.1002/1521-3803(20020501)46:3)

Knez, Ž, Chen, L., Ivanovski, M. & Cör, D. (2019). Chia seeds (*Salvia hispanica* L.): An Overview—Phytochemical Profile, isolation Methods, and Application. *Molecules*, 25(1), 11. <https://doi.org/10.3390/molecules25010011>

Liu, Q., Xu, Y., Zhang, P., Na, Z., Tang, T., & Shi, Y. (2014). Chemical composition and oxidative evolution of Sacha inchi (*Plukenetia volubilis*) oil from Xishuangbanna (China). *Grasas Y Aceites*, 65(1), e012. <https://doi.org/10.3989/gya.075713>

Longin, C. F. H., & Würschum, T. (2016). Back to the Future - Tapping into Ancient Grains for Food Diversity. *Trends in plant science*, 21(9), 731–737. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.05.005>

Maccaferri, M., Harris, N. S., Twardziok, S., Pasam, R. K., Gundlach, H., Spannagl, M., Ormanbekova, D., Lux, T., Prade, V. M., Milner, S. G., Himmelbach, A., Mascher, M., Bagnaresi, P., Faccioli, P., Cozzi, P., Lauria, M., Lazzari, B., Stella, A., Manconi, A., . . . Cattivelli, L. (2019). Durum wheat genome highlights past domestication signatures and future improvement targets. *Nature Genetics*, 51(5), 885-895. <https://doi.org/10.1038/s41588-019-0381-3>

Mahmood, M. A., & Mansoor, S. (2023). Einkorn genomics reveals ancient roots of domesticated wheat. *Cell genomics*, 3(9), 100406. <https://doi.org/10.1016/j.xgen.2023.100406>

Maitezudaire. (2008, 3 noviembre). *El amaranto, una planta con beneficios dietéticos*. *EROSKI Consumer*. <https://www.consumer.es/alimentacion/el-amaranto-una-planta-con-beneficios-dieteticos.html>. Fecha visita 16-12-23

Melo, D., Nunes, M. A., Santo, L. E., Machado, S., Costa, A. S., Álvarez-Ortí, M., Pardo, J. E., Oliveira, M. B. P., & Alves, R. C. (2023). Characterization of chia seeds, Cold-Pressed Oil, and defatted cake: an ancient grain for modern food production. *Molecules*, 28(2), 723. <https://doi.org/10.3390/molecules28020723>

Merchuk-Ovnat, L., Fahima, T., Krugman, T., & Saranga, Y. (2016). Ancestral QTL alleles from wild emmer wheat improve grain yield, biomass and photosynthesis across environments in modern wheat. *Plant Science*, 251, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.05.003>

Nevo, E. (2014). Evolution of wild emmer wheat and crop improvement. *Journal of Systematics and Evolution*, 52(6), 673-696. <https://doi.org/10.1111/jse.12124>

Paredes-López, O. (2018). Amaranth biology, chemistry, and technology. En *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/9781351069601>

Pilco-Quesada, S., Tian, Y., Yang, B., Repo-Carrasco-Valencia, R., & Suomela, J. (2020). Effects of germination and kilning on the phenolic compounds and nutritional properties of quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Cereal Science*, 94, 102996. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102996>

Quintana Fuentes, L. F., Jurado Cortés, N. B. ., Quintero, L. A. ., León Virgüez, C., & Gutiérrez Rodríguez, M. L. . (2021). El amaranto propiedades y usos en la industria panadera. *Documentos De Trabajo ECBTI*, 2(2). <https://doi.org/10.22490/ECBTI.5494>

Repo-Carrasco-Valencia, R., & Tomás, M. C. (2022). Native crops in Latin America. En *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/9781003087618>

Rodríguez, J. ´., Rahman, H., Thushar, S., & Singh, R. K. (2020). Healthy and Resilient Cereals and Pseudo-Cereals for Marginal agriculture: Molecular Advances for improving Nutrient Bioavailability. *Frontiers in Genetics*, 11. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00049>

Selwal, N., Bedi, M., Hamid, S., & Pujari, M. (2022). Buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) Response and Tolerance to Abiotic Stress. En *Omics approach to manage abiotic stress in cereals* (pp. 575-597). https://doi.org/10.1007/978-981-19-0140-9_24

Şensoy, İ., Rosén, R., Ho, C., & Karwe, M. V. (2006). Effect of processing on buckwheat phenolics and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 99(2), 388-393. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.08.007>

Shahidi, F., & Naczki, M. (2003). Phenolics in food and nutraceuticals. En *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/9780203508732>

Truzzi, F., Dinelli, G., Spisni, E., Simonetti, E., Trebbi, G., Bosi, S., & Marotti, I. (2019). Phenolic acids of Modern and Ancient Grains: Effect on in vitro cell model. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(11), 4075-4082. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9796>

TvAgro. (2016, 20 septiembre). *Investigación del cultivo de quinua y sus variedades - TVAgro por Juan Gonzalo Angel* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=r7ILtay9mAc> Fecha visita 16-12-23

University of Bern, *Eragrostis TEF genome*. (s.f.). <https://www.tef-research.org/genome.html> Fecha visita 16-12-23

USDA Food Composition Database. United States Department of Agriculture. EEUU, 2023. [On line], Disponible en: <http://ndb.nal.usda.gov/>.

Wang, Z., Miao, L., Chen, Y., Peng, H., Ni, Z., Sun, Q., & Guo, W. (2023). Deciphering the evolution and complexity of wheat germplasm from a genomic perspective. *Journal of Genetics and Genomics*, 50(11), 846-860. <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2023.08.002>

Wijngaard, H. H., & Arendt, E. K. (2006). Buckwheat. *Cereal Chemistry*, 83(4), 391-401. <https://doi.org/10.1094/cc-83-0391>

Zamaratskaia, G., Gerhardt, K., & Wendin, K. (2021). Biochemical characteristics and potential applications of ancient cereals - an underexploited opportunity for sustainable production and consumption. *Trends in Food Science and Technology*, 107, 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.006>

Zhang, G., Xu, Z., Gao, Y., Xiao-Rong, H., Zou, Y., & Yang, T. (2015). Effects of germination on the nutritional properties, phenolic profiles, and antioxidant activities of buckwheat. *Journal of Food Science*, 80(5). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12830>