



Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) endurecido y alternativas tecnológicas para su aprovechamiento en la industria alimentaria*

Hardened beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and technological alternatives for their utilization in the food industry

Tania Chacón-Ordóñez¹, Stefanny Campos-Boza², Paola Gamboa-Moreno¹, Néstor Felipe Chaves-Barrantes³,
Óscar Acosta-Montoya¹

* Recepción: 22 de abril, 2024. Aceptación: 9 de septiembre, 2024. Esta revisión se realizó en el marco del proyecto de investigación “Valorización de variedades de frijol criollas subutilizadas y frijol endurecido: desarrollo de producto y mejora de operaciones relacionadas con el proceso térmico”, 735-B9-608.

¹ Universidad de Costa Rica, Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CITA). San Pedro, Montes de Oca, San José, Costa Rica. tania.chacon@ucr.ac.cr (autor para la correspondencia; <https://orcid.org/0009-0000-7489-1094>); paomgm@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-5223-2581>); oscar.acosta@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0001-8156-6556>).

² Universidad de Costa Rica, Centro para Investigaciones en Granos y Semillas. San Pedro, Montes de Oca, San José, Costa Rica. stefanny.campos@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-6408-8043>).

³ Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno. La Garita, Alajuela, Costa Rica. nestor.chaves@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0001-8465-8130>).

Resumen

Introducción. Los frijoles (*Phaseolus vulgaris* L.) son una de las leguminosas más consumidas a nivel mundial debido a su alto valor nutricional, en particular por su contenido de proteínas y minerales. Uno de los aspectos a considerar en la calidad de los granos de frijol es su correcto almacenamiento para evitar el desarrollo de problemas como el endurecimiento. Este fenómeno tiene como consecuencia un aumento en el tiempo de cocción del grano, disminuye su palatabilidad, impacta su valor nutricional y la aceptación por parte del consumidor. Debido a ello, no solo es necesario entender las causas y mecanismos por los cuales se desarrolla esta problemática, sino también identificar alternativas tecnológicas que permitan utilizar los frijoles endurecidos. **Objetivo.** Analizar los cambios estructurales que se dan en el grano y causan el endurecimiento del frijol, así como tratamientos que potencien el aprovechamiento del frijol endurecido en la industria alimentaria. **Desarrollo.** Este trabajo se realizó entre noviembre de 2023 y julio de 2024; se hizo una búsqueda exhaustiva y se resumieron las principales hipótesis aceptadas que explican el endurecimiento en los granos de frijol, entre ellas, la pectina-cación-fitato, lignificación y proteína-almidón, y las causas y consecuencias de este fenómeno. Además, se buscaron alternativas de pretratamientos y tratamientos que se efectúan como parte del procesamiento a nivel industrial de los frijoles y que han sido aplicados o son alternativas prometedoras para procesar frijoles endurecidos; entre ellos, se explora el uso de cocción, microondas, autoclavado, germinación y otras técnicas más novedosas como el uso de altas presiones hidroestáticas. **Conclusiones.** El endurecimiento del frijol es un problema multifactorial que plantea desafíos para productores y consumidores. Es esencial la implementación de tratamientos que permitan aprovechar los frijoles endurecidos. Aunque diversos tratamientos muestran potencial, se necesita más investigación para ofrecer soluciones efectivas para la industria alimentaria.

Palabras clave: leguminosas, fabáceas, procesos tecnológicos, industria agroalimentaria, cocción difícil, almacenamiento.



Agronomía Mesoamericana es desarrollada en la Universidad de Costa Rica bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para más información escriba a pccmca@ucr.ac.cr o pccmca@gmail.com

Abstract

Introduction. Common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) are one of the most widely consumed legumes worldwide due to their high nutritional value, particularly for their protein and mineral content. One critical aspect of bean quality is proper storage, which is essential to prevent issues such as hardening. This phenomenon leads to increased cooking time, reduced palatability, lower nutritional value, and decreased consumer acceptance. Therefore, it is not only necessary to understand the causes and mechanisms behind bean hardening but also to identify technological alternatives to utilize hardened beans effectively. **Objective.** To analyze the structural changes in beans that lead to hardening, and to evaluate treatments that enhance the use of hardened beans in the food industry. **Development.** This study was conducted from November 2023 to July 2024. It involved an exhaustive review and summary of the main accepted hypotheses explaining bean hardening, including the pectin-cation-phytate theory, lignification, and protein-starch interactions, as well as the causes and consequences of this phenomenon. Additionally, the study explored pre-treatment and processing techniques used in industrial bean production, highlighting promising approaches for processing hardened beans. These include cooking, microwaving, autoclaving, germination, and innovative methods such as high hydrostatic pressures. **Conclusions.** Bean hardening is a multifactorial issue posing challenges for producers and consumers alike. Implementing treatments to utilize hardened beans is essential. While various treatments show potential, further research is needed to develop effective solutions for the food industry.

Keywords: legumes, Fabaceae, technological processes, agri-food industry, hard-to-cook, storage.

Introducción

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es una de las cinco especies del género *Phaseolus* domesticadas hace miles de años en el continente americano. Este grano constituye un pilar en la alimentación a nivel global con una producción a nivel mundial que alcanzó los 28,3 millones de toneladas en el 2022, según datos de la FAO (Food and Agriculture Organization [FAO], n.d.). Además, es considerado la principal fuente de proteína vegetal para comunidades de menores ingresos y condiciones socioeconómicas más limitadas (Havemeier et al., 2017). El frijol, supera a la mayoría de los cereales y legumbres como fuente importante de carbohidratos, vitaminas como tiamina y niacina, minerales, fibra, ácidos grasos polinsaturados y aminoácidos esenciales (Los et al., 2018).

Los granos de frijol son considerados alimentos funcionales por ser ricos en compuestos bioactivos que son beneficiosos para la salud. Entre ellos destacan los compuestos fenólicos, que actúan como antioxidantes y antiinflamatorios, así como los fitatos, flavonoides, cumarinas, triterpenos, lignanos y oligosacáridos. Estos compuestos han sido identificados por su potencial antitumoral y su capacidad para reducir el riesgo de enfermedades crónico-degenerativas, diabetes, sobrepeso, enfermedades cardiovasculares y digestivas (Acuña-Gutiérrez et al., 2019).

Dada la importancia, demanda y versatilidad que presenta el frijol como alimento, es necesario disponer de granos de calidad que permitan fortalecer la seguridad alimentaria de la población. Es por ello, que su comercialización se rige por estándares nacionales de calidad que determinan los valores máximos permitidos para cada factor o atributo físico, así como los métodos de análisis necesarios para evaluar los granos. Estos estándares se determinan mediante la aplicación de Reglamentos Técnicos y Decretos Nacionales en Costa Rica (Poder Ejecutivo, 2004), los cuales son de acatamiento obligatorio para la industrialización, importación y comercialización de los granos. Estos dictaminan los tiempos de cocción establecidos para los frijoles, su calidad e integridad física y su inocuidad.

La textura, el sabor y el tiempo de cocción también son atributos esenciales que determinan la aceptación del consumidor y, si no se gestionan bien, pueden provocar pérdidas significativas para la industria alimentaria (Perera et al., 2023). Se conoce que factores como las características físicas y genéticas del grano, el remojo previo y la temperatura de cocción influyen en estos atributos. Sin embargo, el principal reto para asegurar la calidad del frijol es evitar su endurecimiento. El endurecimiento del frijol es un fenómeno irreversible que prolonga los tiempos de cocción y provoca cambios en el contenido de humedad, disminuye la absorción de agua y afecta la actividad del agua; además, altera la textura, color y sabor del frijol (Nyakuni et al., 2008).

El endurecimiento en frijol puede afectar el contenido de macro y micronutrientes de los granos, y la cocción prolongada para hacerlos palatables puede impactar aún más su perfil nutritivo. Los granos endurecidos presentan mayores niveles de calcio y zinc, pero menores concentraciones de cobre, manganeso, hierro y hasta un 16 % menos de proteína en comparación con los granos no endurecidos (Parmar et al., 2017). Además, las interacciones celulares durante el almacenamiento reducen la bioaccesibilidad de nutrientes. Con respecto a la cocción, aunque los minerales son estables al calor, pueden lixiviarse en el agua de cocción prolongada (Wainaina et al., 2021), y reacciones de entrecruzamiento inducidas por el calor forman complejos insolubles que limitan su digestibilidad (Vaz Patto et al., 2015).

El empleo de buenas prácticas de manejo poscosecha puede ayudar a prevenir el endurecimiento del frijol (Demito et al., 2018). No obstante, es importante comprender cómo se da este proceso y plantear alternativas que valoricen los frijoles endurecidos y los transforme en productos útiles para la industria alimentaria. El objetivo de esta revisión fue analizar factores relevantes que contribuyen al endurecimiento del frijol, y posibles tratamientos que potencien el aprovechamiento de frijol endurecido en la industria alimentaria.

Se realizó una búsqueda de capítulos de libros y artículos en inglés y español de revistas indexadas en las bases de datos en línea Google Scholar y Scopus. Se emplearon palabras clave como: endurecimiento, almacenamiento, *Phaseolus vulgaris*, frijol común, HTC, Hard-to-cook, common beans, hardening, cooking, processing. Además, se revisaron las referencias de los artículos científicos y capítulos de libro consultados y que incluían en el título o palabras claves los términos mencionados.

Causas del endurecimiento en frijol

Los frijoles son leguminosas cuya vida útil puede ser afectada si su manejo poscosecha no es el adecuado. Después de la cosecha, se debe procurar que los granos se sequen y se disminuya su humedad a valores entre 11 % y 13 % (Arias, 1993). Es usual que el secado del grano de frijol se realice bajo el sol, por lo que se debe garantizar que la temperatura de los granos permanezca bajo los 40 °C (Araya Villalobos et al., 2013). El almacenamiento de los granos debe ser a una temperatura ≤ 20 °C, humedad relativa < 60 % y humedad del grano < 13 % (Arias, 1993). Estas condiciones disminuyen las probabilidades de desarrollar el endurecimiento en los frijoles.

Existen dos condiciones que pueden impactar de forma negativa los granos de frijol y provocar su endurecimiento: la cáscara dura, y el fenómeno de cocción difícil. La característica de cáscara dura se debe a la impermeabilidad de la testa del grano de frijol al agua, lo que afecta el proceso de remojo y de cocción. Mientras que, el fenómeno de cocción difícil se debe a la incapacidad del cotiledón para absorber agua durante el proceso de cocción. La cáscara dura se produce cuando los frijoles son almacenados a baja humedad, y el fenómeno de cocción difícil se presenta cuando la humedad en el grano es alta (superior a 15 %) (Liu & Bourne, 1995).

Esta revisión se centrará en el fenómeno de cocción difícil conocido por sus siglas en inglés HTC (Hard-to-Cook), el cual se presenta con mayor frecuencia en regiones tropicales y subtropicales. Este problema, aunque podría ser prevenido, a diferencia de la cáscara dura, es irreversible. Diversos autores coinciden en que el almacenamiento prolongado a elevadas temperaturas mayores a 25 °C y humedades relativas mayores a 65 % en

el ambiente son la principal causa identificada para el endurecimiento y envejecimiento de los granos de frijol (Chigwedere et al., 2019; Perera et al., 2023).

En la cocción de leguminosas, como es el caso de los frijoles, el tratamiento térmico favorece la solubilización de polímeros pécticos que componen las paredes celulares, lo que permite el ablandamiento de los granos. Al presentarse el HTC, este proceso de solubilización de los polímeros en la lamela media se ve retardado, lo que impide la separación de las células del cotiledón (Chigwedere et al., 2018; Wainaina, Lugumira, et al., 2022). Como consecuencia, el tiempo de cocción de estos frijoles se puede ver duplicado y tiene un impacto en la calidad final del producto.

En un estudio reciente, se demostró que el fenómeno de HTC se desarrollaba durante el almacenamiento de granos cuando la temperatura superaba la temperatura de transición vítrea y que la tasa de desarrollo del fenómeno se incrementaba al aumentar la diferencia entre ambas temperaturas. Además, establecieron que una diferencia menor a 20 °C entre la temperatura de almacenamiento y la temperatura de transición vítrea puede limitar el desarrollo de HTC (Kyomugasho et al., 2021). Otro estudio estableció una fuerte correlación entre el desarrollo de HTC y el almacenamiento a temperaturas superiores a la transición vítrea, así como una relación entre la temperatura de almacenamiento y la humedad sobre el tiempo de cocción de los frijoles (Wainaina, Kyomugasho, et al., 2022).

Diversos estudios se han enfocado en determinar las condiciones óptimas para prevenir el desarrollo del fenómeno en frijoles. En uno de ellos, se recomienda almacenar los granos a temperatura < 25 °C y humedad < 6,9 % (Wainaina, Kyomugasho, et al., 2022), mientras que, en otro estudio se indicó que una humedad ≤ 6 % permitiría la estabilidad de los granos hasta 40 °C (Kyomugasho et al., 2021). No obstante, es necesario determinar las condiciones que garanticen la estabilidad de los granos de frijol considerando características inherentes a las variedades de interés.

Las condiciones de almacenamiento son consideradas el factor principal que induce el desarrollo de endurecimiento en frijol, pero otros factores como la genética del grano no deben ser subestimados (Bassett et al., 2020; Cichy et al., 2019). Algunas variedades, como las que poseen la mutación *lpa1* son más propensas desarrollar endurecimiento. Este fenómeno también podría ser desencadenado por la expresión de genes relacionados con la capacidad de retención de agua (WAC) o la cinética de cocción (CKT) (Cominelli et al., 2022). Características genéticas como un mayor porcentaje de cubierta seminal, el grosor de la pared celular y el contenido de fibra del cotiledón también se asocian con un mayor tiempo de cocción en frijoles remojados (Bassett et al., 2020).

Las condiciones de cultivo también podrían impactar los tiempos de cocción de frijoles. En particular en los granos que crecen en zonas con temperaturas promedio de 16,9 °C y con menor precipitación (274,9 mm) (Wang et al., 2017). En concordancia, se encontró que al comparar el desarrollo del HTC en frijoles de la misma variedad, pero cultivados en ambientes diferentes presentaban incrementos de hasta 2,4 veces en el tiempo de cocción (Cichy et al., 2019). Este aumento se dio en frijoles producidos en Morogoro (Tanzania), una zona tropical con altas temperaturas y elevada humedad relativa. También el contenido de calcio presente en el suelo puede inducir el endurecimiento de los granos de frijol (Paredes-López et al., 1989).

El endurecimiento del frijol es consecuencia de diversos cambios a nivel intercelular de índole físico, químico y biológico. Además, involucra reacciones enzimáticas y no enzimáticas que contribuyen al endurecimiento del grano (Parmar et al., 2017). Esto hace que el estudio de los mecanismos involucrados sea complejo de investigar y comprender. Se han sugerido diferentes causas que podrían ser las responsables de este problema en frijoles; no obstante, los mecanismos involucrados en el proceso no han sido descubiertos o descritos en su totalidad. Al respecto, al menos cuatro diferentes hipótesis sobre las causas del endurecimiento de frijol han sido planteadas (Figura 1).

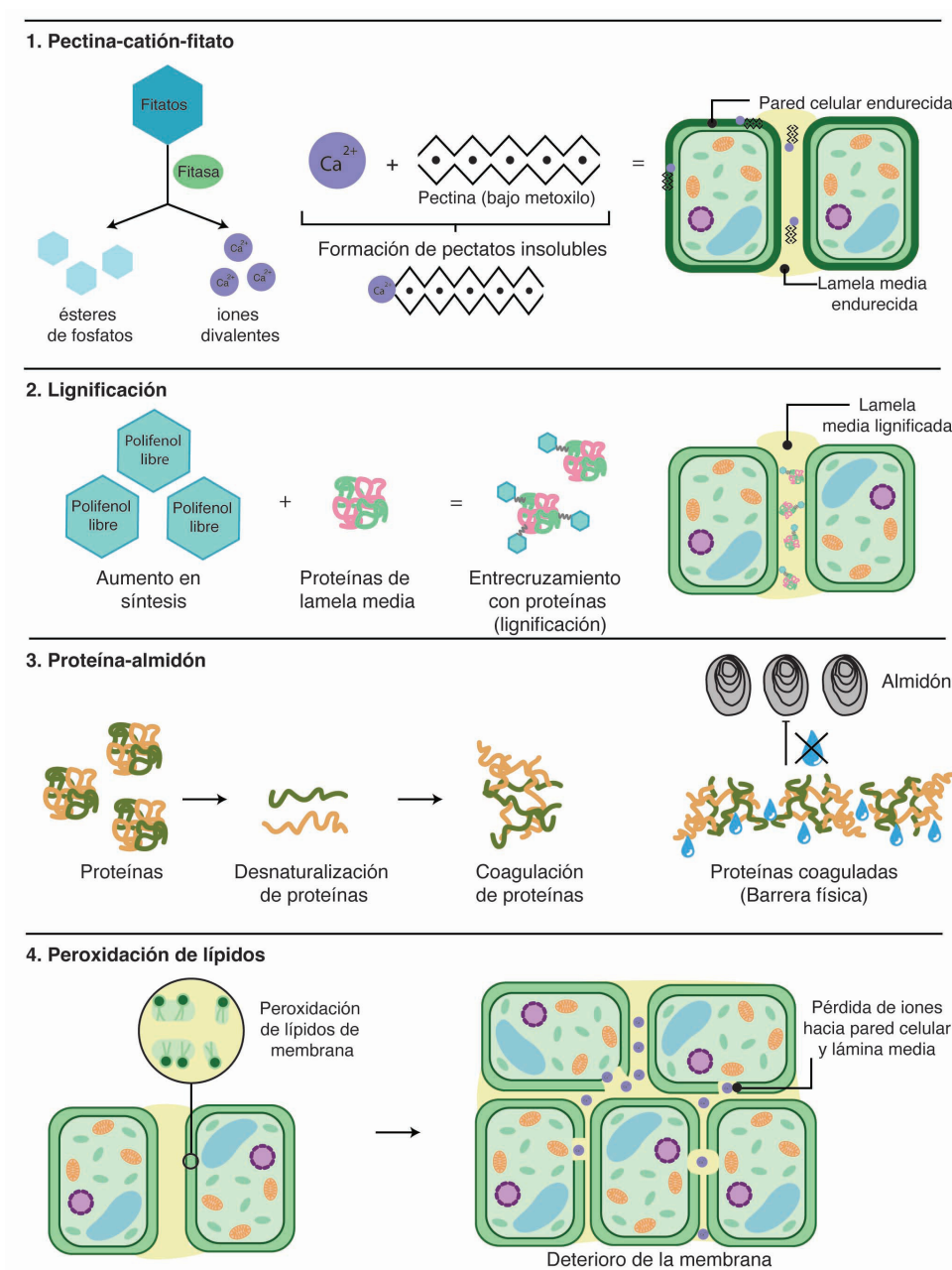


Figura 1. Esquema de las hipótesis que podrían explicar el endurecimiento de los granos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) durante su almacenamiento poscosecha.

PME: Pectinmetilesterasa. Basadas en las hipótesis de Hincks y Stanley (1987), Liu y Bourne (1995), Mattson (1946), Moscoso et al. (1984), Srisuma et al. (1989) y Varriano-Marston y Jackson (1981).

Figure 1. Diagram of the hypotheses that could explain the hardening of bean grains (*Phaseolus vulgaris* L.) during postharvest storage.

PME: Pectin methylesterase. Based on the hypotheses of Hincks and Stanley (1987), Liu and Bourne (1995) Mattson (1946), Moscoso et al. (1984), Srisuma et al. (1989), and Varriano-Marston and Jackson (1981).

La hipótesis de pectina-cation-fitato fue descrita en guisantes por Mattson (1946). La pectina mantiene unidas las paredes celulares y se encuentra en su mayoría en forma soluble, lo que posibilita la hidratación de los granos. Si bien los iones calcio y magnesio pueden establecer entrecruzamientos por medio de los grupos carboxilos de la pectina y transformarla en pectatos insolubles, la unión de estos iones bivalentes con fitato es a nivel energético más favorable y la mantienen de forma soluble. En condiciones de almacenamiento inadecuadas ($>25^{\circ}\text{C}$, humedad $>65\%$) se puede dar paso al endurecimiento de los granos, el cual está correlacionado con una reducción en la solubilidad de la pectina, y la transformación de componentes de fibra solubles en insolubles (Perera et al., 2023).

Durante el almacenamiento, se activan las enzimas fitasas, involucradas en la hidrólisis de los fitatos. Como resultado, se forman los ésteres de fosfato y se liberan iones bivalentes (ej.: Ca^{2+} , Mg^{2+}). Al mismo tiempo se activa la enzima pectinmetilesterasa (PME), encargada de convertir la pectina de las paredes celulares en pectina con un nivel de metoxilación menor y metanol. Los polisacáridos peptídicos interaccionan con cationes divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} o Fe^{2+}) y forman pectatos. Estos pectatos son insolubles o termoestables e incrementan la dureza de la pared celular, lo cual se traduce en un mayor tiempo de cocción para poder suavizar los tejidos (Aravindakshan et al., 2022).

La hipótesis de pectina-cation-fitato ha sido respaldada mediante una evaluación cuantitativa de parámetros relacionados con la misma, entre ellos concentraciones de pectina, iones y fitatos (Wainaina, Lugumira, et al., 2022). Los resultados obtenidos lograron demostrar que la hidrólisis de los fitatos cumple un papel esencial para el desarrollo del HTC. Además, se registró un incremento sustancial en iones de calcio unidos a la pared celular en los primeros minutos de cocción, lo que corrobora la migración de iones calcio en frijoles endurecidos.

En cuanto al grado de metoxilación de la pectina, estudios recientes sugieren que la desmetilación por parte de la PME podría no desempeñar un papel tan relevante como se creía inicialmente (Chen et al., 2021; Chigwedere et al., 2019). En ninguno de los estudios se encontraron diferencias significativas en el grado de metoxilación de la pectina entre granos de frijol frescos y almacenados. Esto sugiere que el grado de metoxilación de la pectina y el nivel de desarrollo del problema de-HTC sea algo inherente de la variedad de frijol que se evalúe.

Una segunda hipótesis plantea que los polifenoles establecen entrecruzamientos con proteínas en la lamela media y provoca la lignificación y en consecuencia el desarrollo del endurecimiento del grano (Srisuma et al., 1989). Los frijoles poseen un alto contenido de ácidos fenólicos en forma libre, esterificada o insoluble unidos a otros componentes como oligosacáridos, péptidos o polisacáridos. La proporción de los mismos puede ser alterada por las condiciones durante el almacenamiento. Por ejemplo, cuando los frijoles sufren de endurecimiento, se incrementa la síntesis o liberación de ácidos fenólicos libres presentes en el cotiledón, estos interaccionan con proteínas de la lamela media, lo que aumenta la hidrofobicidad de las proteínas y dificulta la hidratación del grano al cocinarlo (Machado et al., 2008).

Se han descrito cambios bioquímicos que pueden contribuir con la impermeabilidad y el oscurecimiento de los granos endurecidos, como la formación de complejos de proteínas-taninos (Parmar et al., 2017; Stanley, 1992). Una investigación reciente, evaluó con microscopía por autofluorescencia e inmuno-marcaje de epitopos pépticos, las paredes celulares de frijoles frescos y almacenados por tres meses (Chen et al., 2021). Ellos encontraron que los frijoles almacenados bajo condiciones desfavorables presentaban una pared celular con mayor dureza y cantidad de entrecruzamiento de pectina con iones de calcio. Además, establecieron que la pectina también formaba enlaces con polifenoles, como el ácido ferúlico. Ambos se encontraban acumulados en zonas de unión intercelulares, lo que apoya la hipótesis de pectina-cation-fitato y la de polifenoles.

La tercera hipótesis es la denominada proteína-almidón. En granos considerados “normales”, las proteínas son solubles en agua y presentan cierta estabilidad a la temperatura por lo que no suelen coagular durante el proceso de cocción. Por el contrario, en granos que presentan el problema de endurecimiento, se observa la desnaturalización de proteínas durante el almacenamiento; y al darse esta condición son más propensas a coagular durante la cocción. Bajo este escenario, se entorpece la absorción de agua por parte del almidón, lo que impide su ensanchamiento

(Hincks & Stanley, 1987; Liu & Bourne, 1995). Al bloquear la correcta hidratación del almidón, se obtienen frijoles con una textura no deseada.

Además de las hipótesis mencionadas, se han planteado entre otras, la del deterioro de la membrana (Varriano-Marston & Jackson, 1981). En esta, la peroxidación de los lípidos de la membrana induce a la pérdida de la integridad de la membrana celular, lo que permite la migración de iones divalentes hacia la pared celular y lámina media. Esta teoría también se apoya en la de pectina-cación-fitato, ya que explica la disponibilidad de los iones divalentes para su unión con la pectina. Otros estudios también contemplan otras reacciones, como el daño a las proteínas y a otros componentes celulares (Liu & Bourne, 1995; Richardson & Stanley, 1991). Sin embargo, las hipótesis más aceptadas siguen siendo la pectina-cación-fitato y la lignificación con polifenoles.

Consecuencias del endurecimiento en frijol

Comprender los mecanismos que provocan el problema de endurecimiento del grano permite un mejor entendimiento de sus implicaciones nutricionales. Las hipótesis de desintegración de membrana y pectina-cación-fitato (captura de cationes y su redistribución en las paredes celulares y lámina media), disminuyen la disponibilidad de los minerales. La bioaccessibilidad de estos minerales se reduce por la formación de complejos insolubles o de difícil digestión que obstaculizan su absorción en el cuerpo humano. Se ha observado una disminución considerable en la bioaccesibilidad de Ca, Fe y Zn en frijoles con HTC, y un aumento cuanto se extiende el tiempo de cocción en frijoles frescos (Rousseau et al., 2020).

En cuanto a las proteínas, las pérdidas por cocción o HTC son menores; sin embargo, la digestibilidad sí disminuye (Messou et al., 2023; Nyakuni et al., 2008; Ravoninjatovo et al., 2022). La cocción permite la inactivación de inhibidores proteolíticos mejorando la digestibilidad, pero la prolongación de tiempos de cocción pueden comprometerla debido a la agregación proteica por interacciones intra- e intermoleculares entre aminoácidos con grupos tiol (Drulyte & Orlie, 2019). Los frijoles endurecidos también presentan una disminución en la digestibilidad proteica, ya sea por el entrecruzamiento de polifenoles con proteínas (teoría de lignificación) o por la generación de una red proteica desnaturalizada y coagulada, junto con gránulos de almidón con un ensanchamiento reducido (hipótesis proteína-almidón) (Perera et al., 2023).

Otro de los aspectos que se ven afectados por este problema de endurecimiento del grano es el sabor que se desarrolla durante el proceso de cocción. En un estudio se encontró que los frijoles endurecidos presentan mayor concentración de compuestos volátiles relacionados con reacciones de oxidación (Chigwedere et al., 2019). Además, aunque se logró asemejar la textura entre frijoles endurecidos y frescos, los perfiles de compuestos volátiles fueron diferentes entre ambos grupos. Entre los compuestos que se asociaron a los frijoles endurecidos están los aldehídos de Strecker (Ej: 2-metilpropanal, 3-metilbutanal y 2-metilbutanal), compuestos de azufre y de furano. Estos compuestos están relacionados con la oxidación de lípidos y las reacciones de Maillard.

Pretratamientos aplicados en el procesamiento de frijoles

Aunque investigaciones recientes se centran en identificar variedades de frijol menos propensas a este problema y la estrategia más efectiva para asegurar la calidad física y nutricional del grano es prevenir el problema de HTC; es importante considerar alternativas de procesamiento que permitan utilizar los frijoles afectados. Por lo general, una vez cosechados los frijoles, estos se trillan, se someten a un proceso de secado (al sol o con equipos) hasta alcanzar una humedad entre 11-12 %, se limpian y se empacan para su posterior uso (Priya & Manickavasagan, 2020). Luego, los frijoles, y en especial los endurecidos, se pueden someter a una serie de pretratamientos y tratamientos para convertirlos en productos comerciales y del agrado de los consumidores.

Remojo de granos

El remojo es un pretratamiento que se utiliza de manera común para reducir los tiempos de cocción de los frijoles. El mismo consiste en colocar los granos en agua o en una disolución salina (en proporción 1:3 - 1:5, frijoles: agua), por un determinado período de tiempo, con la finalidad de que se hidraten (Kinyanjui et al., 2017; Li et al., 2020). Esto porque una vez que las paredes celulares absorben suficiente agua, se suavizan y se favorece la degradación de la lamela media del cotiledón (Kwofie et al., 2020).

Una vez que los frijoles se colocan en agua, su humedad aumenta con mayor rapidez durante los primeros minutos, hasta que los cambios se vuelven más leves, alcanzando un equilibrio. Esto se asocia con la pérdida de sólidos con el paso del tiempo, dado que este fenómeno reduce la absorción de agua en el grano (Li et al., 2020). Hay autores que señalan que a temperatura ambiente los frijoles alcanzan el equilibrio entre 8 y 10 h (Kwofie et al., 2020). Sin embargo, otros investigadores señalan que podrían tardar más de 12 h (Kinyanjui et al., 2015; Li et al., 2020).

En cuanto a la temperatura de remojo, si bien lo usual es realizarlo a temperatura ambiente, se ha comprobado que aumentarla permite alcanzar la humedad de equilibrio de los frijoles con mayor rapidez. En frijoles de la variedad Rose Coco, a una temperatura de 50 °C, se alcanza en alrededor de 2 h (Kinyanjui et al., 2015). Mientras que, a la misma temperatura, los frijoles negros tardan 6 h en alcanzar el equilibrio (Li et al., 2020). Si bien los resultados difieren de manera considerable según la variedad de los frijoles, en ambos casos el aumento de la temperatura reduce al menos hasta la mitad el tiempo de remojo, para alcanzar la humedad de equilibrio.

Por lo general, los frijoles se remojan en disoluciones de sales como: NaCl, Na₂CO₃, NaHCO₃. Se ha observado que mientras mayor sea el pH de la disolución, menor es el tiempo de cocción. Esto porque las disoluciones alcalinas provocan la degradación de proteínas, polisacáridos y pectinas, lo cual favorece la permeabilidad de las membranas y la hidratación de los granos (Kinyanjui et al., 2015). Además, se reduce la temperatura de desnaturalización de las proteínas, lo que facilita la cocción (Del Valle et al., 1992). Sales con cationes divalentes, como el CaCl₂, han mostrado un efecto contrario, endurecen los frijoles y aumentan los tiempos de cocción (Kinyanjui et al., 2015).

Este pretratamiento se ha estudiado también en frijoles endurecidos. Aunque la reducción en los tiempos de hidratación y cocción es menos pronunciada; el tiempo, la temperatura, el tipo de sal y pH de la disolución de remojo afectan de manera similar (Del Valle et al., 1992; Garcia-Vela et al., 1991; Kinyanjui et al., 2015). Por ejemplo, se observó una reducción en los tiempos de cocción de 420 min a 150 min (alrededor de 64 %) en frijoles endurecidos al aplicar remojo en Na₂CO₃. Mientras que en frijoles no endurecidos se redujo de 120 min a 30 min (alrededor de 80 %) (Kinyanjui et al., 2017). La ventaja de este pretratamiento es su fácil de aplicación en los hogares.

Pelado de granos

El pelado de granos reduce de manera drástica el tiempo de cocción hasta en un 56 % (Kinyanjui et al., 2015). La cáscara dura (impermeabilidad de la testa) es una causa del endurecimiento de los frijoles (Chigwedere et al., 2018), al removerla, se reducen los tiempos de imbibición de agua (Nakitto et al., 2015). Para facilitar la eliminación de la cáscara se ha observado que el remojo previo, seguido de un secado por liofilización o por convección con aire caliente es eficiente y agiliza el proceso (Anton et al., 2008). Además, este pretratamiento contribuye a reducir los factores antinutricionales presentes en la cáscara del frijol (Akinjayeju & Ajayi, 2011).

Tostado de granos

El tostado es un pretratamiento que expone a los frijoles a calor seco que logra reducir los factores antinutricionales y resaltar su sabor sin afectar el contenido proteico (Roy et al., 2021). Se puede utilizar para obtener frijoles tostados y consumirlos como bocadillos (Rebollo-Hernanz et al., 2019). Sin embargo, es común aplicar este pretratamiento para elaborar harinas de frijol para después preparar salsas o productos horneados y mejorar su perfil nutricional. Algunas combinaciones de tiempo y temperatura empleadas para tostar frijoles son: 185,9 °C durante 7,5 min o 170 °C durante 45 min, con el uso de un horno infrarrojo (Byarugaba et al., 2020; Nkundabombi et al., 2016). En frijoles endurecidos, no se encontraron evaluaciones de este pretratamiento.

Otros pretratamientos

Existen otros pretratamientos que se han explorado para su uso en leguminosas, como el ultrasonido, el tratamiento de alta presión hidrostática (HHP), el campo eléctrico pulsado, la micronización y la irradiación. Estos tratamientos mejoran la hidratación de los granos y reducen los tiempos de cocción (Alpos et al., 2022; Belmiro et al., 2018; Devkota et al., 2022). El uso de ultrasonificación es una tecnología prometedora que ayudaría a mejorar los tiempos de hidratación de leguminosas. Aunque se ha encontrado que la ultrasonización acorta el proceso de hidratación en alrededor del 25 % (Miano et al., 2016); es necesaria mayor investigación para determinar su efectividad para tratar frijoles endurecidos.

En cuanto al empleo de altas presiones hidrostáticas, se han logrado avances al evaluar el efecto en la hidratación de frijoles y se ha encontrado que el uso de presiones de 600 MPa acelera 4,7 veces el tiempo de hidratación de los granos y reducen el tiempo de cocción en 15 min (Belmiro et al., 2018). De igual manera, se han obtenido buenos resultados a presiones de 200 MPa a 25 °C durante 10 min en frijoles rojos, frijoles adzuki y soya (Ueno et al., 2015). Ambos estudios sugieren que estos tratamientos de alta presión resultan efectivos y aumentan la absorción de agua debido a modificaciones estructurales que potencian la hidratación de los granos.

Tratamientos aplicados en el procesamiento de frijoles

Luego de aplicar los pretratamientos necesarios a los granos de frijol, se puede proceder al procesamiento para que sean palatables. Los frijoles se procesan en su mayoría con métodos que se pueden dividir en térmicos y no térmicos. Algunos de estos tratamientos han sido utilizados de forma exitosa en frijoles endurecidos. No obstante, otros tratamientos, aunque se han obtenido resultados prometedores en frijoles comunes, deben evaluarse como soluciones para frijoles que presentan endurecimiento. En la Figura 2 se muestra un resumen de alternativas tecnológicas de pretratamientos abarcadas en la sección anterior y tratamientos que se abordarán a continuación.

Tratamientos térmicos

La categoría de tratamientos térmicos incluye todos los métodos que necesitan de una fuente de calor para llevarse a cabo. En el caso del frijol, los tratamientos térmicos utilizados con mayor frecuencia son cocción, autoclavado, extrusión y uso de microondas.

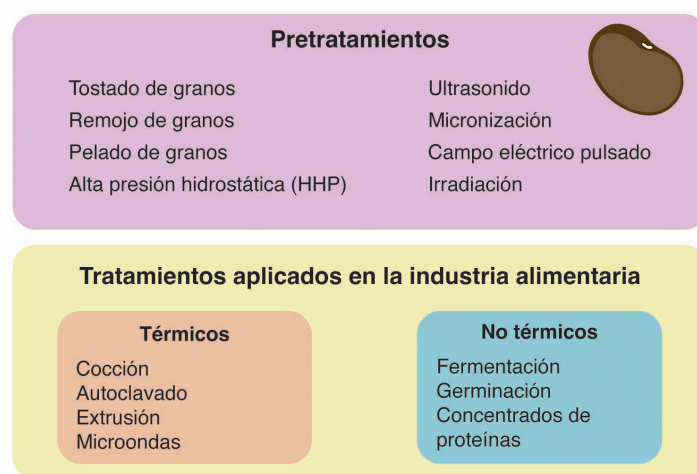


Figura 2. Alternativas de pretratamiento y tratamiento para el aprovechamiento de frijoles (*Phaseolus vulgaris* L.) endurecidos.

Figure 2. Pre-treatment and treatment alternatives for the utilization hardened beans (*Phaseolus vulgaris* L.).

Cocción

La cocción es el proceso más antiguo y en la actualidad el más utilizado a nivel doméstico. Los frijoles suelen cocinarse en agua en ebullición durante 30 – 90 min y al combinar la cocción con un remojo previo por 16 h a 25 °C, se reduce este tiempo hasta en un 70 % (Kinyanjui et al., 2017). Las temperaturas utilizadas disminuyen la concentración de factores antinutricionales presentes (ej. taninos, inhibidores de tripsina, lectinas y glicoproteínas); sin embargo, tiempos de cocción muy extensos pueden contribuir a la pérdida de nutrientes. El uso de ollas de presión ayuda a reducir los tiempos de cocción, en condiciones de 121 °C, 15 psi, durante 15 – 30 min (Priya & Manickavasagan, 2020).

Autoclavado

El tratamiento térmico de los frijoles autoclavados implica el envasado y posterior procesamiento térmico bajo presión en una autoclave. Esto permite obtener un producto listo para consumir y práctico, que ahorra tiempo al consumidor (Bassett et al., 2020). Los frijoles se colocan en un empaque resistente (latas, cartón o polipropileno con aluminio), junto con una salmuera, caldo o salsa. Una vez sellado el empaque, se lleva a cabo el tratamiento térmico que suele ser de 110 a 135 °C, a una presión de $1,04 \times 10^5$ Pa. Luego del autoclavado, el producto se enfría a 30 – 40 °C, para evitar el deterioro por microorganismos termófilos, y se almacena a temperatura ambiente (Kelly & Cichy, 2013).

Este tratamiento ha sido utilizado para mejorar las características nutricionales de granos de frijol endurecido sin afectar sus propiedades funcionales, como su solubilidad en agua, índice de absorción de agua y capacidad de absorción de aceite (Batista et al., 2020; Kelly & Cichy, 2013; Schoeninger et al., 2017). Un estudio, comparó la aplicación de autoclavado en frijoles endurecidos y frijoles sin este fenómeno. Este tratamiento se realizó a 126 °C durante 14 min, y con él se determinó que el cotiledón de los frijoles endurecidos poseía una dureza 48,9 % mayor a los frijoles sin esta condición. Para el autoclavado de frijoles endurecidos se requiere un tratamiento térmico de mayor intensidad y/o duración para equiparar este parámetro (Chu et al., 2020).

Otro efecto positivo que puede tener la implementación del autoclavado es la reducción de factores antinutricionales. Al probar diferentes combinaciones de tiempo y temperatura de autoclavado se ha logrado obtener una reducción de la cantidad de inhibidores enzimáticos de tripsina (59,8 %), α -amilasa (42,2 %) y de almidón resistente (45,9 %), aumentando la biodisponibilidad de otros nutrientes. Los frijoles obtenidos bajo estas condiciones de procesamiento fueron más suaves y tenían mejor sabor en comparación con los frijoles que no fueron tratados. Este pretratamiento podría permitir el consumo de frijoles endurecidos tanto como grano entero, así como ingrediente en otros alimentos (Batista et al., 2020).

Extrusión

La extrusión es un proceso que combina altas temperaturas y estrés mecánico para moldear alimentos. Los frijoles se procesan en forma de harina, esta se introduce en un cilindro que contiene un tornillo sin fin. El tornillo desplaza el material a través del cilindro y sale por un orificio que le da la forma al producto final. Este proceso permite elaborar productos como cereales y bocadillos (Rebollo-Hernanz et al., 2019). La extrusión utiliza altas temperaturas durante tiempos cortos (100 °C–200 °C, 20–90 s, 580–2175 psi) (Berrios et al., 2022). Esto logra eliminar factores anti nutricionales como inhibidores de tripsina, inhibidores de α amilasa, lectinas y fitatos, sin causar mayor degradación de nutrientes (Martín-Cabrejas et al., 1999).

El uso del método de extrusión en frijoles endurecidos se ha calificado como viable (Anton et al., 2009; Paula et al., 2022). Al respecto, se encontró que después de la extrusión con harina de frijoles endurecidos y frijoles sin este problema; los factores antinutricionales se redujeron de manera considerable y la composición de azúcares y fibra dietética no fue afectada (Martín-Cabrejas et al., 1999). Mientras que Batista et al. (2010), reafirmaron la reducción considerable de los factores antinutricionales en harinas de frijol endurecido. Además, indicaron que la extrusión a 150 °C aumentó la capacidad de absorción de agua, la solubilidad en agua de la harina, así como la digestibilidad de las proteínas y del almidón en los productos obtenidos.

Microondas

La cocción con microondas implica la transferencia de energía de forma directa al material a través de la interacción molecular con el campo electromagnético, mientras que la cocción convencional transfiere la energía de un material a otro a través de convección, conducción o radiación (Venkatesh & Raghavan, 2004). La cocción con microondas permite la reducción en tiempo de cocción de hasta 83,6 % en comparación con la convencional; además requiere una menor proporción de agua. Esto permite reducir las pérdidas nutricionales de proteínas y minerales (Marconi et al., 2000). Aunque no hay estudios sobre este tratamiento en frijoles endurecidos, podría ser una alternativa para reducir sus tiempos de cocción, debido a los resultados favorables en frijoles sin esta característica.

Tratamientos no térmicos

En la categoría de tratamientos no térmicos se incluyen aquellos que no necesitan de una fuente de calor para llevarse a cabo y que se basan en otros procesos químicos o biológicos para lograr el reblandecimiento de los tejidos de los granos. Entre los tratamientos no térmicos más comunes se encuentran la fermentación, germinación y la preparación de concentrados de proteína.

Fermentación

La fermentación en frijoles ayuda a mejorar su perfil nutricional al reducir la presencia de factores antinutricionales que afectan la digestibilidad de granos y la biodisponibilidad de nutrientes. Además, permite reducir los oligosacáridos (ej.: rafinosa, verbascosa, estaquiosa) que producen incomodidades intestinales. Esto es posible por la acción de los microorganismos productores de enzimas degradadoras de estos compuestos (Garrido-Galand et al., 2021). Estos resultados positivos se han observado en harinas de frijol caupí (Ferreira et al., 2019); donde adicional a la reducción de factores antinutricionales, se aumentó la digestibilidad de las harinas y se adquirió un perfil nutricional, sensorial y tecnológico más favorable que en los materiales originales.

Las harinas obtenidas luego de la fermentación se pueden utilizar como materias primas para productos extruidos o para mejorar el perfil nutricional de productos de panadería o pasta (De Pasquale et al., 2020; Worku & Sahu, 2017). Diferentes autores han estudiado la fermentación de harinas de frijol, las cuales se elaboraron con diferentes tratamientos y/o pretratamientos como: pelado, remojo, cocción y gelatinización (De Pasquale et al., 2020; Martín-Cabrejas et al., 2004; Worku & Sahu, 2017). Todos los tratamientos que involucraron cocción, gelatinización y autoclavado resultaron en productos con menor cantidad de factores antinutricionales.

Los procesos de fermentación se pueden realizar de dos formas, se adicionan cultivos de bacterias ácido-lácticas o se permite el desarrollo de la flora natural de los frijoles. En cuanto a las condiciones de fermentación, estas pueden variar, algunos estudios han evaluado la eficacia del proceso a temperaturas de 30 °C, 37 °C y 42 °C y tiempos de fermentación de 24, 48, 72 y 96 h (De Pasquale et al., 2020; Worku & Sahu, 2017). Después de la fermentación, se observó una disminución de factores antinutricionales como los taninos, las lectinas, los inhibidores de tripsina y oligosacáridos. Esto resulta en una mejora del perfil nutricional de los frijoles y su digestibilidad.

En cuanto a frijoles endurecidos, no se encontraron estudios recientes, pero en años anteriores se había estudiado la posibilidad de producir “Tempe”, una masa precocida elaborada con soya fermentada por un moho denominado *Rhizopus* sp. (Nout & Kiers, 2005). En este caso se utilizaron frijoles endurecidos y frijoles sin este problema. Los mismos se remojaron, se pelaron y se cocinaron a 90 °C durante 30 min previo a la inoculación con *R. oligosporus* y se fermentaron por 72 h a 37 °C. Como resultado, se observaron valores similares de humedad, sólidos solubles y contenido total de proteína, y se observó una disminución en los inhibidores de tripsina considerable en relación con su contenido inicial.

Germinación

Para este tratamiento se realiza un remojo previo que permite estimular los procesos biológicos de la germinación. Estos procesos activan reacciones enzimáticas que catalizan la degradación de carbohidratos y proteínas, mejorando la digestibilidad de las leguminosas (Mbithi-Mwikya et al., 2000). Además, se ha encontrado que la germinación incrementa el contenido de nutrientes, como hierro y otros minerales (Poblete et al., 2020) y reduce los niveles de factores antinutricionales por acción de enzimas como las fitasas, que disminuyen los niveles de ácido fítico (Samtiya et al., 2020). También se ha documentado que una germinación de 72 h reduce los tiempos de cocción de frijoles rojos desde 24 % hasta 44,7 %, de acuerdo con la variedad (Hailelassie et al., 2019).

En frijol, se ha propiciado la germinación en 48 h colocando sobre ellos una capa de algodón agregando agua cada 24 h o remojándolos por 8 h y luego cubriéndolos con papel aluminio a 30 °C (Mbithi-Mwikya et al., 2000; Nakitto et al., 2015). Al convertir los frijoles germinados en harina, esta tiene un mayor contenido de calcio y menos contenido de factores antinutricionales como fitatos, inhibidores de tripsina y lectinas (Owuamanam et al., 2014). Sin embargo, en frijoles endurecidos se ha observado que el porcentaje de germinación es muy bajo,

inclusive de apenas 12,5 % (Varriano-Marston & Jackson, 1981). Debido a ello, esta opción no parece ser la más adecuada para aplicar en frijoles que presentan problemas de endurecimiento.

Concentrados de proteína

Los concentrados de proteína se pueden obtener a partir de un proceso químico que se basa en realizar un fraccionamiento por vía húmeda a partir de harina de frijoles (crudos o cocinados). La harina se suspende en agua en una proporción 1:10 (m/v), se ajusta su pH (8,0 – 11,0) y se deja reposar 1 h. Luego, se tamiza la suspensión para separar la fibra y se deja reposar el remanente por 30 min para separar el almidón sedimentado y el líquido se acidifica a pH = 4,3 para precipitar las proteínas. Por último, se centrifuga el remanente. El sólido obtenido está constituido por al menos un 73 % de proteína (Betancur-Ancona et al., 2014; Ruiz-Ruiz et al., 2012).

El concentrado de proteína obtenido de frijoles endurecidos muestra alta solubilidad dependiente del pH, indicativo de buenas propiedades emulsificantes. Este concentrado demuestra una capacidad emulsificante en particular a pH bajos, que permiten su uso en la elaboración de productos como mayonesa y aderezos. Además, al homogenizarlo con agua se observa que su viscosidad aumenta con la velocidad de cizalla, indicativo de potencial como agente espesante (Segura-Campos et al., 2014). Aunque forma espumas poco estables, al realizar una hidrólisis enzimática con pancreatina, su capacidad espumante se ve favorecida (Betancur-Ancona et al., 2014). El almidón obtenido de este fraccionamiento tiene altas temperaturas de gelatinización, lo que permite su utilización en productos sometidos a altas temperaturas como los enlatados (Ruiz-Ruiz et al., 2012).

Productos elaborados con frijoles endurecidos

Algunas investigaciones han utilizado frijoles endurecidos para su incorporación en productos alimenticios, con el empleo de diversos pretratamientos y tratamientos descritos. Por ejemplo, se reemplazó un 10 % de harina de trigo por harina extruida de frijoles endurecidos para la elaboración de un pan, lo que resultó en un producto con mayor contenido de proteína y fibra, y una alta aceptación en cuanto sabor y apariencia luego de una evaluación sensorial (Batista et al., 2011). En otro estudio, se incorporó un 10 % de proteína hidrolizada de frijoles endurecidos en pasta de semolina de trigo. Aunque se observó una mayor pérdida de masa durante la cocción, la pasta tenía mayor cantidad de proteína y fue aceptada por el consumidor (Segura-Campos et al., 2015).

Otras aplicaciones incluyen la sustitución de un 40 % de garbanzos por frijoles endurecidos para elaborar “Koki”, un producto tradicional de Camerún con base en pasta de garbanzo batida y cocinado al vapor. El producto obtenido tuvo una mejor digestibilidad de carbohidratos y proteínas, y aceptación del consumidor (Mbofung et al., 1999). En otra investigación, se pelaron los granos de frijol endurecido para obtener una harina rica en fibra (Sandoval-Peraza et al., 2021). Esta harina, rica en fibra dietética insoluble, se añadió a bebidas con sabor a chocolate en concentraciones del 10 %, 20 % y 30 %. Las bebidas obtenidas tenían un menor contenido calórico que las bebidas sin sustitución y fueron valoradas de forma positiva por los consumidores.

Además de las aplicaciones que se han descrito, se puede considerar la elaboración de productos como bocadillos, galletas y tortillas con harina de frijoles endurecidos. Aunque a la fecha no hay estudios que hayan probado su viabilidad, sí hay estudios previos que respaldan el uso efectivo de harina de frijol no endurecido para elaborar estos productos (Anton et al., 2009; Lestari et al., 2017). La industria alimentaria mejora la nutrición de sus productos y amplía su mercado al añadir frijoles comunes, y atrae a consumidores conscientes de la salud que buscan alternativas más saludables y sostenibles. La incorporación de frijol en alimentos como pan, barras energéticas y/o pasta mejoran el contenido de fibra, proteína y compuestos fenólicos (Alfaro-Díaz et al., 2023).

Conclusiones

El endurecimiento de los frijoles es un fenómeno complejo y multifactorial que aún debe ser dilucidado en su totalidad. Este representa un desafío importante en términos de aceptación de los consumidores y plantea una problemática para los productores y comerciantes de este grano. Como se mencionó en esta revisión, este tiene grandes implicaciones más allá de prolongar el tiempo de cocción. Los frijoles afectados por HTC también experimentan una reducción en su palatabilidad, calidad nutricional y digestibilidad de las proteínas. Si bien, lo ideal es evitar que se presente el fenómeno en los granos, al ser una condición irreversible, cuando se tienen frijoles endurecidos, la única alternativa es la aplicación de algún pretratamiento o tratamiento para volver estos frijoles palatables.

Algunas de las operaciones de procesamiento en frijol endurecido son prometedoras, aunque no han sido exploradas en su totalidad, como los pretratamientos con ultrasonido, la alta presión hidrostática, el campo eléctrico pulsado, la micronización y la irradiación. Dado que los frijoles constituyen una fuente valiosa de nutrientes a nivel global, es esencial garantizar su calidad y continuar con la exploración de alternativas de procesamiento que permitan aprovechar este grano, incluso cuando presente endurecimiento. La investigación y desarrollo en este campo son fundamentales para asegurar la sostenibilidad y utilidad de los frijoles en la alimentación humana.

Referencias

- Acuña-Gutiérrez, C., Campos-Boza, S., Hernández-Pridyballo, A., & Jiménez, V. M. (2019). Nutritional and industrial relevance of particular neotropical pseudo-cereals. In C. Piatti, S. Graeff-Hönniger, & F. Khajehei (Eds.), *Food Tech Transitions* (pp. 65–79). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21059-5_4
- Akinjayeju, O., & Ajayi, O. F. (2011). Effects of dehulling on functional and sensory properties of flours from black beans (*Phaseolus vulgaris*). *Food and Nutrition Sciences*, 2(4), 344–349. <https://doi.org/10.4236/fns.2011.24049>
- Alfaro-Díaz, A., Escobedo, A., Luna-Vital, D. A., Castillo-Herrera, G., & Mojica, L. (2023). Common beans as a source of food ingredients: Techno-functional and biological potential. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(4), 2910–2944. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13166>
- Alpos, M., Leong, S. Y., Liesaputra, V., & Oey, I. (2022). Influence of pulsed electric fields (PEF) with calcium addition on the texture profile of cooked black beans (*Phaseolus vulgaris*) and their particle breakdown during in vivo oral processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 75, Article 102892. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102892>
- Anton, A. A., Fulcher, G. R., & Arntfield, S. D. (2009). Physical and nutritional impact of fortification of corn starch-based extruded snacks with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour: Effects of bean addition and extrusion cooking. *Food Chemistry*, 113(4), 989–996. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.050>
- Anton, A. A., Ross, K. A., Beta, T., Fulcher, G. R., & Arntfield, S. D. (2008). Effect of pre-dehulling treatments on some nutritional and physical properties of navy and pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *LWT - Food Science and Technology*, 41(5), 771–778. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.05.014>
- Aravindakshan, S., Kyomugasho, C., Tafiire, H., Van Loey, A., Grauwet, T., & Hendrickx, M. E. (2022). The moisture plasticizing effect on enzyme-catalyzed reactions in model and real systems in view of legume ageing and their hard to cook development. *Journal of Food Engineering*, 314, Article 110781. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110781>
- Araya Villalobos, R., Martínez Umaña, K., López Zúñiga, A., & Murillo Williams, A. (2013). *Protocolo para el manejo poscosecha de la semilla de frijol*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

- Arias, C. (Ed.). (1993). *Manual de manejo poscosecha del grano*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación <http://www.fao.org/docrep/X5027S/x5027S00.htm#Contents>
- Bassett, A., Dolan, K. D., & Cichy, K. (2020). Reduced retort processing time improves canning quality of fast-cooking dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(10), 3995–4004. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10444>
- Batista, K. A., Pereira, W. J., Moreira, B. R., Silva, C. N., & Fernandes, K. F. (2020). Effect of autoclaving on the nutritional quality of hard-to-cook common beans (*Phaseolus vulgaris*). *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 5(1), 22–30. <https://doi.org/10.22161/ijeab.51.4>
- Batista, K. A., Prudêncio, S. H., & Fernandes, K. F. (2010). Changes in the functional properties and antinutritional factors of extruded Hard-to-Cook common beans (*Phaseolus vulgaris*, L.). *Journal of Food Science*, 75(3), C286–C290. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01557.x>
- Batista, K. A., Prudêncio, S. H., & Fernandes, K. F. (2011). Wheat bread enrichment with hard-to-cook bean extruded flours: Nutritional and acceptance evaluation. *Journal of Food Science*, 76(1), S108–S113. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01969.x>
- Belmiro, R. H., Tribst, A. A. L., & Cristianini, M. (2018). Impact of high pressure processing in hydration and drying curves of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 47, 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.013>
- Betancur-Ancona, D., Sosa-Espinoza, T., Ruiz-Ruiz, J., Segura-Campos, M., & Chel-Guerrero, L. (2014). Enzymatic hydrolysis of hard-to-cook bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein concentrates and its effects on biological and functional properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(1), 2–8. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12267>
- Berrios, J. De J., Losso, J. N., & Albertos, I. (2022). Extrusion processing of dry beans and pulses. In M. Siddiq, & M. A. Uebersax (Eds.), *Dry beans and pulses* (1st ed., pp. 225–246). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119776802.ch9>
- Byarugaba, R., Nabubuya, A., & Muyonga, J. (2020). Descriptive sensory analysis and consumer preferences of bean sauces. *Food Science & Nutrition*, 8(8), 4252–4265. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1721>
- Chen, D., Pham, U. T. T., Van Loey, A., Grauwet, T., Hendrickx, M., & Kyomugasho, C. (2021). Microscopic evidence for pectin changes in hard-to-cook development of common beans during storage. *Food Research International*, 141, Article 110115. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110115>
- Chigwedere, C. M., Humerez Flores, J. N., Panozzo, A., Van Loey, A. M., & Hendrickx, M. E. (2019). Instability of common beans during storage causes hardening: The role of glass transition phenomena. *Food Research International*, 121, 506–513. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.006>
- Chigwedere, C. M., Olaoye, T. F., Kyomugasho, C., Jamsazzadeh Kermani, Z., Pallares Pallares, A., Van Loey, A. M., Grauwet, T., & Hendrickx, M. E. (2018). Mechanistic insight into softening of Canadian wonder common beans (*Phaseolus vulgaris*) during cooking. *Food Research International*, 106, 522–531. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.016>
- Chu, J., Ho, P., & Orfila, C. (2020). Growth region impacts cell wall properties and hard-to-cook phenotype of canned Navy beans (*Phaseolus vulgaris*). *Food and Bioprocess Technology*, 13, 818–826. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02436-7>
- Cichy, K. A., Wiesinger, J. A., Berry, M., Nchimbi-Msolla, S., Fourie, D., Porch, T. G., Ambechew, D., & Miklas, P. N. (2019). The role of genotype and production environment in determining the cooking time of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Legume Science*, 1(1), Article e13. <https://doi.org/10.1002/leg3.13>

- Cominelli, E., Sparvoli, F., Lisciani, S., Forti, C., Camilli, E., Ferrari, M., Le Donne, C., Marconi, S., Vorster, B. J., Botha, A.-M., Marais, D., Losa, A., Sala, T., Reboul, E., Alvarado-Ramos, K., Waswa, B., Ekesa, B., Aragão, F., & Kunert, K. (2022). Antinutritional factors, nutritional improvement, and future food use of common beans: A perspective. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 992169. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.992169>
- De Pasquale, I., Pontonio, E., Gobetti, M., & Rizzello, C. G. (2020). Nutritional and functional effects of the lactic acid bacteria fermentation on gelatinized legume flours. *International Journal of Food Microbiology*, 316, Article 108426. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.108426>
- Del Valle, J. M., Cottrell, T. J., Jackman, R. L., & Stanley, D. W. (1992). Hard-to-cook defect in black beans: The contribution of proteins to salt soaking effects. *Food Research International*, 25(6), 429–436. [https://doi.org/10.1016/0963-9969\(92\)90167-4](https://doi.org/10.1016/0963-9969(92)90167-4)
- Demito, A., Ziegler, V., Tiago, J., Goebel, S., Machado Coelho, S. R., & Cardoso Elias, M. (2018). Efeitos da umidade, da temperatura e do tempo de armazenamento de grãos de feijão carioca sobre a aparência visual e propriedades tecnológicas. Em I. Lorineu, M. Alvares de Oliveira, L. R. D’Antonio Faroni, & V. M. Scussel (Coord.), *Anais da 6ª Conferência Brasileira de Pós-Colheita* (pp. 253–260). Associação Brasileira de Pós-Colheita.
- Devkota, L., He, L., Bittencourt, C., Midgley, J., & Haritos, V. S. (2022). Thermal and pulsed electric field (PEF) assisted hydration of common beans. *LWT*, 158, Article 113163. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113163>
- Drulyte, D., & Orlie, V. (2019). The effect of processing on digestion of legume proteins. *Foods*, 8(6), Article 224. <https://doi.org/10.3390/foods8060224>
- Ferreira, L., Mendes-Ferreira, A., Benevides, C., Melo, D., Costa, A., Mendes-Faia, A., & Oliveira, M. (2019). Effect of controlled microbial fermentation on nutritional and functional characteristics of cowpea bean flours. *Foods*, 8(11), 530. <https://doi.org/10.3390/foods8110530>
- Food and Agriculture Organization. (n.d.). *FAOSTAT. Crops and livestock products—Area harvested, yield and production quantity* [Dataset]. Retrieved July 19, 2024 from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Garcia-Vela, L. A., Del Valle, J. M., & Stanley, D. W. (1991). Hard-to-cook defect in black beans: The effect of soaking in various aqueous salt solutions. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 24(1–2), 60–67. [https://doi.org/10.1016/S0315-5463\(91\)70021-7](https://doi.org/10.1016/S0315-5463(91)70021-7)
- Garrido-Galand, S., Asensio-Grau, A., Calvo-Lerma, J., Heredia, A., & Andrés, A. (2021). The potential of fermentation on nutritional and technological improvement of cereal and legume flours: A review. *Food Research International*, 145, Article 110398. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110398>
- Haileslassie, H. A., Henry, C. J., & Tyler, R. T. (2019). Impact of pre-treatment (soaking or germination) on nutrient and anti-nutrient contents, cooking time and acceptability of cooked red dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and chickpea (*Cicer arietinum* L.) grown in Ethiopia. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(8), 2540–2552. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14165>
- Havemeier, S., Erickson, J., & Slavin, J. (2017). Dietary guidance for pulses: The challenge and opportunity to be part of both the vegetable and protein food groups. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1392(1), 58–66. <https://doi.org/10.1111/nyas.13308>
- Hincks, M. J., & Stanley, D. W. (1987). Lignification: Evidence for a role in hard-to-cook beans. *Journal of Food Biochemistry*, 11(1), 41–58. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.1987.tb00111.x>

- Kelly, J., & Cichy, K. (2013). Dry bean breeding and production technologies. In M. Siddiq & M. A. Uebersax (Eds.), *Dry beans and pulses production, processing, and nutrition* (pp. 23–54). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118448298.ch2>
- Kinyanjui, P. K., Njoroge, D. M., Makokha, A. O., Christiaens, S., Ndaka, D. S., & Hendrickx, M. (2015). Hydration properties and texture fingerprints of easy- and hard-to-cook bean varieties. *Food Science & Nutrition*, 3(1), 39–47. <https://doi.org/10.1002/fsn3.188>
- Kinyanjui, P. K., Njoroge, D. M., Makokha, A. O., Christiaens, S., Sila, D. N., & Hendrickx, M. (2017). Quantifying the effects of postharvest storage and soaking pretreatments on the cooking quality of common beans (*Phaseolus vulgaris*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(4), Article e13036. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13036>
- Kwofie, E. M., Mba, O. I., & Ngadi, M. (2020). Classification, force deformation characteristics and cooking kinetics of common beans. *Processes*, 8(10), Article 1227. <https://doi.org/10.3390/pr8101227>
- Kyomugasho, C., Kamau, P. G., Aravindakshan, S., & Hendrickx, M. E. (2021). Evaluation of storage stability of low moisture whole common beans and their fractions through the use of state diagrams. *Food Research International*, 140, Article 109794. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109794>
- Lestari, L. A., Huriyati, E., & Marsono, Y. (2017). The development of low glycemic index cookie bars from foxtail millet (*Setaria italica*), arrowroot (*Maranta arundinacea*) flour, and kidney beans (*Phaseolus vulgaris*). *Journal of Food Science and Technology*, 54, 1406–1413. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2552-5>
- Li, P., Li, Y., Wang, L., Zhang, H., Qi, X., & Qian, H. (2020). Study on water absorption kinetics of black beans during soaking. *Journal of Food Engineering*, 283, Article 110030. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110030>
- Liu, K., & Bourne, M. C. (1995). Cellular, biological, and physicochemical basis for the hard-to-cook defect in legume seeds. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 35(4), 263–298. <https://doi.org/10.1080/10408399509527702>
- Los, F. G. B., Zielinski, A. A. F., Wojeicchowski, J. P., Nogueira, A., & Demiate, I. M. (2018). Beans (*Phaseolus vulgaris* L.): Whole seeds with complex chemical composition. *Current Opinion in Food Science*, 19, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.01.010>
- Machado, C. M., Ferruzzi, M. G., & Nielsen, S. S. (2008). Impact of the Hard-to-Cook phenomenon on phenolic antioxidants in dry beans (*Phaseolus vulgaris*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(9), 3102–3110. <https://doi.org/10.1021/jf072861y>
- Marconi, E., Ruggeri, S., Cappelloni, M., Leonardi, D., & Carnovale, E. (2000). Physicochemical, nutritional, and microstructural characteristics of chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) following microwave cooking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(12), 5986–5994. <https://doi.org/10.1021/jf0008083>
- Martín-Cabrejas, M. A., Jaime, L., Karanja, C., Downie, A. J., Parker, M. L., Lopez-Andreu, F. J., Maina, G., Esteban, R. M., Smith, A. C., & Waldron, K. W. (1999). Modifications to physicochemical and nutritional properties of hard-to-cook beans (*Phaseolus vulgaris* L.) by extrusion cooking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(3), 1174–1182. <https://doi.org/10.1021/jf980850m>
- Martín-Cabrejas, M. A., Sanfiz, B., Vidal, A., Mollá, E., Esteban, R., & López-Andréu, F. J. (2004). Effect of fermentation and autoclaving on dietary fiber fractions and antinutritional factors of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(2), 261–266. <https://doi.org/10.1021/jf034980t>
- Mattson, S. (1946). The cookability of yellow peas: A col- loid-chemical and biological study. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 2, 185–231.

- Mbithi-Mwikya, S., Ooghe, W., Van Camp, J., Ngundi, D., & Huyghebaert, A. (2000). Amino acid profiles after sprouting, autoclaving, and lactic acid fermentation of finger millet (*Eleusine coracana*) and kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(8), 3081–3085. <https://doi.org/10.1021/jf0002140>
- Mbofung, C. M. F., Rigby, N., & Waldron, K. (1999). Use of two varieties of hard-to-cook beans (*Phaseolus vulgaris*) and cowpeas (*Vigna unguiculata*) in the processing of koki (a steamed legume product). *Plant Foods for Human Nutrition*, 54, 131–150. <https://doi.org/10.1023/A:1008169000428>
- Messou, T., Mani Adrien, K., Kouassi Cyrile, G., & Kablan, T. (2023). Effect of cooking time on the nutritional and anti-nutritional properties of red and black beans of *Phaseolus lunatus* (L.) consumed in south and east of Côte d'Ivoire. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 22(1), 269–281. <https://doi.org/10.30574/gscbps.2023.22.1.0459>
- Miano, A. C., Pereira, J. D. C., Castanha, N., Júnior, M. D. D. M., & Augusto, P. E. D. (2016). Enhancing mung bean hydration using the ultrasound technology: Description of mechanisms and impact on its germination and main components. *Scientific Reports*, 6, Article 38996. <https://doi.org/10.1038/srep38996>
- Moscoso, W., Bourne, M. C., & Hood, L. F. (1984). Relationships between the hard-to-cook phenomenon in red kidney beans and water absorption, puncture force, pectin, phytic acid, and minerals. *Journal of Food Science*, 49(6), 1577–1583. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1984.tb12848.x>
- Nakitto, A. M., Muyonga, J. H., & Nakimbugwe, D. (2015). Effects of combined traditional processing methods on the nutritional quality of beans. *Food Science & Nutrition*, 3(3), 233–241. <https://doi.org/10.1002/fsn3.209>
- Nkundabombi, M. G., Nakimbugwe, D., & Muyonga, J. H. (2016). Effect of processing methods on nutritional, sensory, and physicochemical characteristics of biofortified bean flour. *Food Science & Nutrition*, 4(3), 384–397. <https://doi.org/10.1002/fsn3.301>
- Nout, M. J. R., & Kiers, J. L. (2005). Tempe fermentation, innovation and functionality: Update into the third millenium. *Journal of Applied Microbiology*, 98(4), 789–805. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2004.02471.x>
- Nyakuni, G. A., Kikafunda, J. K., Muyonga, J. H., Kyamuhangire, W. M., Nakimbugwe, D., & Ugen, M. (2008). Chemical and nutritional changes associated with the development of the hard-to-cook defect in common beans. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 59(7–8), 652–659. <https://doi.org/10.1080/09637480701602886>
- Owuamanam, C., Ogueke, C., Iwouno, J., & Edom, T. (2014). Use of seed sprouting in modification of food nutrients and pasting profile of tropical legume flours. *Nigerian Food Journal*, 32(1), 117–125. [https://doi.org/10.1016/S0189-7241\(15\)30104-1](https://doi.org/10.1016/S0189-7241(15)30104-1)
- Paredes-López, O., Reyes-Moreno, C., Montes-Rivera, R., & Carabez-Trejo, A. (1989). Hard-to-cook phenomenon in common beans- influence of growing location and hardening procedures. *International Journal of Food Science & Technology*, 24(5), 535–542. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1989.tb00677.x>
- Parmar, N., Singh, N., Kaur, A., & Thakur, S. (2017). Comparison of color, anti-nutritional factors, minerals, phenolic profile and protein digestibility between hard-to-cook and easy-to-cook grains from different kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) accessions. *Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 1023–1034. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2538-3>
- Paula, L. C., Lemes, A. C., Valencia-Mejía, E., Moreira, B. R., Oliveira, T. S., Campos, I. T. N., Neri, H. F. S., Brondani, C., Ghedini, P. C., Batista, K. A., & Fernandes, K. F. (2022). Effect of extrusion and autoclaving on the biological potential of proteins and naturally-occurring peptides from common beans: Antioxidant and vasorelaxant properties. *Food Chemistry: X*, 13, Article 100259. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100259>

- Perera, D., Devkota, L., Garnier, G., Panozzo, J., & Dhital, S. (2023). Hard-to-cook phenomenon in common legumes: Chemistry, mechanisms and utilisation. *Food Chemistry*, 415, Article 135743. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135743>
- Poblete, T., Rebolledo, K., Barrera, C., Ulloa, D., Valenzuela, M., Valenzuela, C., Pavez, E., Mendoza, R., Narbona, C., González, J., Estevez, S., Ortega, R., & González, C. (2020). Effect of germination and cooking on iron content, phytic acid and lectins of four varieties of chilean beans (*Phaseolus vulgaris*). *Journal of the Chilean Chemical Society*, 65(4), 4937–4942. <https://doi.org/10.4067/S0717-97072020000404937>
- Poder Ejecutivo. (2004, septiembre 6). Decreto N° 32149. Reglamento técnico RTCR:384: Frijol en grano. *La Gaceta*.
- Priya, T. S., & Manickavasagan, A. (2020). Common bean. In A. Manickavasagan, & P. Thirunathan (Eds.), *Pulses: Processing and product development* (pp. 77–98). Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41376-7>
- Ravoninjatovo, M., Ralison, C., Servent, A., Morel, G., Achir, N., Andriamazaoro, H., & Dornier, M. (2022). Effects of soaking and thermal treatment on nutritional quality of three varieties of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) from Madagascar. *Legume Science*, 4(4), Article e143. <https://doi.org/10.1002/leg3.143>
- Rebollo-Hernanz, M., Martín-Cabrejas, M. A., & Aguilera, Y. (2019). Thermal processing of legumes. In M. A. Martín-Cabrejas (Ed.), *Legumes nutritional quality, processing and potential health benefits* (pp. 215–234). The Royal Society of Chemistry.
- Richardson, J. C., & Stanley, D. W. (1991). Relationship of loss of membrane functionality and hard-to-cook defect in aged beans. *Journal of Food Science*, 56(2), 590–591. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb05334.x>
- Rousseau, S., Celus, M., Duijsens, D., Gwala, S., Hendrickx, M., & Grauwet, T. (2020). The impact of postharvest storage and cooking time on mineral bioaccessibility in common beans. *Food & Function*, 11(9), 7584–7595. <https://doi.org/10.1039/D0FO01302A>
- Roy, M., Imran, M. Z. H., Alam, M., & Rahman, M. (2021). Effect of boiling and roasting on physicochemical and antioxidant properties of dark red kidney bean (*Phaseolus vulgaris*). *Food Research*, 5(3), 438–445. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(3\).673](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(3).673)
- Ruiz-Ruiz, J. C., Dávila-Ortíz, G., Chel-Guerrero, L. A., & Betancur-Ancona, D. A. (2012). Wet fractionation of hard-to-cook bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds and characterization of protein, starch and fibre fractions. *Food and Bioprocess Technology*, 5(5), 1531–1540. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0451-0>
- Samtiya, M., Aluko, R. E., & Dhewa, T. (2020). Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: An overview. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2(1), Article 6. <https://doi.org/10.1186/s43014-020-0020-5>
- Sandoval-Peraza, M., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. (2021). Some physicochemical and functional properties of the rich fibrous fraction of hardened beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and its addition in the formulation of beverages. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 26, Article 100440. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100440>
- Schoeninger, V., Coelho, S. R. M., & Bassinello, P. Z. (2017). Industrial processing of canned beans. *Ciência Rural*, 47(5), Article e20160672. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160672>
- Segura-Campos, M. R., Cruz-Salas, J., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. (2014). Chemical and functional properties of hard-to-cook bean (*Phaseolus vulgaris*) protein concentrate. *Food and Nutrition Sciences*, 5(21), 2081–2088. <https://doi.org/10.4236/fns.2014.521220>

- Segura-Campos, M. R., García-Rodríguez, K., Ruiz-Ruiz, J. C., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. (2015). Effect of incorporation of hard-to-cook bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein hydrolysate on physical properties and starch and dietary fiber components of semolina pasta. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 1159–1165. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12330>
- Srisuma, N., Hammerschmidt, R., Uebersax, M. A., Ruengsakulrach, S., Bennink, M. R., & Hosfield, G. L. (1989). Storage induced changes of phenolic acids and the development of hard-to-cook in dry beans (*Phaseolus vulgaris* var. Seafarer). *Journal of Food Science*, 54(2), 311–314. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1989.tb03069.x>
- Stanley, D. W. (1992). A possible role for condensed tannins in bean hardening. *Food Research International*, 25(3), 187–192. [https://doi.org/10.1016/0963-9969\(92\)90136-S](https://doi.org/10.1016/0963-9969(92)90136-S)
- Ueno, S., Shigematsu, T., Karo, M., Hayashi, M., & Fujii, T. (2015). Effects of high hydrostatic pressure on water absorption of Adzuki beans. *Foods*, 4(2), 148–158. <https://doi.org/10.3390/foods4020148>
- Varriano-Marston, E., & Jackson, G. M. (1981). Hard-to-Cook phenomenon in beans: Structural changes during storage and imbibition. *Journal of Food Science*, 46(5), 1379–1385. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1981.tb04179.x>
- Vaz Patto, M. C., Amarowicz, R., Aryee, A. N. A., Boye, J. I., Chung, H.-J., Martín-Cabrejas, M. A., & Domoney, C. (2015). Achievements and challenges in improving the nutritional quality of food legumes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34(1–3), 105–143. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.897907>
- Venkatesh, M. S., & Raghavan, G. S. V. (2004). An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems Engineering*, 88(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.01.007>
- Wainaina, I., Kyomugasho, C., Wafula, E., Sila, D., & Hendrickx, M. (2022). An integrated kinetic and polymer science approach to investigate the textural stability of red kidney beans during post-harvest storage and subsequent cooking. *Food Research International*, 154, Article 110988. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.110988>
- Wainaina, I., Lugumira, R., Wafula, E., Kyomugasho, C., Sila, D., & Hendrickx, M. (2022). Insight into pectin-cation-phytate theory of hardening in common bean varieties with different sensitivities to hard-to-cook. *Food Research International*, 151, Article 110862. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110862>
- Wainaina, I., Wafula, E., Sila, D., Kyomugasho, C., Grauwet, T., Van Loey, A., & Hendrickx, M. (2021). Thermal treatment of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.): Factors determining cooking time and its consequences for sensory and nutritional quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3690–3718. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12770>
- Wang, N., Hou, A., Santos, J., & Maximiuk, L. (2017). Effects of cultivar, growing location, and year on physicochemical and cooking characteristics of dry beans (*Phaseolus vulgaris*). *Cereal Chemistry*, 94(1), 128–134. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-04-16-0124-FI>
- Worku, A., & Sahu, O. (2017). Significance of fermentation process on biochemical properties of *Phaseolus vulgaris* (red beans). *Biotechnology Reports*, 16, 5–11. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.09.001>