



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
y del Medio Natural

Impregnación a vacío como alternativa sostenible para
obtener harinas de haba (*Vicia faba*) enriquecidas en hierro

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos

AUTOR/A: Altuna Pérez, Carla Diega

Tutor/a: Talens Oliag, Pau

Director/a Experimental: ARNAL SALINAS, MILAGROS

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

La impregnación a vacío como tecnología sostenible para obtener harinas de haba (*Vicia faba*) enriquecidas en hierro

Resumen

Las habas son legumbres con un alto contenido en proteínas, hidratos de carbono complejos y fibra. Sin embargo, tienen una cantidad importante de factores antinutricionales que se pueden reducir o incluso eliminar con el procesado. Son una buena alternativa a la proteína animal y una forma fácil de introducirlas en la dieta es a través de sus harinas. Las harinas pueden obtenerse de la molturación directa de las legumbres o con algún pretratamiento para mejorar sus propiedades nutricionales, fisicoquímicas, funcionales o sensoriales. Uno de los pretratamientos más comunes es el remojo, que suele preceder a la cocción. Consume bastante tiempo, por ello, se puede combinar con algunas tecnologías para acelerarlo. Además, se puede aprovechar para incorporar compuestos hidrosolubles, y así obtener productos enriquecidos.

El objetivo de este trabajo fue obtener harinas de habas secas enriquecidas en hierro utilizando la impregnación a vacío durante el remojo. Para ello se ha evaluado el efecto de la impregnación a vacío y el enriquecimiento en hierro sobre la cinética de hidratación de las habas, y el impacto del proceso de obtención de las harinas (remojo con hierro, eliminación de la piel y cocción) sobre su contenido en hierro y bioaccesibilidad, y sus propiedades fisicoquímicas y tecno-funcionales.

Los resultados obtenidos indicaron que la impregnación a vacío aceleró la etapa de remojo. Además, la utilización de la disolución de hierro como medio de remojo, no afectó a la cinética de hidratación de las habas. Los diferentes procesos de obtención de las harinas dieron lugar a diferencias en el contenido de hierro y a su fracción bioaccesible. Mientras que el remojo con hierro aumentó ambos valores, la eliminación de la piel disminuyó su cantidad, pero aumentó su bioaccesibilidad, y la cocción afectó de manera distinta en función de la presencia de piel. Asimismo, el proceso de obtención afectó a las propiedades fisicoquímicas y tecno-funcionales y la cocción fue la etapa del procesado que mayores diferencias provocó.

Palabras clave: legumbre, haba, harina, remojo, hierro, bioaccesibilidad, impregnación a vacío.

Autora: Carla Diega Altuna Pérez

Tutor: Pau Talens Oliag

Tutora experimental: Milagros Arnal Salinas

Vacuum impregnation as a sustainable technology to obtain iron-fortified broad bean (*Vicia faba*) flours

Abstract

Broad beans are legumes high in protein, complex carbohydrates and fibre. However, they contain many antinutritional factors that can be reduced or even eliminated with processing. They are a good alternative to animal protein, and an easy way to introduce them into the diet is through their flours. Flours can be obtained from direct legume milling or with some pre-treatments to improve their nutritional, physicochemical, functional or sensory properties. One of the most common pre-treatments is soaking, which usually precedes cooking. It is quite time-consuming, so it can be combined with some technologies to speed it up. In addition, it can be used to incorporate water-soluble compounds to obtain fortified products.

The aim of this work was to obtain iron-fortified broad bean flours using vacuum impregnation during soaking. To this end, the effect of vacuum impregnation and iron enrichment on the hydration kinetics of the beans, and the impact of the processing of flours (soaking with iron, dehulling and cooking) on their iron content and bioaccessibility, and their physicochemical and techno-functional properties has been evaluated.

The results obtained indicated that vacuum impregnation accelerated the soaking stage. Furthermore, the use of the iron solution as a soaking medium did not affect the hydration kinetics of the beans. The different processes used to obtain the flours resulted in differences in the iron content and its bioaccessible fraction. While soaking with iron increased both values, dehulling decreased its content but increased its bioaccessibility, and cooking was affected differently depending on the presence of the hull. Likewise, the processing of flours affected their physicochemical and techno-functional properties, and cooking was the processing step that caused the greatest differences.

Keywords: legume, broad bean, flour, soaking, iron, bioaccessibility, vacuum impregnation.

Author: Carla Diega Altuna Pérez

Supervisor: Pau Talens Oliag

Experimental supervisor: Milagros Arnal Salinas

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor, Pau Talens, por haberme dado la oportunidad y la confianza de realizar este proyecto.

A mi tutora experimental, Mila Arnal, por su gran dedicación y enseñanza, su paciencia y sus consejos.

También a mis amigos, los de siempre y los que he conocido durante estos 4 años, por haberme acompañado durante este camino, en mis mejores momentos y, especialmente, en los más duros.

Y a mi familia, sobre todo a mis padres, que nunca han dudado de mí y me han apoyado en todas mis decisiones.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Las legumbres y el caso particular del haba (<i>Vicia faba</i>).....	1
1.2. El procesado de las habas secas	2
1.3. La impregnación a vacío y su uso para facilitar la hidratación de productos secos.....	3
1.4. El enriquecimiento de alimentos en micronutrientes como estrategia para evitar carencias en la población. El caso particular del hierro.	4
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. Objetivo general.....	7
2.2. Objetivos específicos	7
2.3. Plan de trabajo.....	7
3. MATERIALES Y MÉTODOS	8
3.1. Materiales y reactivos	8
3.2. Cinética de hidratación de las habas secas durante el remojo	8
3.3. Elaboración de las harinas enriquecidas en hierro	9
3.4. Determinación del contenido en hierro de las harinas de haba	10
3.5. Determinación de la bioaccesibilidad del hierro de las harinas de haba.....	10
3.6. Propiedades fisicoquímicas de las harinas de haba	11
3.6.1. Color.....	11
3.6.2. Tamaño de partícula	11
3.6.3. Densidad aparente.....	11
3.6.4. Índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua y poder de hinchamiento	11
3.7. Propiedades tecno-funcionales de las harinas de haba	12
3.7.1. Capacidad de retención de agua	12
3.7.2. Capacidad de absorción de aceite	12
3.7.3. Actividad y estabilidad emulsionante	13
3.7.4. Capacidad gelificante	13
3.8. Análisis estadístico	13
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	14
4.1 Efecto de la impregnación a vacío sobre la cinética de hidratación de las habas secas	14
4.2 Efecto de la solución de hierro en la cinética de hidratación de las habas secas.....	15
4.3 Efecto del proceso de elaboración de las harinas sobre su contenido en hierro y bioaccesibilidad	16
4.4 Efecto del proceso de elaboración de las harinas sobre sus propiedades fisicoquímicas y tecno-funcionales	19
5. CONCLUSIONES	26
6. BIBLIOGRAFÍA.....	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de las harinas obtenidas por diferentes procesos de elaboración..... 20

Tabla 2. Propiedades tecno-funcionales de las harinas obtenidas por diferentes procesos de elaboración..... 23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de elaboración de las harinas de habas secas.	9
Figura 2. Curvas de absorción de agua durante el remojo de las habas secas con y sin impregnación a vacío.	14
Figura 3. Curvas de absorción de agua y de disolución de hierro durante el remojo de las habas secas con impregnación a vacío.	16
Figura 4. Contenido de hierro de las harinas de haba obtenidas por diferentes procesos de elaboración.....	17
Figura 5. Contenido de hierro tras la digestión gastrointestinal simulada de las harinas de haba obtenidas por diferentes procesos de elaboración.	18
Figura 6. Curvas de distribución del tamaño de partícula de las harinas de haba obtenidas por diferentes procesos de elaboración.....	21

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

- AE: Actividad emulsionante
- AGNU: Asamblea General de las Naciones Unidas
- ANVISA: Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria de Brasil
- AOAC: Métodos de la Asociación de Químicos Analíticos Oficiales
- CAA: Capacidad de absorción de aceite
- CDC: Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades
- CMG: Concentración mínima de gelificación
- CRA: Capacidad de retención de agua
- DGI: Digestión gastrointestinal
- EE: Estabilidad emulsionante
- EFSA: Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria
- FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
- FFI: Iniciativa de Fortificación de los Alimentos
- FGS: Fluido gástrico simulado
- FIS: Fluido intestinal simulado
- FSS: Fluido salival simulado
- HCl: Ácido clorhídrico
- HR: harina de habas remojadas sin piel
- HRFe: harina de habas enriquecidas sin piel
- HRFe-P: harina de habas enriquecidas con piel
- HRFeV: harina de habas enriquecidas y cocidas sin piel
- HRFeV-P: harina de habas enriquecidas y cocidas con piel
- HR-P: harina de habas remojadas con piel
- HRV: harina de habas remojadas y cocidas sin piel
- HRV-P: harina de habas remojadas y cocidas con piel
- IAA: Índice de absorción de agua
- IB: Índice de blancura
- ISA: Índice de solubilidad en agua
- LDL: lipoproteínas de baja densidad
- MAPA: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
- NaFeEDTA: etilendiaminotetraacético férrico de sodio
- NaHCO₃: Bicarbonato de sodio
- NaOH: Hidróxido de sodio
- OMS: Organización Mundial de la Salud
- PH: Poder de hinchamiento
- TCA: ácido tricloroacético

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Las legumbres y el caso particular del haba (*Vicia faba*)

Las legumbres son cultivos que pertenecen a la familia vegetal *Fabaceae* también llamada *Leguminosae*, el tercer grupo de plantas más numeroso del mundo (FAO, 2016). A nivel nutricional, son ricas en proteína y son una fuente excelente de fibra, vitaminas (del grupo B, incluyendo folato, tiamina o niacina) y minerales (como el hierro, el potasio, el magnesio y el zinc). No tienen colesterol, ni gluten y su contenido en grasas y sodio es bajo, así como su índice glicémico, lo que les convierte en una buena alternativa para personas diabéticas (Bessada *et al.*, 2019). Se ha demostrado que tienen efectos beneficiosos sobre la salud como, por ejemplo, que su consumo habitual puede ayudar a reducir hasta un 22 % el riesgo de cardiopatías. Esto es debido a su alto contenido en potasio, que facilita la disminución de la presión arterial, y en fibra, tanto insoluble como soluble, la cual destaca por su efecto en la reducción del colesterol LDL (FAO, 2021).

Además, las leguminosas como cultivo son beneficiosas a nivel medioambiental ya que no necesitan fertilizantes nitrogenados porque son capaces de fijar el nitrógeno atmosférico. Asimismo, esa capacidad biológica de fijar el nitrógeno en el suelo tiene efectos positivos en la biodiversidad de la tierra productiva, ya que estimula el crecimiento de microorganismos responsables de mejorar la estructura y la disponibilidad de nutrientes del suelo (Vioque *et al.*, 2012).

Desde hace siglos, las legumbres han sido parte fundamental de la alimentación humana. Sin embargo, aun tratándose de un grupo de alimentos cuya función es vital en la alimentación saludable, en la producción sostenible de alimentos y en la seguridad alimentaria, su valor nutricional y su consumo no se valoran lo suficiente. Por ello, la Asamblea General de las Naciones Unidas (AGNU) proclamó el 2016 como El Año Internacional de las Legumbres, contribuyendo así a la promoción que desea realizar la FAO con este alimento para acabar con el hambre y proteger al medio ambiente, al planeta y a sus habitantes (FAO, 2016).

En España, según el informe del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) sobre el consumo alimentario (2020), el mercado de legumbres incrementó un 14 % en volumen durante el año 2020 y el consumo per cápita también aumentó un 17,1 % respecto al periodo anterior, situándose en 3,91 kilogramos por persona y año. Entre las más consumidas estaban los garbanzos con 1,61 kilos/persona/año, las lentejas con 1,17 kilos/persona/año y las alubias con 1,10 kilos/persona/año. Sin embargo, en 2021, tanto la compra de legumbres en volumen como el consumo per cápita disminuyeron un 9,9 % y un 10 %, respectivamente, siendo el consumo per cápita de 3,52 kilogramos por persona y año (MAPA, 2020; MAPA, 2021).

Con el actual objetivo de reducir el consumo de carne en la dieta humana, las legumbres tienen una gran importancia en la producción mundial de proteínas de origen vegetal (Multari *et al.*, 2015) ya que contienen entre un 20 y un 40 % de proteínas. Concretamente el haba, *Vicia faba*, destaca por ser una de las legumbres con mayor contenido, un 26,1 %, y su harina, un 29,76 %. Es rica en aminoácidos como la lisina (19,8 g/kg MS) y en comparación con los cereales, es deficiente en metionina, cisteína y triptófano. Su contenido en carbohidratos oscila entre el 51 % y el 68 %, siendo el almidón el más abundante. Los principales azúcares solubles son los oligosacáridos de la familia de la rafinosa, responsables de causar flatulencia (Dhull *et al.*, 2022). En la piel del haba es donde se encuentra la mayor proporción de fibra dietética (25 %),

compuestos fenólicos y minerales. También destacan los compuestos bioactivos, como los flavonoides, que tienen propiedades antiinflamatorias y antidiabéticas (Etemadi *et al.*, 2018). Sin embargo, las habas contienen diferentes factores antinutricionales como lectinas, saponinas, fitatos, inhibidores de la tripsina y los glucósidos vicina y convicina. Estos dos últimos son los responsables de la anemia hemolítica, llamada comúnmente favismo, en individuos deficientes de glucosa-6-fosfato deshidrogenasa. Asimismo, la digestibilidad de la proteína está limitada por algunos de estos factores antinutricionales como los taninos, los cuales se presentan como taninos condensados en la piel. Además, estos pueden actuar como agentes quelantes de los iones metálicos, lo que conduce a una reducción de su absorción gastrointestinal. Por ello, es importante la cocción de este tipo de legumbres, ya que mejora la calidad nutricional para su posterior consumo, reduciendo en gran cantidad este tipo de factores antinutricionales (Rahate *et al.*, 2021).

Según diversos estudios, una elevada ingesta de proteína vegetal, en comparación con las dietas basadas en alimentos de origen animal, se asocia con una mortalidad general y cardiovascular menor (Erbersdobler *et al.*, 2017). Además, se ha demostrado que sustituir la proteína animal por la vegetal puede mejorar el perfil de metabolitos en el intestino, así como desempeñar una función hipoglucemiante (Multari *et al.*, 2015).

1.2. El procesado de las habas secas

Como la mayoría de las legumbres, desde su recolección, las habas siguen una serie de procesos hasta llegar al producto final. El primer paso es la extracción de las vainas, seguido de un secado del cual se obtienen las legumbres enteras. Esta es una etapa indispensable, ya que su eficiencia afecta a la calidad y a su conservación. Con este paso se garantiza una humedad uniforme en todas las semillas, que en el caso de las habas se recomienda que sea inferior al 14 % (Rahate *et al.*, 2021).

Las habas secas pueden ser comercializadas directamente, ser congeladas o enlatadas tras una cocción con previo remojo, o ser molidas para obtener harina o fracciones de estas ricas en proteínas, almidón o fibra (L'Hocine *et al.*, 2020). Para obtener la harina, las habas se pueden moler directamente o pueden ser pretratadas con un remojo, descascarillado, germinación, cocción o tostado, y así obtener una harina con mejores propiedades nutricionales, funcionales y/o organolépticas.

Con el remojo, se produce la rehidratación de las semillas, lo que permite una mayor calidad y un menor tiempo de la posterior cocción (L'Hocine *et al.*, 2020). Además, se reduce el contenido de algunos factores antinutricionales debido a su lixiviación al medio de remojo o a la acción enzimática derivada de la activación de sus propias enzimas, sin afectar, generalmente, a la composición química ni al contenido en minerales de las habas (Khazaei y Vandenberg, 2020). El remojo puede ir seguido de una etapa de germinación cuyo objetivo es la mejora de las propiedades sensoriales y nutricionales de las harinas. Hay evidencias de que la germinación logra un aumento progresivo del contenido de proteína de las habas durante las 24-72 horas que dura dicho proceso, lo que puede ser consecuencia de los cambios metabólicos que suceden en el interior de las semillas de las legumbres que implican la hidrólisis del almidón debida a la activación de las enzimas propias de las semillas y su acción durante un periodo determinado de tiempo (Handa *et al.*, 2017).

Otro de los pretratamientos que se les puede realizar a las habas antes de la molienda es una cocción. Con ella se consigue reducir el contenido de factores antinutricionales termolábiles, lo

que aumenta significativamente el valor nutricional de dichas legumbres (Shi *et al.*, 2018). Además, se reduce el llamado “beany flavour”, el cual es resultado de la acción de la enzima lipoxigenasa sobre los ácidos grasos libres presentes en la semilla, lo que deriva en la aparición de cetonas que proporcionan sabores indeseables a las harinas. Al aplicar temperaturas superiores a 80 °C se favorece la desnaturalización de dicha enzima, lo que al mismo tiempo puede provocar la reducción del valor nutricional de la legumbre al disminuir la solubilidad y favorecer la desnaturalización de proteínas de alto valor biológico (Bei Wang *et al.*, 2021). Sin embargo, cabe resaltar que este tratamiento térmico además de tener un efecto positivo en el sabor de las harinas, destaca por mejorar las propiedades físicas y tecno-funcionales del producto final (Pasqualone *et al.*, 2020). Además de la cocción, se pueden emplear otros tratamientos térmicos como el tostado, la cocción a presión o la cocción a vapor.

Por último, uno de los pretratamientos más comunes antes de la molienda es el descascarillado, que consiste en eliminar la piel de la legumbre. El objetivo de esta etapa es reducir el tiempo de cocción y mejorar la digestibilidad y palatabilidad, ya que se eliminan la mayoría de los compuestos fenólicos, incluidos los taninos, que forman complejos insolubles con las proteínas y proporcionan un indeseable sabor amargo (L’Hocine *et al.*, 2020). Se pueden utilizar tanto métodos de descascarillado secos como húmedos, que se diferencian únicamente en que los húmedos incluyen una etapa previa donde se reblandece la piel (Malcolmson y Han, 2019).

Tras uno o distintos pretratamientos se realiza un segundo secado que precede a la molienda de las legumbres para obtener harina, y así facilitar la integración de estas en diferentes productos alimentarios. Esas harinas se pueden utilizar directamente, o fraccionarse en porciones ricas en proteína, almidón o fibra (Jiang *et al.*, 2016). La harina de haba es una buena opción para elaborar pastas sin gluten, productos de panadería, mayonesa sin huevo, tofu, hummus o alternativas lácteas como el queso, el yogur o el kéfir (Sharan *et al.*, 2021).

1.3. La impregnación a vacío y su uso para facilitar la hidratación de productos secos

El remojo de las legumbres es una de las etapas que más tiempo consume durante su procesado, por ello, es de gran interés acelerarlo. Una de las formas más comunes es la aplicación de altas temperaturas. Sin embargo, el uso de temperaturas superiores a 60 °C tiene diversas desventajas, como modificar drásticamente las propiedades nutricionales o inducir cambios en los componentes del grano, como la gelatinización del almidón o la desnaturalización de las proteínas. Por ello, recientemente, se ha combinado con otras tecnologías como los ultrasonidos, las altas presiones hidrostáticas, la irradiación, o la impregnación a vacío (Miano y Augusto, 2018).

La impregnación a vacío es una tecnología que consiste en introducir un producto sólido dentro de una solución, bajar la presión haciendo vacío (despresurización) y, tras un periodo de tiempo determinado, restablecer la presión atmosférica. Durante la despresurización, se fuerza la salida del aire que hay ocluido dentro del alimento, y cuando se restablece la presión atmosférica, gracias al gradiente de presión generado, la solución externa entra hacia el interior del producto (Zanella-Díaz *et al.*, 2014). Es decir, la exposición al vacío genera una diferencia de presiones entre la solución de impregnación externa y la matriz alimentaria, lo que resulta en una transferencia de masa (Moreno *et al.*, 2017). Esta tecnología ha sido ampliamente estudiada para acelerar la deshidratación osmótica o para incorporar compuestos bioactivos a productos, generalmente vegetales, por su mayor porosidad (Radziejewska-Kubzdela *et al.*, 2014). Sin embargo, ha sido poco estudiada para acelerar la hidratación de productos secos como las legumbres.

Durante el remojo convencional de productos secos como las legumbres, el agua que entra a través de los poros desplaza a los gases adsorbidos mientras impregna la matriz alimentaria. Como consecuencia, la presión de esos gases aumenta, ejerciendo una resistencia que impide el avance del frente de hidratación. Por tanto, con la impregnación a vacío de las legumbres dentro de su medio de remojo, se estarían eliminando dichos gases de la matriz, lo que facilitaría la entrada de agua y, por consiguiente, se aceleraría su hidratación (Chigwedere *et al.*, 2019).

1.4. El enriquecimiento de alimentos en micronutrientes como estrategia para evitar carencias en la población. El caso particular del hierro.

En la actualidad, la deficiencia en micronutrientes afecta a más de 2000 millones de personas en todo el mundo (OMS, 2017). Concretamente, la deficiencia de hierro, que en muchos casos conlleva a padecer anemia, es uno de los problemas nutricionales más comunes, que afecta tanto a países desarrollados como no desarrollados. Se produce cuando la ingesta de hierro procedente de la dieta o su absorción en el organismo están por debajo de los valores recomendados, y se estima que afecta a un 40 % de la población (Shubham *et al.*, 2021).

En general, las legumbres se consideran una de las mayores fuentes de minerales esenciales y, en concreto, las habas destacan por su gran contenido en hierro y zinc (Dhull *et al.*, 2022). No obstante, a pesar de su presencia en elevadas concentraciones, la biodisponibilidad de estos elementos es muy baja debido a la presencia de los factores antinutricionales, como el ácido fítico, el cual se encuentra de forma natural en las legumbres, y se encarga de formar complejos insolubles con cationes divalentes como el Fe, el Zn o el Ca, impidiendo así su absorción en el duodeno (Zhang *et al.*, 2020).

El hierro es un micronutriente esencial, el cual participa en procesos vitales como la respiración celular o los sistemas enzimáticos, y se puede encontrar en el organismo como hierro hemo y hierro no hemo (Shubham *et al.*, 2021). El hierro hemo proviene de alimentos de origen animal, mientras que, el no-hemo, proviene de alimentos de origen vegetal como las legumbres (Man *et al.*, 2021). Este último se puede encontrar en los alimentos en diferentes estados de oxidación, siendo las formas químicas más estables el férrico (forma oxidada, Fe⁺³) y el ferroso (forma reducida, Fe⁺²). Sin embargo, el organismo sólo permite la absorción de hierro en este último estado, lo que plantea que una persona con una dieta vegana sólo absorba un 10 % del hierro total ingerido (Shubham *et al.*, 2021).

Para prevenir su carencia, y la de otros micronutrientes, han surgido diferentes estrategias como la suplementación dietética, la biofortificación, la diversificación de la dieta o la fortificación de alimentos (Wakeel *et al.*, 2018).

La suplementación dietética de nutrientes específicos consiste en el suministro de dosis relativamente altas de micronutrientes, normalmente en forma de píldoras, cápsulas o jarabes. Destaca por su capacidad de suministrar una cantidad óptima de nutrientes específicos, en una forma altamente absorbible lo que permite satisfacer las necesidades inmediatas de grupos vulnerables (OMS, 2016). Un ejemplo sería la administración de suplementos de hierro y folato a mujeres embarazadas. Sin embargo, tiene la desventaja de que resulta costoso y requiere una gran implicación del consumidor.

Otra de las estrategias, la más novedosa, es la biofortificación de cultivos. Este proceso se trata de suministrar los micronutrientes diarios necesarios directamente a los cultivos básicos (Hirschi, 2009). Se han desarrollado avances en plantación de maíz y trigo con alto contenido en

zinc, cereales con elevadas cantidades de lisina o boniatos ricos en vitamina A. Sin embargo, su aplicación es muy limitada y poco aceptada.

La diversificación de la dieta, también llamada modificación de la dieta, ofrece un gran potencial para prevenir las deficiencias de dichos micronutrientes. Diversificar la dieta significa incrementar la calidad y la variedad de los alimentos ricos en micronutrientes que se consumen para satisfacer todas las necesidades nutricionales del cuerpo humano (Tontisirin *et al.*, 2002). Un estudio realizado por Rao *et al.* (2014) en mujeres con anemia en la India rural, describe la importancia de la educación nutricional en torno a acciones sociales que conduzcan a la modificación de la dieta, lo que concluye en un cambio de hábitos alimentarios que, por consiguiente, mejora significativamente los niveles de hierro en las mujeres afectadas.

Por último, el enriquecimiento o fortificación de alimentos se trata de otra estrategia que ha sido ampliamente adoptada por su alto rendimiento en la reducción de problemas nutricionales. Se refiere específicamente a la adición de nutrientes a un alimento por encima del nivel en el que se encuentran normalmente en dicho alimento (Wakeel *et al.*, 2018). Un requisito indispensable es que los alimentos enriquecidos sean consumidos por gran parte de la población. Además, es necesario que los fortificantes utilizados tengan un elevado porcentaje de absorción y no afecten a las propiedades sensoriales de los alimentos (OMS, 2006).

Una estrategia eficaz para aumentar la cantidad de hierro absorbido por el organismo proveniente de las habas sería aumentando su contenido, es decir, enriqueciéndolas con hierro. De esta forma, aunque la biodisponibilidad no cambiara, se estaría absorbiendo una mayor cantidad debido a que la cantidad contenida en la legumbre sería mayor. El enriquecimiento en hierro de los alimentos es una estrategia que se lleva a cabo desde el 1940, cuando se empezaron a enriquecer las harinas y el pan en los Estados Unidos y el Reino Unido. Más tarde, a partir de 1980, se empezaron a enriquecer otros alimentos como el arroz, los productos derivados del maíz, los cereales de desayuno, la leche o los condimentos, entre otros. Sin embargo, esta estrategia se trata de un gran reto, ya que se han encontrado diversos obstáculos a la hora de enriquecer los productos con hierro. Una de las principales barreras a superar se relaciona con la gran variación del grado de absorción de los compuestos de hierro, lo que se debe a las alteraciones indeseables en el color y en el sabor causadas por la propia adición de hierro. Además, la presencia de inhibidores de la absorción de hierro en alimentos como los cereales o la leche es otra de las principales dificultades a tener en cuenta (Hurrell *et al.*, 2022). La harina se considera un alimento básico y común, por lo que cumple uno de los principales requisitos a considerar en el enriquecimiento de alimentos, que sea un alimento que se consuma habitualmente y que no implique cambios en la dieta de la población (L'Hocine, 2020). La OMS, la FAO y los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) de EE.UU. han iniciado varios programas de enriquecimiento de la harina, creando en 2002 la Iniciativa de Fortificación de los Alimentos (FFI) con el objetivo de mejorar la salud de la población, siendo el enriquecimiento de la harina de trigo y de maíz con diferentes minerales y vitaminas una práctica común. Destaca Reino Unido por su normativa de enriquecimiento obligatorio con hierro en la harina de trigo con 1,65 mg/100 g de harina. Lo mismo ocurre en Brasil, donde la Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria de Brasil (ANVISA) estableció que la adición debía ser de un mínimo de 4,2 mg de hierro por cada 100 g de harina de trigo y de maíz procesada. Asimismo, en países como Chile, Argentina y Jordania la harina de trigo se enriquece con sulfato ferroso, cuya eficacia ha sido demostrada (Latunde-Dada *et al.*, 2019). Por todo ello, una forma fácil de incluir las habas enriquecidas en hierro en la dieta sería en forma de harina. La harina se puede añadir en una gran variedad de productos y, además, la harina de haba es una buena opción para sustituir o reducir el consumo de harina de trigo y es una buena alternativa de consumo de proteínas (Keskin *et al.*, 2021). Además, los resultados dependerán de la sal de

hierro utilizada para enriquecer ya que se ha demostrado que en productos con un contenido alto en factores antinutricionales como las habas, el NaFeEDTA tiene una absorción de dos a tres veces mayor que la del sulfato ferroso (Mattar *et al.*, 2022).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

El objetivo general del trabajo fue obtener harinas de habas secas enriquecidas en hierro utilizando la impregnación a vacío durante el remojo.

2.2. Objetivos específicos

Para alcanzar este objetivo general, se abordaron diferentes objetivos específicos:

- Evaluar el efecto de la impregnación a vacío y el enriquecimiento en hierro sobre la cinética de hidratación de las habas secas.
- Evaluar el impacto del proceso de elaboración de las harinas sobre su contenido en hierro y bioaccesibilidad.
- Evaluar el impacto del proceso de elaboración de las harinas sobre sus propiedades fisicoquímicas y tecno-funcionales.

2.3. Plan de trabajo

El plan de trabajo para conseguir los objetivos propuestos fue el siguiente:

- Selección y clasificación de las habas
- Cinética de hidratación de las habas con agua, con y sin impregnación a vacío.
- Cinética de hidratación con disolución de hierro con impregnación a vacío.
- Modelización de las cinéticas de hidratación.
- Elaboración de las distintas harinas.
- Determinación del contenido en hierro de las harinas y su bioaccesibilidad.
- Determinación de las propiedades fisicoquímicas de las harinas: color, tamaño de partícula, densidad aparente, índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua y poder de hinchamiento.
- Determinación de las propiedades tecno-funcionales de las harinas: capacidad de absorción de agua, capacidad de absorción de aceite, actividad y estabilidad emulsionante y capacidad gelificante.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales y reactivos

Para la elaboración de las distintas harinas se emplearon habas secas (*Vicia faba*) adquiridas en Leantomanage, S.L. (Pozuelo de Alarcón, Madrid, España). Para enriquecer las habas con hierro se utilizó etilendiaminotetraacético férrico de sodio 12-14 % Fe (NaFeEDTA) de Sigma-Aldrich, Co. (St. Louis, MO, EE.UU.) y para los ensayos de determinación del contenido de hierro en las harinas se utilizaron los reactivos siguientes: clorhidrato de hidroxilamina (H₂NOH·HCl) y 1,10-fenantrolina de Sigma-Aldrich, Co. (St. Louis, MO, EE.UU.); ácido tricloroacético (TCA) y acetato de sodio trihidratado de Labbox Labware S.L. (Premià de Dalt, Barcelona, Spain) y ácido clorhídrico (HCl) de Scharlau Chemie, S.A. (Sentmenat, Barcelona, España).

3.2. Cinética de hidratación de las habas secas durante el remojo

La cinética de hidratación de las habas durante la etapa de remojo se realizó a presión atmosférica y utilizando la impregnación a vacío durante los primeros 5 min del remojo (contabilizados dentro del primer tramo y restableciendo la presión atmosférica transcurrido dicho tiempo). En ambos casos, las habas se remojaron con agua desionizada con una proporción legumbres:agua de 1:3 (p/v) a temperatura ambiente, y se determinó la ganancia de agua por diferencia de peso a los diferentes tiempos.

En el ensayo a presión atmosférica, el tiempo total de remojo fue de 16 horas y se tomó muestra cada hora durante las 6 primeras horas y cada dos horas durante las 10 horas siguientes; obteniéndose así tiempos de: 60, 120, 180, 240, 300, 360, 480, 600, 720, 840 y 960 min. En el caso del ensayo con impregnación a vacío, el tiempo total de remojo fue de 3 horas y durante ese tiempo se registró la ganancia de agua cada 10 min durante la primera hora, cada media hora durante las dos siguientes horas y a las 3 h de remojo; obteniéndose así tiempos de: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120 y 180 min. Se prepararon muestras independientes para cada tiempo y transcurrido el tiempo de remojo, las muestras se escurrieron y se secaron con papel, para finalmente pesarlas y registrar la ganancia de agua a cada uno de los tiempos.

Para evaluar si la disolución de hierro afectaba a la cinética de hidratación, se repitió el remojo con impregnación a vacío utilizando una disolución de hierro 0,5 mg NaFeEDTA/mL. Todas las cinéticas se realizaron por duplicado, y se utilizaron muestras independientes (50 g de habas secas) para cada uno de los tiempos.

La cinética de absorción de agua de las habas se modelizó con la ecuación de Peleg (Ecuación 1), utilizando la ganancia de agua en vez de su humedad, tal y como se describe en el estudio de Zanella-Díaz *et al.* (2014):

$$H_t = H_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (1)$$

Donde H_t es el agua absorbida a tiempo t (g H₂O/g muestra); H_0 es el agua absorbida a $t=0$ min, que se considera 0 (g H₂O/g muestra); t es el tiempo de remojo (min); k_1 es la constante de Peleg 1 o de velocidad (min·g muestra/g H₂O); k_2 es la constante de Peleg 2 o de capacidad (g muestra/g H₂O).

3.3. Elaboración de las harinas enriquecidas en hierro

Para elaborar las harinas enriquecidas, se siguió el diagrama de flujo representado en la Figura 1. En primer lugar, las habas secas se remojaron utilizando la impregnación a vacío con una disolución de hierro 0,5 mg NaFeEDTA/mL (1:3, p/v), hasta alcanzar el 100 % de hidratación. Tras el remojo, las habas se dividieron en dos partes y una de las partes se coció al vapor en autoclave, a 121 °C durante 5 min. Seguidamente, a una parte de las habas remojuadas y a una parte de las remojuadas y cocidas se les quitó la piel, mientras que el resto se dejaron con piel. Posteriormente, todas las habas se secaron en una estufa a 50 °C y se molieron con un molino de bolas (Mixer Mill MM400, Retsch GmbH, Haan, Germany).

Paralelamente se elaboraron harinas control siguiendo el mismo procedimiento, pero remojuando las habas con agua. Por lo tanto, tal y como se muestra en la Figura 1, se obtuvieron un total de 8 tipos de harina de haba: harina de habas remojuadas sin piel (HR), harina de habas remojuadas con piel (HR-P), harina de habas remojuadas y cocidas sin piel (HRV), harina de habas remojuadas y cocidas con piel (HRV-P), harina de habas enriquecidas sin piel (HRFe), harina de habas enriquecidas con piel (HRFe-P), harina de habas enriquecidas y cocidas sin piel (HRFeV), harina de habas enriquecidas y cocidas con piel (HRFeV-P).

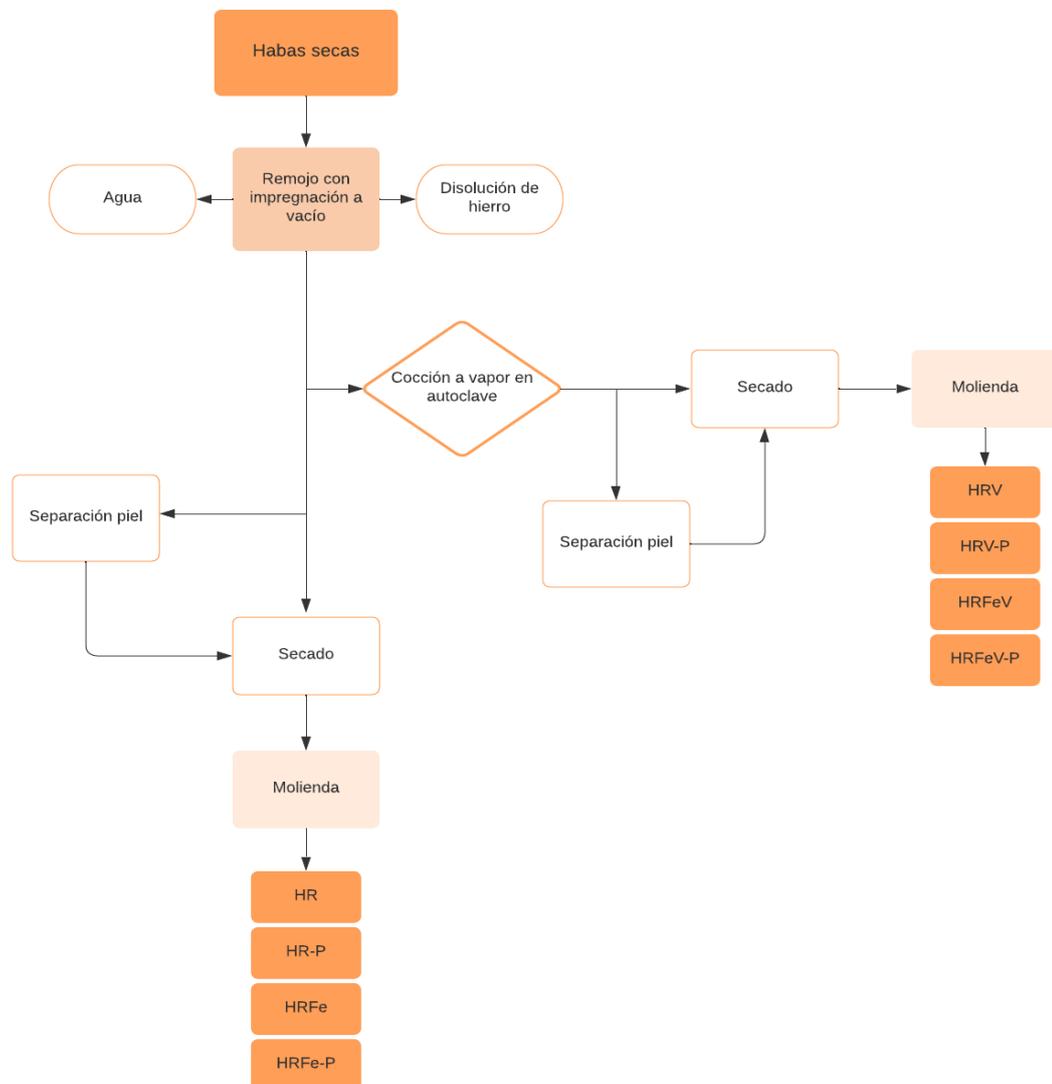


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de elaboración de las harinas de habas secas.

3.4. Determinación del contenido en hierro de las harinas de haba

El contenido en hierro de las harinas se determinó espectrofotométricamente según el protocolo descrito por Kosse *et al.* (2001) con algunas modificaciones de Zunin *et al.* (2017).

En primer lugar, se prepararon la solución extractora de hierro, la solución cromógena y la solución estándar de hierro. Para elaborar la solución extractora de hierro se disolvieron 10 g de monohidrocloreto de hidroxilamina en 40 mL de agua destilada. Tras ello, se añadieron 20 mL de HCl concentrado, 20 g de TCA y se llevaron a 200 mL con agua destilada. Para preparar la solución cromógena, se disolvieron 36 mg de 1,10-fenantrolina en 10 mL de agua destilada y se llevó a 100 mL con acetato de sodio 3 M. Por último, se preparó una solución estándar de hierro a una concentración de 0,5 mg Fe/mL con NaFeEDTA, a partir de la cual se prepararon los patrones a 0, 5, 10, 20, 25 y 50 µg Fe/mL.

Para realizar la extracción de hierro de las muestras, se pesaron 0,5 g de harina en tubos de ensayo y se añadieron 5 mL de solución extractora de hierro. A continuación, se pusieron dichos tubos en un baño con agua hirviendo durante 15 min. Tras ello, se enfriaron en un baño de agua con hielo y se centrifugaron a 8000 rpm, 10 °C durante 10 min. Finalmente, el sobrenadante se filtró con un filtro Whatman 93.

Para determinar el contenido de hierro de las harinas y los patrones, se mezclaron en un tubo de ensayo 0,5 mL de muestra filtrada o patrón con 1,5 mL de solución cromógena, y se incubaron a temperatura ambiente y oscuridad durante 15 min. Transcurrido el tiempo, se midió la absorbancia a 510 nm. Un blanco de cada muestra (0,5 mL de muestra + 1,5 mL de acetato de sodio 3 M) se preparó para eliminar posibles interferencias. Tanto la extracción de hierro de las harinas, como su determinación, se realizó por duplicado.

3.5. Determinación de la bioaccesibilidad del hierro de las harinas de haba

Para determinar el contenido de hierro bioaccesible de las harinas de habas, se realizó una simulación de la digestión gastrointestinal (DGI) de las harinas siguiendo el protocolo estandarizado INFOGEST (Brodkorb *et al.*, 2019; Minekus *et al.*, 2014) y se determinó el contenido de hierro soluble en el sobrenadante mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) utilizando un Agilent 7900 ICP-MS (Agilent Technologies, Inc. Headquarters, Santa Clara, California, US).

Antes de la DGI, se prepararon los fluidos digestivos, el fluido salival simulado (FSS), el fluido gástrico simulado (FGS) y el fluido intestinal simulado (FIS) siguiendo el protocolo de Minekus *et al.* (2014). La DGI se llevó a cabo a 37 °C en un agitador Intell-Mixer™ RM-2 (ELMI Ltd., Riga, Letonia) dentro de una cámara de incubación Selecta (JP 177 Selecta, S.A., Barcelona, España), por duplicado.

Para simular la fase oral, se mezclaron 0,5 g de harina con 0,5 g de agua y dicha mezcla se diluyó en proporción 1:1 (p/v) con el FSS que contenía la enzima α -amilasa (75 U/mL). Transcurridos 2 min, se detuvo la fase disminuyendo el pH hasta 3 con HCl 2 M. En ese momento, se añadió FGS y pepsina gástrica (2000 U/mL) al bolo oral en proporción 1:1 (v/v), iniciándose así la fase gástrica. Después de 120 minutos, se detuvo la fase gástrica aumentando el pH de la mezcla a 7 con NaOH 1 M. Finalmente, para simular la fase intestinal, el quimo gástrico se mezcló en proporción 1:1 (v/v) con FIS (pH 7), pancreatina (basado en la actividad de tripsina para conseguir 100 U/mL) y extracto biliar bovino (10 mM). Tras 120 min, la digestión se finalizó

mediante la inactivación de las enzimas en un baño de agua a 100 °C durante 5 minutos, seguido de un baño con hielo durante 10 minutos. Las muestras fueron después centrifugadas a 8000 rpm durante 10 min a 4 °C, se separaron los sobrenadantes y se liofilizaron. Después de la digestión, el hierro total del sobrenadante se determinó por ICP-MS, ya que el método espectrofotométrico presentaba interferencias, lo que pudo ser debido a los compuestos añadidos durante la DGI. Además, se prepararon blancos de la digestión, que contenían 0,5 g de agua en vez de harina, para restar el hierro proveniente de las enzimas.

3.6. Propiedades fisicoquímicas de las harinas de haba

3.6.1. Color

El color se determinó con un espectrocolorímetro Minolta CM-700d (Konica Minolta Sensing, Inc., Osaka, Japón). Tras la calibración del equipo, se obtuvieron las coordenadas de color CIEL*a*b* (L*, a*, b*) utilizando como referencia el observador 10° y el iluminante D65, y se calculó el índice de blancura (IB) utilizando la Ecuación 2 (Marta *et al.*, 2022). Las medidas se realizaron por triplicado.

$$IB = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

3.6.2. Tamaño de partícula

Para analizar la distribución del tamaño de partícula de las harinas se siguió el protocolo descrito por Jiang *et al.*, 2016. Para ello se utilizó un Láser Scattering Mastersizer 2000 (Malvern Instruments, Malvern, UK), equipado con una unidad Scirocco (Dry Powder Unit) con un rango de medida de 0,02-2000 µm (Villarino *et al.*, 2015). Los parámetros de medida fijados fueron un índice de refracción de 1,52 y de absorción de 0,1. Los resultados fueron expresados como tamaño máximo de partícula por debajo del cual se encuentra el 50 % de la muestra (d(0.5)) y como diámetro medio del volumen equivalente ([4,3]).

3.6.3. Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente de las harinas de haba se utilizó el protocolo descrito por Du *et al.* (2014). Una probeta graduada de 10 mL, previamente tarada, se llenó con harina y se golpeó suavemente sobre la bancada del laboratorio hasta que no hubo disminución del volumen una vez alcanzada la marca de 10 mL. La densidad aparente se calculó como peso de la muestra por unidad de volumen (g/mL) y se determinó por triplicado.

3.6.4. Índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua y poder de hinchamiento

Para medir el índice de absorción de agua (IAA), el índice de solubilidad en agua (ISA) y el poder de hinchamiento (PH) se emplearon los protocolos descritos por Du *et al.* (2014) y Cornejo y Rosell (2015) con pequeñas modificaciones. Se mezclaron 0,83 g de muestra con 10 mL de agua destilada y se cocieron a 60 °C durante 15 min en un baño de agua. A continuación, la pasta de harina cocida se enfrió a temperatura ambiente (25 °C) y se centrifugó a 3000 g, 4 °C durante 10 min. El sobrenadante se transfirió a un recipiente previamente pesado y se liofilizó, y se registró

el peso del precipitado. Tras la liofilización, se determinó el peso de los sólidos disueltos en el sobrenadante.

El IAA, el ISA y el PH se calcularon mediante las ecuaciones 3, 4 y 5.

$$IAA (g/g) = \frac{\text{peso sedimento}}{\text{peso harina}} \quad (3)$$

$$ISA (g/100 g) = \frac{\text{peso sólidos disueltos en sobrenadante}}{\text{peso harina}} \times 100 \quad (4)$$

$$PH (g/g) = \frac{\text{peso sedimento}}{\text{peso harina} - \text{peso sólidos disueltos en sobrenadante}} \quad (5)$$

3.7. Propiedades tecno-funcionales de las harinas de haba

3.7.1. Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua (CRA) es la cantidad máxima de agua que 1 g de harina absorberá y retendrá tras centrifugar a baja velocidad. Esta propiedad se determinó siguiendo el protocolo descrito por Setia *et al.* (2019). Para ello, en un tubo de centrífuga se añadieron 1 g de harina y 5 mL de agua destilada, se agitó con un vórtex y se mantuvo en posición vertical durante 20 min, agitándolo durante 10 segundos cada 5 min. Transcurrido el tiempo, la suspensión se centrifugó a 1000 g durante 15 min a temperatura ambiente. Tras la centrifugación, el sobrenadante se decantó cuidadosamente y se registró el peso del sedimento.

La CRA se calculó tal y como se muestra en la Ecuación 6 y se expresó como g de agua retenida por g de harina.

$$CRA (g \text{ agua}/g \text{ muestra}) = \frac{\text{peso sedimento} - \text{peso harina}}{\text{peso harina}} \quad (6)$$

3.7.2. Capacidad de absorción de aceite

La capacidad de absorción de aceite (CAA) de las harinas se midió siguiendo el protocolo descrito por Setia *et al.* (2019). Se pesó 1 g de harina y se mezcló con 10 g de aceite de girasol en un tubo de centrífuga, el cual se mantuvo en posición vertical durante 30 min, y se agitó con un vórtex durante 10 s a intervalos de 5 min. A continuación, la mezcla de harina y aceite se centrifugó a 1000 g durante 15 min a temperatura ambiente. Después de la centrifugación, se descartó cuidadosamente el sobrenadante y se registró el peso del precipitado. La CAA se expresó como g de aceite absorbido por g de harina y se calculó como se muestra en la Ecuación 7.

$$CAA (g \text{ aceite}/g \text{ muestra}) = \frac{\text{peso sedimento} - \text{peso harina}}{\text{peso harina}} \quad (7)$$

3.7.3. Actividad y estabilidad emulsionante

La actividad y la estabilidad emulsionante (AE y EE, respectivamente) de las harinas se determinaron mediante el protocolo descrito por Stone *et al.* (2021). Para ello, se mezclaron 1,75 g de harina con 25 mL de agua, se ajustó el pH a 7 utilizando HCl o NaOH 0,1 M y se dejó en agitación durante toda la noche. Al día siguiente se ajustó el pH de nuevo a 7 y se añadieron 25 mL de aceite de girasol. La mezcla se homogeneizó en un vaso de precipitados de 100 mL durante 1 min a velocidad 4 utilizando un Ultraturrax. A continuación, la emulsión se dividió uniformemente en 4 tubos de centrifuga de 15 mL. Dos tubos se centrifugaron a 1300 g durante 5 min (VWR Clinical 200, VWR International, Radnor, PA) para calcular la AE, y los otros dos se calentaron a 80 °C durante 30 min, se enfriaron y se centrifugaron para calcular la EE. La AE y EE se expresaron en porcentaje y se calcularon según las Ecuaciones 8 y 9.

$$AE (\%) = \frac{\text{Altura capa emulsionada (cm)}}{\text{Altura total emulsión (cm)}} \times 100 \quad (8)$$

$$EE (\%) = \frac{\text{Altura capa emulsionada (cm)}}{\text{Altura total emulsión (cm)}} \times 100 \quad (9)$$

3.7.4. Capacidad gelificante

La capacidad gelificante de las harinas se midió siguiendo el protocolo descrito por Sosa *et al.* (2020). Para ello, se prepararon suspensiones al 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 %, 12 %, 14 %, 16 %, 18 % y 20 % (p/100 mL) de harina con agua. Seguidamente, 5 mL de dichas suspensiones se pusieron en un tubo y se calentaron durante 1 hora en agua hirviendo. Tras ello, se sometieron a un enfriamiento rápido en un baño con hielo y se mantuvieron a 4 °C durante 2 h. La capacidad gelificante se expresó como la concentración mínima de gelificación (CMG) y es aquella a la que al invertir el tubo la muestra ni se cae ni se desplaza. La capacidad gelificante de las harinas se determinó por duplicado.

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el análisis simple de la varianza (ANOVA) utilizando el programa Statgraphics Centurion XVII (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, VA, EE.UU.). El método empleado para discernir entre las medias fue el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher con un nivel de confianza del 95 %. Los resultados se expresaron como media de las repeticiones \pm desviación estándar.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Efecto de la impregnación a vacío sobre la cinética de hidratación de las habas secas

Para evaluar el efecto de la impregnación a vacío sobre la cinética de hidratación de las habas secas se registraron las curvas de absorción de agua de las habas durante el remojo a presión atmosférica y con impregnación a vacío, tal y como se muestra en la Figura 2.

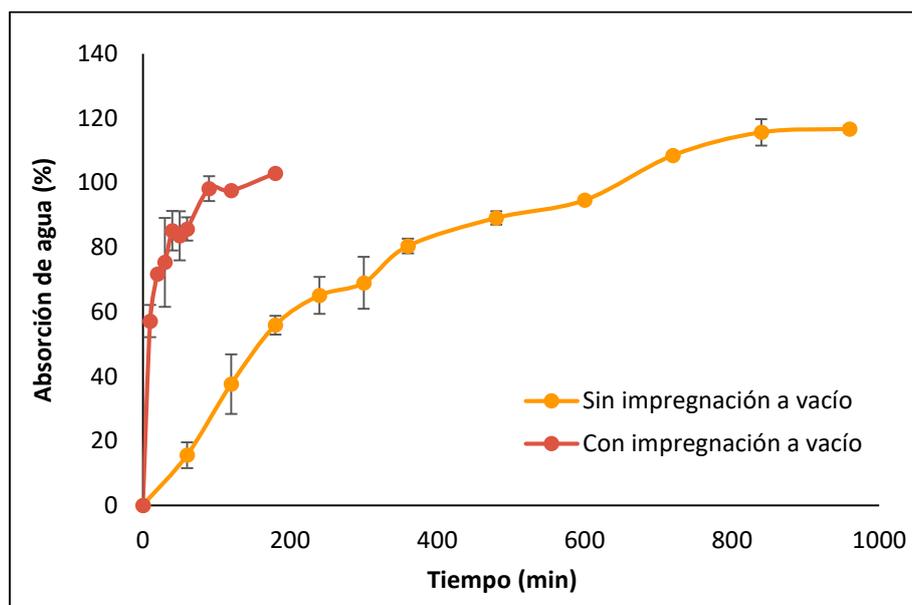


Figura 2. Curvas de absorción de agua durante el remojo de las habas secas con y sin impregnación a vacío.

En esta figura se puede observar cómo, en el primer tramo, las habas remojadas con impregnación a vacío tienen una mayor velocidad de absorción de agua que las habas sin impregnación. Durante la primera hora, las habas remojadas con impregnación absorbieron un 85,70 % de agua, mientras que las habas remojadas a presión atmosférica absorbieron solo un 15,56 %. Este incremento en la velocidad de absorción de agua durante el remojo con impregnación a vacío podría deberse tanto al gradiente de presión generado al aplicar el vacío, como a la estructura interna de la propia legumbre. Durante las primeras fases de la hidratación, el agua entra a través del hilo, y llena los espacios entre el cotiledón y el tegumento, y los dos cotiledones (Miano y Augusto, 2018). Por lo tanto, como el haba es una de las legumbres con mayor porosidad, probablemente debido a su mayor tamaño, esos espacios serán relativamente grandes y estarán llenos de aire, que con el avance del frente de hidratación aumentará su presión pudiendo enlentecer el proceso de hidratación. Sin embargo, cuando se aplica la impregnación a vacío, ese aire se extrae, y al reestablecer la presión atmosférica, el agua fluye hacia los espacios, acelerando su hidratación (Chigwedere *et al.*, 2019). En esta línea, pocos estudios se han encontrado. Xiao *et al.* (2015) estudiaron el impacto del remojo a vacío en soja tras 8 y 16 h, y observaron un aumento significativo del agua absorbida con respecto a la misma remojada a presión atmosférica. Otros estudios realizados en arroz han comprobado que el remojo a vacío acelera la tasa de absorción de agua. Li *et al.* (2021) obtuvieron antes de los 50 min valores de humedad mayores en comparación con el remojo a presión atmosférica y Tian

et al. (2014) solo precisaron 30 min para conseguir una mayor humedad del arroz aplicando pulsos de vacío que remojo a presión atmosférica.

Para poder predecir el porcentaje de absorción de agua de las habas a cualquier tiempo de remojo, se modelizaron las curvas experimentales de absorción de agua con la ecuación de Peleg. Esta ecuación es una de las más utilizadas para modelizar la hidratación o rehidratación de alimentos (Miano y Augusto, 2018). Tras la modelización se obtuvieron las Ecuaciones 10 y 11 para el remojo a presión atmosférica y con impregnación a vacío, respectivamente, que describen el nivel de hidratación de las habas en función del tiempo de remojo.

$$\frac{t}{H_t - H_0} = 0.5605t + 267.09 \quad (10)$$

$$\frac{t}{H_t - H_0} = 0.9181t + 11.16 \quad (11)$$

Como se puede observar en las ecuaciones 10 y 11, ambas constantes se vieron afectadas por la impregnación a vacío, pero la k1 mucho más que la k2. La k1 está inversamente relacionada con la tasa inicial de absorción de agua, por lo que un valor alto de k1 indica que la tasa inicial de absorción de agua es baja. En las ecuaciones se muestra una k1 de 267,09 para el ensayo a presión atmosférica, a diferencia del ensayo con impregnación a vacío que tiene una k1 de 11,16. Por ello, como la k1 es más grande en el remojo a presión atmosférica, significa que tiene una tasa inicial de absorción de agua más baja. Asimismo, la constante k2 está inversamente relacionada con la máxima capacidad de absorción de agua. En este caso los valores son similares, las diferencias no son tan grandes como las observadas en la k1, pero las muestras del remojo a presión atmosférica tienen una capacidad máxima de absorción ligeramente superior, ya que la k2 es más pequeña, siendo de 0,5605, a diferencia de las del remojo a vacío que es de 0,9181. En ambos casos, los valores de las constantes predichas por el modelo se corresponden con los resultados obtenidos experimentalmente.

Tal y como se puede calcular utilizando las ecuaciones obtenidas (Ecuaciones 10 y 11), para alcanzar el 100 % de hidratación, con el remojo a presión atmosférica se requerirían 608 min, mientras que utilizando la impregnación de vacío únicamente se necesitarían 136 min.

4.2 Efecto de la solución de hierro en la cinética de hidratación de las habas secas

Con el objetivo de obtener harinas de haba enriquecidas en hierro, el agua de remojo se sustituyó por una disolución de hierro. Con lo cual, para evaluar si la disolución de hierro afectaba a la cinética de hidratación, se repitió el remojo con impregnación a vacío utilizando una disolución de hierro 0,5 mg NaFeEDTA/mL. Se utilizó este compuesto de hierro porque es soluble en agua y su absorción es considerablemente mayor que otros fortificantes en productos como las legumbres (Mattar *et al.*, 2022). Además, tiene la ventaja de ser más estable durante el procesado y almacenamiento que otros compuestos de hierro solubles en agua, por lo que no provoca destacables cambios organolépticos en los alimentos (Martínez-Navarrete *et al.*, 2002). La concentración utilizada fue de 0,5 mg NaFeEDTA/mL porque la concentración máxima de EDTA no está legislada por la normativa de la Unión Europea, pero la EFSA (2010) recomienda no superar los 1,9 mg EDTA/kg/día.

En la Figura 3 se pueden observar las curvas de absorción, tanto de agua como de disolución de hierro, durante el remojo con impregnación a vacío de las habas secas. Tal y como se observa en la figura, la cinética de hidratación sigue la misma tendencia en ambos casos.

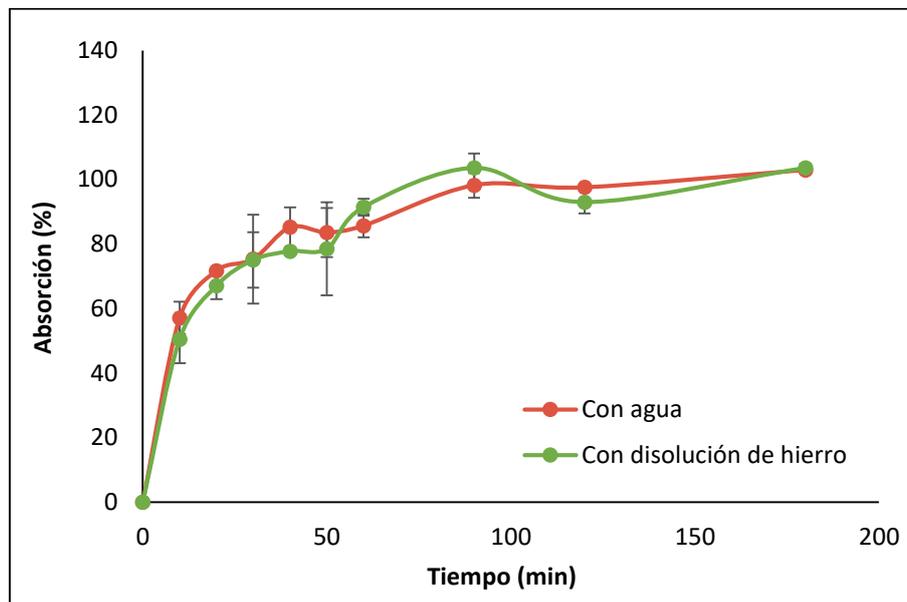


Figura 3. Curvas de absorción de agua y de disolución de hierro durante el remojo de las habas secas con impregnación a vacío.

Por lo tanto, según los resultados obtenidos, la disolución de hierro no alteró la cinética de hidratación, ya que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre el % de absorción del agua y de disolución de hierro a ninguno de los distintos tiempos de remojo.

Resultados similares fueron obtenidos por Miano y Augusto (2018) al remojar alubias carioca en una disolución de sulfato ferroso. Estudiaron dos concentraciones distintas (0,271 % y 0,542 %) y ninguna de las dos alteró la cinética de hidratación de las alubias debido probablemente a que las concentraciones utilizadas no modificaron variables que afectan a la cinética de hidratación, como el pH o la fuerza iónica del medio.

4.3 Efecto del proceso de elaboración de las harinas sobre su contenido en hierro y bioaccesibilidad

Tras verificar que la disolución de hierro no afectaba a la cinética de hidratación de las habas, se obtuvieron dos tipos de harina enriquecidas con tratamientos diferentes (Figura 1). Una harina era de habas con solo el remojo, y la otra con habas remojadas y cocidas al vapor. A su vez, ambas harinas se obtuvieron con piel y sin ella. Además, en paralelo se prepararon harinas control que eran las mismas, pero utilizando agua como medio de remojo. En ambos casos se alcanzó el 100 % de hidratación de las habas, remojándolas durante 136 min y utilizando la impregnación a vacío durante los primeros 5 min del remojo.

Con el objetivo de evaluar como afectaba el procesado al contenido en hierro de las distintas harinas de haba, se determinó su contenido. En la Figura 4 se pueden observar los resultados que se han obtenido para cada una de las harinas, teniendo en cuenta los tres tratamientos que

se llevaron a cabo durante el procesado de éstas: la separación o eliminación de la piel, el remojo con hierro y la cocción.

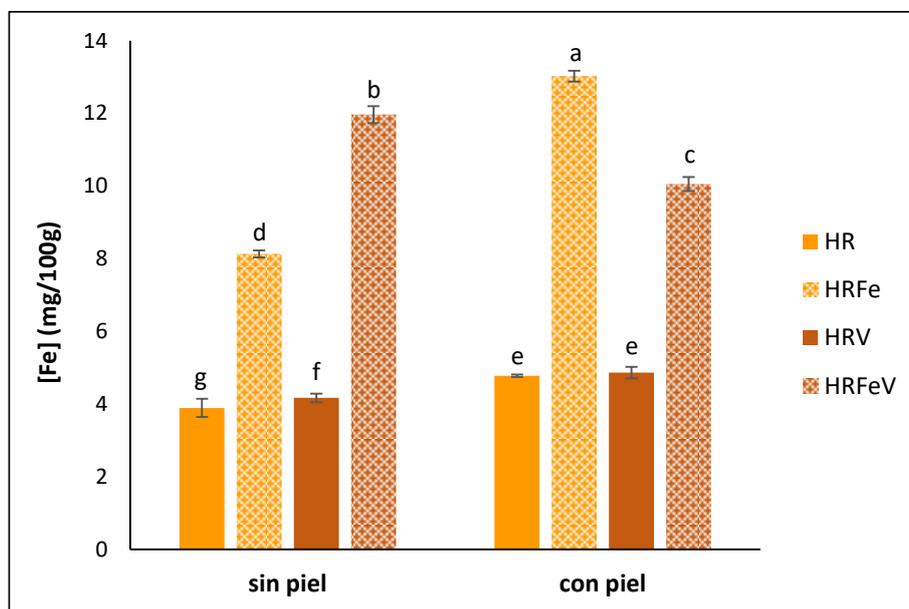


Figura 4. Contenido de hierro de las harinas de haba obtenidas por diferentes procesos de elaboración (Las diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas entre las harinas de haba obtenidas con método de elaboración distintos ($p < 0,05$)).

En primer lugar, como se muestra en la Figura 4, en todos los casos, excepto en las harinas de habas enriquecidas y cocidas, al eliminar la piel se reduce de forma significativa el contenido en hierro. Estos resultados que se obtienen tras eliminar la piel de las habas sugieren que parte del hierro, tanto el naturalmente presente como el añadido, se encuentra en dicha piel, con lo cual, al eliminarla se reduce su contenido. Luo *et al.* (2010) afirman esta hipótesis, ya que en su estudio determinaron el contenido en hierro de la piel y de la legumbre sin piel, y presentó mayor contenido en hierro la piel. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, en el caso de las harinas enriquecidas y cocidas, el contenido en hierro al eliminar la piel, en vez de reducirse, aumentó. Es decir, la harina enriquecida y cocida sin piel tenía un mayor contenido que la harina enriquecida con piel. Esta excepción podría deberse a que como el autoclavado se realiza con piel, durante el tratamiento, parte del hierro presente en la piel habría difundido hacia el cotiledón.

En cuanto al remojo, se ve claramente que cuando las habas se han remojado con la disolución de hierro aumenta significativamente su contenido (Figura 4). Concretamente, se consiguió aumentar el doble el contenido de hierro de las harinas enriquecidas sin piel (HRFe), y casi el triple el contenido de las harinas enriquecidas con piel (HRFe-P). Por ejemplo, mientras que las harinas de habas remojadas sin piel (HR) tenían un contenido de 3,90 mg Fe/100 g, las harinas elaboradas a partir del mismo tipo de haba, pero enriquecidas en hierro (HRFe) tenían un contenido de 8,18 mg Fe/100 g. Una observación similar se hizo en otro estudio, según el cual, tras remojar las legumbres (soja, altramuzy y frijol) en una solución de bicarbonato de sodio (NaHCO_3), la cantidad de sodio (Na) aumentó, demostrando que el medio de remojo afectaba a la concentración de minerales de los granos (El-Adawy *et al.*, 2000).

Por último, respecto a la cocción, tal y como se puede observar en la Figura 4, prácticamente no afectó a las harinas de habas remojadas y cocidas (HRV, HRV-P), pero sí afectó a las harinas de habas enriquecidas y cocidas (HRFeV, HRFeV-P). En las harinas de habas remojadas y cocidas, solo se puede observar un ligero pero significativo aumento en la HRV, que podría ser debido a que parte del hierro naturalmente presente en la piel, difundiera hacia el cotiledón durante el tratamiento. Sin embargo, en las harinas de habas enriquecidas y cocidas, el autoclavado afectó tanto al contenido de hierro de las harinas con piel, como sin piel, pero de forma diferente. El contenido de hierro de la HRFeV-P descendió tras el autoclavado debido probablemente a que parte del hierro difundió hacia el vapor que condensó sobre las habas. Sin embargo, el contenido de hierro de la HRFeV aumentó, probablemente debido a que, como se ha comentado anteriormente, parte del hierro presente en la piel difundió hacia el cotiledón durante el tratamiento térmico. Aun así, ambas harinas enriquecidas (HRFeV, HRFeV-P) contenían una mayor cantidad de hierro que sus respectivos controles (HRV, HRV-P). Concretamente, HRFeV-P dos veces más que HRV-P, y HRFeV casi tres veces más que HRV.

Como las habas contienen cantidades importantes de factores antinutricionales como el ácido fítico que forma complejos insolubles con diversos elementos, entre los que se encuentra el hierro, impidiendo su disociación para su posterior absorción en el intestino delgado y en el duodeno (Zhang *et al.*, 2020), una vez determinado el contenido de hierro de las harinas, se determinó su bioaccesibilidad. Es decir, la cantidad de hierro que, tras la digestión, se encuentra disponible para su absorción (Sensoy, 2014).

En la Figura 5, se pueden observar los resultados de la cantidad de hierro presente en el sobrenadante de la digestión de las harinas, lo que correspondería con el hierro bioaccesible.

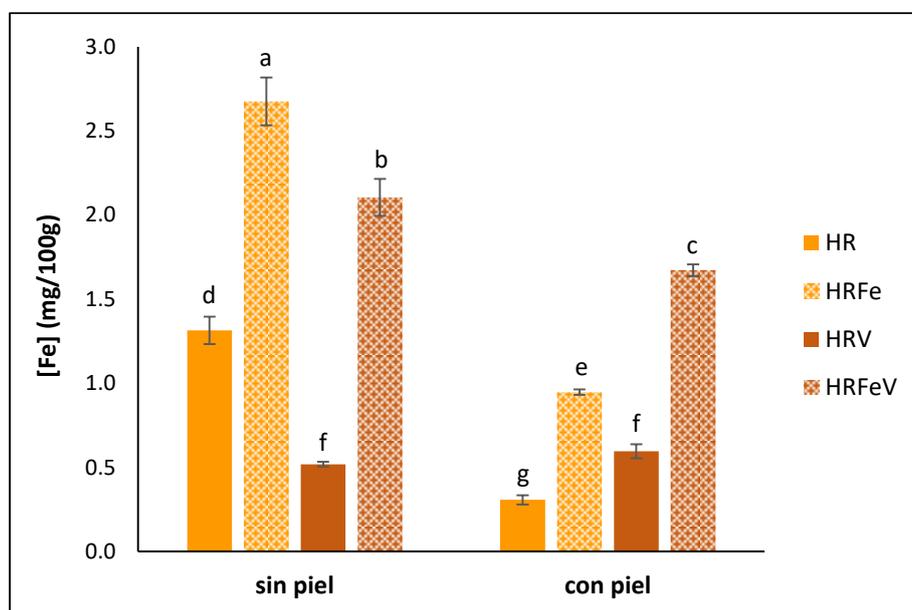


Figura 5. Contenido de hierro tras la digestión gastrointestinal simulada de las harinas de haba obtenidas por diferentes procesos de elaboración (Las diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas entre las harinas de haba obtenidas con método de elaboración distintos ($p < 0,05$)).

Comparado con los valores del contenido de hierro de las harinas antes de la digestión (Figura 4), se puede observar como la concentración de hierro tras la digestión gastrointestinal es

significativamente menor ($p \leq 0,05$). Por ejemplo, en las harinas enriquecidas (HRFe y HRFe-P) un 2,68 y un 0,95 mg Fe/100 g serían el hierro bioaccesible de una concentración inicial de 8,14 y 13,03 mg Fe/100g, respectivamente. En el caso de la HR y HR-P el contenido de hierro pasó de ser 3,90 y 4,78 mg Fe/100 g respectivamente, a 1,31 y 0,31 mg Fe/100 g. Aun así, las harinas enriquecidas seguían teniendo un mayor contenido en hierro que las no enriquecidas. Además, tal y como se puede observar en los resultados, la eliminación de la piel aumentó la bioaccesibilidad del hierro, en todos los casos excepto en las harinas de habas remojadas y cocidas, donde no se observaron diferencias significativas entre la harina con y sin piel. Que las harinas con piel tengan una menor cantidad de hierro bioaccesible podría ser debido a la gran cantidad de taninos que tienen las habas en la piel, que pueden quelar el hierro y formar complejos estables, reduciendo así la fracción de hierro soluble y, por lo tanto, bioaccesible (Luo *et al.*, 2010). Sin embargo, el autoclavado modificó la bioaccesibilidad de forma diferente dependiendo de si las harinas tenían o no piel. En el caso de las harinas sin piel, la etapa de cocción disminuyó dicha bioaccesibilidad, mientras que las HR y la HRFe tenían un contenido de 1,31 y 2,68 mg Fe/100 g, las HRV y HRFeV contenían un 0,52 y 2,10 mg Fe/100 g, respectivamente. En cambio, en las muestras con piel ocurrió lo contrario, la bioaccesibilidad del hierro aumentó, la concentración de hierro para las HR-P y HRFe-P fue de 0,31 y 0,95 mg Fe/100 g y, al aplicar la etapa de cocción, dichos valores aumentaron a 0,60 y 1,67 mg Fe/100 g (HRV-P y HRFeV-P, respectivamente). Estos resultados podrían deberse a que, durante la cocción, la piel pierde parte de los factores antinutricionales que quelan el hierro, y por eso se observa una mayor bioaccesibilidad. Sin embargo, cuando no hay piel, y por lo tanto no hay presencia de tantos antinutrientes, otros factores como la solubilidad podrían estar teniendo un mayor impacto. Los estudios de Krishnan *et al.* (2012) y Gwala *et al.* (2020) sobre la bioaccesibilidad de diferentes minerales del mijo y de los cacahuets de Bambara, respectivamente, coinciden con dichos resultados; la eliminación de la cáscara o de la piel aumenta la bioaccesibilidad del calcio, hierro y zinc, entre otros.

4.4 Efecto del proceso de elaboración de las harinas sobre sus propiedades fisicoquímicas y tecno-funcionales

Para estudiar el efecto que tenía el proceso de obtención de las harinas sobre las propiedades fisicoquímicas se midió el color, el tamaño de partícula, la densidad aparente, el índice de absorción de agua (IAA), el índice de solubilidad en agua (ISA) y el poder de hinchamiento (PH). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1. Generalmente, todas las propiedades medidas se vieron muy afectadas por el tratamiento térmico, pero mucho menos o nada por el enriquecimiento en hierro y la eliminación de la piel.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de las harinas obtenidas por diferentes procesos de elaboración.

Muestra	Parámetro						
	IB (Color)	Tamaño de partícula		Densidad aparente (g/mL)	IAA (g/g)	ISA (g/100 g)	PH (g/g)
		d(0.5)	D[4.3]				
HR	88,8 ± 0,1 ^a	55 ± 2 ^f	106 ± 2 ^d	0,763 ± 0,007 ^d	2,21 ± 0,04 ^d	27,4 ± 0,3 ^a	3,05 ± 0,05 ^d
HR-P	87,7 ± 0,2 ^b	45 ± 3 ^g	132 ± 6 ^c	0,786 ± 0,006 ^c	2,59 ± 0,02 ^c	25,0 ± 0,3 ^b	3,45 ± 0,01 ^c
HRV	76,5 ± 0,2 ^e	165 ± 8 ^a	212 ± 6 ^a	0,955 ± 0,008 ^a	3,85 ± 0,03 ^a	13,7 ± 0,1 ^e	4,46 ± 0,03 ^a
HRV-P	77,6 ± 0,4 ^d	156 ± 7 ^b	213 ± 4 ^a	0,930 ± 0,003 ^b	3,80 ± 0,05 ^{ab}	14,1 ± 0,2 ^e	4,42 ± 0,04 ^{ab}
HRFe	86,8 ± 0,2 ^c	64 ± 2 ^e	130 ± 3 ^c	0,791 ± 0,024 ^c	2,20 ± 0,02 ^d	27,7 ± 0,1 ^a	3,05 ± 0,03 ^d
HRFe-P	88,5 ± 0,2 ^a	45 ± 5 ^g	172 ± 25 ^b	0,776 ± 0,014 ^{cd}	2,64 ± 0,03 ^c	24,0 ± 0,5 ^c	3,48 ± 0,02 ^c
HRFeV	72,2 ± 0,3 ^f	134 ± 2 ^c	179 ± 3 ^b	0,944 ± 0,004 ^{ab}	3,75 ± 0,00 ^b	14,1 ± 0,2 ^e	4,36 ± 0,01 ^b
HRFeV-P	76,3 ± 0,4 ^e	121 ± 5 ^d	180 ± 4 ^b	0,952 ± 0,012 ^a	3,77 ± 0,04 ^b	14,7 ± 0,2 ^d	4,42 ± 0,06 ^{ab}

Diferentes letras en las columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre las harinas de habas obtenidas por diferentes procesos de elaboración ($p < 0,05$)

En primer lugar, el color se evaluó mediante el índice de blancura (IB). Tal y como se muestra en la Tabla 1, aunque existan diferencias estadísticamente significativas entre todas las muestras, se puede observar que los resultados se pueden agrupar en dos. Por una parte, las harinas que no han sufrido tratamiento térmico cuyo IB es superior, y por otra las que han sufrido una etapa de cocción, con un IB inferior. Por ejemplo, la harina de habas remojadas en agua sin piel (HR) presenta un IB de 88,75, mientras que la misma harina con tratamiento térmico (HRV) tiene un IB de 76,49. Esas diferencias observadas en el IB podrían ser debidas a las reacciones de Maillard que tienen lugar durante el tratamiento térmico, donde los azúcares reductores reaccionan con los grupos amino de las proteínas, provocando el oscurecimiento de las harinas (Marta *et al.*, 2022). El estudio de Wodajo y Emire (2022) sobre las harinas de alubias blancas también muestra que el procesamiento de las harinas provoca una menor claridad de la harina, es decir, un IB menor.

Respecto al tamaño de partícula, en la Tabla 1 se pueden ver los resultados del d(0.5) y D[4,3], y en la Figura 6 se pueden ver las curvas de distribución del tamaño de partícula de las 8 harinas. Se puede apreciar que los resultados abarcan un amplio rango de tamaños, desde 1 micrómetro hasta los 2 milímetros aproximadamente, debido a los diferentes tamaños de los componentes. En las muestras que sí han sufrido tratamiento térmico, se puede observar una distribución bimodal, cuyos picos principales se encuentran aproximadamente entre 91-120 μm y 316-363 μm , respectivamente. Por el contrario, las harinas que no tienen tratamiento térmico presentan una distribución trimodal y sus picos están entre 3-4 μm , 23-26 μm y 240-417 μm , respectivamente. Asimismo, como muestran los datos de la Tabla 1, se puede observar que las harinas que no han sido sometidas a la cocción tienen un tamaño de partícula menor; los valores de d(0.5) oscilan entre 45 y 64 μm , lo que significa que el 50 % de las partículas totales son más pequeñas que este tamaño, mientras que las harinas tratadas térmicamente presentan valores para d(0.5) de entre 121 y 164 μm . Por otra parte, D[4,3] es un indicador de qué tamaños de partículas contienen la mayoría del volumen; en el caso de las harinas no tratadas térmicamente los valores se encuentran entre 106 y 172 μm , mientras que las harinas que sí han sido tratadas térmicamente presentan valores entre 179 y 213 μm . Por lo tanto, se puede concluir que las harinas de habas cocidas en autoclave se tratan de harinas menos finas en comparación con las

muestras sin etapa de cocción. Los resultados obtenidos no coinciden con los de Jiang *et al.* (2016), quienes estudiaron la distribución del tamaño de partícula de harinas de haba tratadas térmicamente con cocción convencional y con microondas. Las harinas que ellos obtuvieron tenían una distribución bimodal y valores de $d(0.5)$ en el rango de 430 a 530 μm . Estas diferencias observadas entre los resultados podrían ser debidas a que el tamaño de partícula de una harina no depende solo de la materia prima y el tratamiento realizado, sino también del tipo de molienda y las condiciones utilizadas (Thakur *et al.*, 2019).

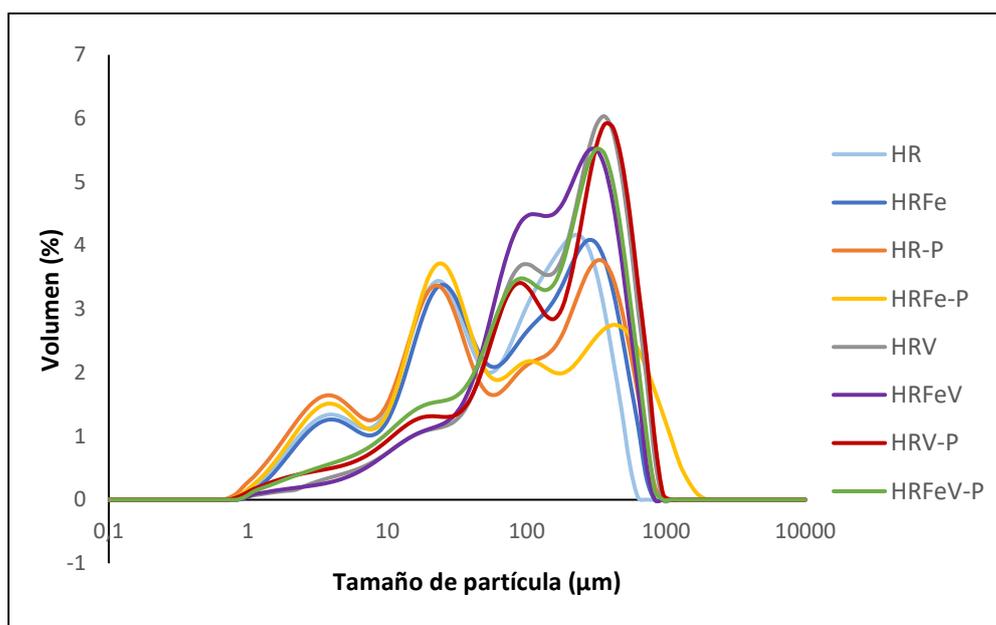


Figura 6. Curvas de distribución del tamaño de partícula de las harinas de haba obtenidas por diferentes procesos de elaboración.

Por otra parte, la densidad aparente proporciona la información requerida para la manipulación del producto, así como para su transporte, envasado y almacenamiento (Ahmed *et al.*, 2021). Como se muestra en los datos de la Tabla 1, la densidad aparente de las harinas varía entre 0,763 g/mL y 0,955 g/mL, pudiéndose diferenciar dos grupos, un primer grupo donde la densidad aparente está entre los 0,763 y 0,791 g/mL, y un segundo grupo donde está entre los 0,930 y 0,955 g/mL. El primer grupo corresponde a las harinas de haba donde estas solo han sido remojadas, mientras que el segundo grupo pertenece a las que han sido remojadas y cocidas. Es decir, la cocción de las habas tiene relación con una mayor densidad aparente de sus harinas, lo que denota una estructura de las harinas más densa (Du *et al.*, 2014), y que estaría relacionada con el mayor tamaño de partícula de dichas harinas. La misma tendencia obtuvieron Kumar *et al.*, (2022) pero con valores más bajos, cuyos resultados fueron 0,58 g/mL para la harina de habas remojadas y 0,71 g/mL para la harina de habas remojadas y cocidas. Asimismo, Naiker *et al.* (2020) obtuvieron valores de 0,66 g/mL y 0,72 g/mL para la harina de judías jacinto remojadas y remojadas y cocidas, respectivamente.

El IAA determina el volumen ocupado por el almidón después de hincharse en exceso de agua, e indica la integridad del almidón en las dispersiones acuosas (Du *et al.*, 2014). Según se observa en la Tabla 1, existen diferencias significativas entre las muestras, pero se puede observar que las harinas de habas tratadas térmicamente tienen mayores IAA que las harinas donde las habas solo han sido remojadas. Los valores más altos corresponden a las harinas de habas remojadas

y cocidas con piel y sin piel (HRV-P, HRV), 3,80 y 3,85 g/g, respectivamente, y los valores más bajos a la misma harina, pero sin cocción (HR) y a la harina de habas enriquecidas sin piel (HRFe), con valores de 2,21 y 2,20 g/g, respectivamente. Esta misma tendencia la sigue el PH, el cual se relaciona con el contenido en proteínas y almidón de las harinas (Kaur *et al.*, 2013). Los valores oscilan entre 3,05 y 4,46 g/g, no habiendo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre la mayoría de pares de harinas, enriquecidas y sin enriquecer. Las harinas con mayor PH son la harina de habas remojadas y cocidas sin piel (HRV) con un valor de 4,46 g/g, y la harina de habas remojadas y cocidas con piel (HRV-P) y la harina de habas enriquecidas y cocidas con piel (HRFeV-P), con un valor de 4,42 g/g. Inversamente, las harinas con el PH más bajo son la harina de habas remojadas sin piel (HR) y la harina de habas enriquecidas sin piel (HRFe), con un valor de 3,05 g/g en ambos casos. Que la cocción sea el tratamiento que más afecta a estas propiedades, incrementando sus valores, podría ser debido a la gelatinización del almidón y la desnaturalización de las proteínas que tiene lugar durante el autoclavado de las habas (Bento *et al.*, 2021). Durante la gelatinización del almidón, se produce la desestabilización de su estructura interna cristalina, por lo que se incrementa la presencia de estructuras amorfas y, por ende, la aparición de grupos hidrófilos que favorecen la unión del agua (Lv *et al.*, 2011). Además, el desdoblamiento de las proteínas que se lleva a cabo durante la desnaturalización proteica aumenta la relación superficie-masa, lo que facilita la exposición de enlaces peptídicos y cadenas laterales polares y, por consiguiente, aumenta la capacidad para atrapar y retener moléculas de agua (Lin y Fernández-Fraguas, 2020). Simons y Hall III (2018) observaron un aumento en el IAA de las harinas de judías pintas después de la cocción (2,51 a 3,06 g/g), que fue similar a este estudio. Wodajo y Emire (2022) también afirmaron que el autoclavado provoca un incremento del IAA en las harinas de judías blancas. Por otra parte, en relación con el PH, según Aprianita *et al.* (2009) un alto contenido en proteínas puede causar que los gránulos de almidón se incrusten en una matriz proteica rígida, lo que limita aún más el contacto entre el almidón y el agua y, en consecuencia, limita la hinchazón. Por ello, al romper los enlaces proteicos por el calentamiento, se favorece dicho contacto con el agua y aumenta el poder de hinchamiento. Los resultados obtenidos se ajustan a las observaciones de Aguilera *et al.* (2011) sobre diferentes judías, cuyas harinas presentan un mayor poder de hinchamiento al aplicar la etapa de cocción (2 a 3,50 g/g en judías cannellini y 2,50 a 3,50 en judías pintas). Es importante resaltar que un alto poder de hinchamiento en las harinas las convierte en buenos agentes potenciales para espesar y gelificar en diversos productos alimenticios (Mang *et al.*, 2015).

Por otra parte, el ISA, indica la cantidad de pequeñas moléculas solubilizadas en el agua según el daño molecular causado por el proceso (Oikonomou y Krokida, 2011). Como se puede observar en la Tabla 1, el tratamiento térmico realizado durante el proceso de obtención de las harinas influyó significativamente ($p < 0,05$) en el ISA, teniendo este una tendencia opuesta al IAA y PH. La harina de habas enriquecidas sin piel (HRFe) y la harina de habas remojadas sin piel (HR) presentaron los valores más altos de ISA, siendo 27,66 g/100g y 27,43 g/100g respectivamente. Sin embargo, las mismas harinas, pero con tratamiento térmico (HRV y HRFeV) y la harina de habas remojadas y cocidas con piel (HRV-P) presentaron los valores más bajos, siendo 13,68 g/100 g, 14,07 g/100 g y 14,06 g/100 g, respectivamente. Esta disminución del ISA podría deberse, según Mang *et al.* (2015), a la coagulación de las proteínas. Simons y Hall III (2018) obtuvieron resultados similares al estudiar el ISA de harinas de judías pintas crudas y cocidas con valores de 27,31 g/100 g para la harina de judías crudas y de 10,4 g/100 g para la harina de judías cocidas. Cabe destacar que la harina con bajos niveles de ISA es idónea para la elaboración de pasta instantánea debido a su capacidad de reducir la pérdida de sólidos (tales como minerales o proteínas) en el agua de cocción, lo que evita una disminución de la calidad nutricional del producto (Bento *et al.*, 2021).

Por último, se estudiaron las propiedades tecno-funcionales de las harinas. Para ello, se midió la capacidad de retención de agua (CRA), la capacidad de absorción de aceite (CAA), la actividad y estabilidad emulsionante (AE y EE) y la capacidad gelificante. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2, y tal y como pasó en las propiedades fisicoquímicas, estas se vieron principalmente afectadas por el tratamiento térmico.

Tabla 2. Propiedades tecno-funcionales de las harinas obtenidas por diferentes procesos de elaboración.

Muestra	Parámetro				
	CRA (g/g)	CAA (g/g)	AE (%)	EE (%)	CMG (%)
HR	1,07 ± 0,05 ^e	0,81 ± 0,04 ^a	46,5 ± 0,8 ^a	68,3 ± 0,7 ^a	8
HR-P	1,34 ± 0,09 ^{cd}	0,81 ± 0,04 ^a	43,9 ± 3,4 ^a	55,7 ± 1,3 ^c	8
HRV	1,79 ± 0,10 ^a	0,86 ± 0,14 ^a	8,6 ± 0,4 ^b	5,5 ± 0,4 ^{de}	20
HRV-P	1,84 ± 0,05 ^a	0,66 ± 0,02 ^c	10,9 ± 1,8 ^b	6,0 ± 0,1 ^d	20
HRFe	1,28 ± 0,09 ^d	0,84 ± 0,05 ^a	45,5 ± 0,4 ^a	65,4 ± 0,1 ^b	8
HRFe-P	1,44 ± 0,02 ^c	0,84 ± 0,03 ^a	46,5 ± 0,8 ^a	53,9 ± 2,2 ^c	8
HRFeV	1,65 ± 0,04 ^b	0,78 ± 0,05 ^{ab}	4,2 ± 0,8 ^c	3,5 ± 0,0 ^e	20
HRFeV-P	1,80 ± 0,02 ^a	0,69 ± 0,04 ^{bc}	10,1 ± 0,8 ^b	6,0 ± 0,1 ^d	20

Diferentes letras en las columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre las harinas de habas obtenidas según el método de elaboración ($p < 0,05$).

La CRA es la cantidad de agua que puede retener 1 g de harina tras centrifugar a baja velocidad. Los resultados obtenidos (Tabla 2) muestran que, a pesar de que hay diferencias estadísticamente significativas entre la mayoría de las muestras, la CRA de las harinas de habas cocidas fue mayor que el de las harinas de habas sin cocer. Concretamente, en las harinas enriquecidas aumentó 1,26 veces, mientras que en las harinas sin enriquecer aumentó 1,67 veces sin piel y 1,37 veces con piel. Este aumento podría ser debido a los cambios conformacionales que se dan por la desnaturalización de las proteínas al aplicar altas temperaturas, lo que incrementa aproximadamente un 10 % la capacidad de absorción de agua de la proteína desnaturalizada, en comparación con la proteína nativa, debido al aumento del cociente área superficial/masa (Aguilera *et al.*, 2009). Asimismo, también podría atribuirse a la gelatinización del almidón que tiene lugar por la aplicación de calor, lo que provoca una pérdida de la estructura cristalina y, por consiguiente, un aumento de la capacidad de absorción de agua (Aguilera *et al.*, 2009). Los resultados obtenidos siguen la misma tendencia que los obtenidos por Aguilera *et al.* (2011), Lin y Fernández-Fraguas (2020) y Naiker *et al.* (2020), quienes analizaron diferentes harinas de distintos tipos de alubias con y sin cocer. Además, también se pudo observar que la presencia de piel influyó de manera positiva en la CRA. Las harinas con piel tienen valores de CRA ligeramente superiores a las mismas harinas sin piel. Por ejemplo, la harina de habas enriquecidas sin piel presenta un valor de 1,28 g/g, mientras que la misma harina con piel presenta un valor de 1,44 g/g. Estas ligeras diferencias pueden ser consecuencia del contenido de carbohidratos complejos que tiene la piel y que también podrían influir en la retención de agua (Aguilera *et al.*, 2011).

Por otra parte, la CAA está relacionada con la sensación en boca y la retención del sabor de un alimento (Lin y Fernández-Fraguas, 2020). Tal y como se puede observar en la Tabla 2, la CAA no varía demasiado entre muestras y oscila entre 0,66 y 0,86 g/g, correspondiendo el valor más alto a la harina de habas remojadas y cocidas sin piel (HRV) y el menor a la misma harina, pero con piel (HRV-P). Además, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las muestras excepto para HRV-P y HRFeV-P que presentaron valores más bajos, en torno a 0,7 g/g. Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos por Kumar *et al.* (2022), quienes midieron la CAA de harinas de habas remojadas y cocidas y obtuvieron valores alrededor de 0,6 g/g. Esta propiedad se ha atribuido a la capacidad que tienen las proteínas de unirse a la grasa a través de enlaces no covalentes (Acevedo *et al.*, 2016). Por lo tanto, las diferencias observadas entre muestras podrían estar relacionadas con los cambios conformacionales de las proteínas como consecuencia del proceso de obtención de las harinas. Las harinas con CAA altas pueden conseguir una mejor palatabilidad y vida útil en productos cárnicos o de panadería, donde se requiere la absorción de la grasa (Correia *et al.*, 2021). Además, esta propiedad destaca por su importancia en la estabilidad durante el almacenamiento, fijando así el sabor del producto y limitando el enranciamiento por oxidación lipídica (Siddiq *et al.*, 2010).

La AE es una propiedad que está relacionada con la capacidad que tienen las proteínas para absorber el área interfacial del aceite y el agua y facilitar la formación de una emulsión (Mang *et al.*, 2015). Asimismo, la EE es la que, como su nombre indica, está relacionada con la estabilidad de esa capa absorbida a lo largo del tiempo. Los valores de ambas propiedades se presentan en la Tabla 2, y como bien se puede observar se vieron muy afectadas por el tratamiento térmico realizado a las habas. La AE descendió entre un 78 y un 89 % dependiendo del tipo de harina. Por ejemplo, la harina enriquecida (HRFe) presentaba un 45,51 % de AE, mientras que la misma harina, pero con cocción (HRFeV), tenía un 4,16 %. Resultados similares obtuvieron Aguilera *et al.* (2011) y Bento *et al.* (2021) con otras harinas de legumbres. En cuanto a la EE, las harinas de habas remojadas sin piel y las harinas enriquecidas sin piel tuvieron valores de 65-68 %, y las con piel valores de 53-55 %. Las mismas harinas cocidas obtuvieron valores de alrededor del 5 %. En otros estudios también se observa un descenso de la EE tras la cocción, pero no tan brusco (Bento *et al.*, 2021; Naiker *et al.*, 2020). La alta AE y EE de las harinas de habas remojadas y enriquecidas podría atribuirse al almidón y la fibra, que aumentan la viscosidad de la fase continua, así como a la fuerza de la proteína adsorbida en la interfase (Lin y Fernández-Fraguas, 2020). Asimismo, la baja AE y EE de las harinas de habas cocidas en autoclave podría deberse a la desnaturalización proteica y la gelatinización del almidón resultante del proceso de autoclavado, que hace que las proteínas y el almidón pierdan su función (Bento *et al.*, 2021).

La última propiedad que se estudió fue la capacidad gelificante de las harinas, la cual se determinó a través de la concentración mínima de gelificación (CMG). Según Aguilera *et al.* (2011) una CMG baja significa una mejor propiedad de gelificación, por lo que observando los resultados de la Tabla 2 se puede decir que las harinas con mejor capacidad gelificante son las que no han sido sometidas a la cocción en autoclave. Para las harinas sin cocción la formación de gel se obtuvo con una concentración del 8 %, mientras que para las harinas tratadas térmicamente la concentración fue del 20 %. Según Devisetti *et al.* (2014) el gel se forma por el hinchamiento y la hidratación de los gránulos de almidón, y la fuerza de dicho gel depende principalmente de las fuerzas de unión intragranulares de dichos gránulos de almidón hinchados debido a la aplicación de calor. Por lo tanto, que las harinas de habas sin cocer tengan una mayor capacidad gelificante podría deberse a que los gránulos de almidón permanecen intactos mientras que en las harinas de habas cocidas el almidón ha gelatinizado previamente. Además, también podría deberse a la desnaturalización y agregación de las proteínas inducida por la cocción (Aguilera *et al.*, 2009). Kumar *et al.* (2022) obtuvieron resultados similares con valores

de entre 6 y 8 % para las harinas de habas crudas y remojadas, mientras que las harinas con etapa de cocción presentaron una CMG del 10 %. Esta misma tendencia se puede observar en el estudio de Aguilera *et al.* (2009), donde la CMG de las harinas, tanto de garbanzos como de lentejas, aumentaba con el tratamiento térmico, del 8 % al 12-13 %.

5. CONCLUSIONES

El uso de la impregnación a vacío durante el remojo redujo un 77 % el tiempo necesario para alcanzar el 100 % de hidratación de las habas secas. Además, la disolución de hierro no alteró la cinética de hidratación, por lo que se consiguió acelerar la etapa de remojo y obtener habas enriquecidas en hierro.

En cuanto a cómo afectó el proceso de obtención de las harinas al contenido de hierro y a su fracción bioaccesible, el remojo con hierro aumentó ambos valores y la eliminación de la piel disminuyó su cantidad, pero aumentó su bioaccesibilidad. La cocción afectó de manera distinta a las harinas dependiendo de si tenían o no piel. No afectó al contenido de hierro de las harinas de habas remojadas y cocidas (con y sin piel) pero redujo un 10 % el contenido de hierro de la harina de habas enriquecidas y cocidas con piel, y aumentó un 30 % el contenido de la harina de habas enriquecidas y cocidas sin piel. Sin embargo, la cantidad de hierro bioaccesible aumentó en las harinas con piel y disminuyó en las harinas sin piel.

Finalmente, en cuanto cómo afectó a las propiedades fisicoquímicas y tecno-funcionales, en general, todas las propiedades medidas se vieron afectadas por el tratamiento térmico, pero poco o nada por el enriquecimiento en hierro y la eliminación de la piel. El autoclavado realizado a las habas incrementó la CRA, el IAA, el PH, la densidad aparente y el tamaño de partícula, y redujo el ISA, el IB, la AE, la EE y la capacidad gelificante.

Con este trabajo se han podido obtener harinas de habas enriquecidas en hierro aprovechando y acortando la etapa de remojo, con una mayor cantidad de hierro bioaccesible y con unas propiedades fisicoquímicas y tecno-funcionales que dependerán del proceso de elaboración utilizado para obtener la harina.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ACEVEDO, B. A., THOMPSON, C. M. B., GONZÁLEZ FOUTEL, N. S., CHAVES, M. G., & AVANZA, M. V. (2017). Effect of different treatments on the microstructure and functional and pasting properties of pigeon pea (*Cajanus cajan* L.), dolichos bean (*Dolichos lablab* L.) and jack bean (*Canavalia ensiformis*) flours from the north-east Argentina. *International Journal of Food Science and Technology*, 52(1), 222-230.
- AGUILERA, Y., ESTEBAN, R. M., BENÍTEZ, V., MOLLÁ, E., & MARTÍN-CABREJAS, M. A. (2009). Starch, functional properties, and microstructural characteristics in chickpea and lentil as affected by thermal processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(22), 10682-10688.
- AGUILERA, Y., ESTRELLA, I., BENITEZ, V., ESTEBAN, R. M., & MARTÍN-CABREJAS, M. A. (2011). Bioactive phenolic compounds and functional properties of dehydrated bean flours. *Food Research International*, 44(3), 774-780.
- AHMED, J., TAHER, A., MULLA, M. Z., AL-HAZZA, A., & LUCIANO, G. (2016). Effect of sieve particle size on functional, thermal, rheological and pasting properties of Indian and Turkish lentil flour. *Journal of Food Engineering*, 186, 34-41.
- APRIANITA, APRIANITA, P., UMI, WATSON, BRONWYN AND, & VASILJEVIC, T. (2009). (s. f.). Physico-chemical properties of flours and starches from selected commercial tubers available in Australia. *International Food Research Journal*, 16 (4), 507-520. ISSN 1985-4668.
- BENTO, J. A. C., BASSINELLO, P. Z., CARVALHO, R. N., SOUZA NETO, M. A. DE, CALIARI, M., & SOARES JÚNIOR, M. S. (2021). Functional and pasting properties of colorful bean (*Phaseolus vulgaris* L) flours: Influence of the cooking method. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(11).
- BENTO, J. A. C., BASSINELLO, P. Z., MORAIS, D. K., SOUZA NETO, M. A. DE, BATAUS, L. A. M., CARVALHO, R. N., CALIARI, M., & SOARES JÚNIOR, M. S. (2021). Pre-gelatinized flours of black and carioca bean by-products: Development of gluten-free instant pasta and baked snacks. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 25.
- BESSADA, S. M. F., BARREIRA, J. C. M., & OLIVEIRA, M. B. P. P. (2019). Pulses and food security: Dietary protein, digestibility, bioactive and functional properties. En *Trends in Food Science and Technology* 93, 53-68. Elsevier Ltd.
- BRODKORB, A., EGGER, L., ALMINGER, M., ALVITO, P., ASSUNÇÃO, R., BALLANCE, S., BOHN, T., BOURLIEU-LACANAL, C., BOUTROU, R., CARRIÈRE, F., CLEMENTE, A., CORREDIG, M., DUPONT, D., DUFOUR, C., EDWARDS, C., GOLDING, M., KARAKAYA, S., KIRKHUS, B., LE FEUNTEUN, S., ... RECIO, I. (2019). INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion. *Nature Protocols*, 14(4), 991–1014.
- CHIGWEDERE, C. M., NJOROGE, D. M., VAN LOEY, A. M., & HENDRICKX, M. E. (2019). Understanding the Relations Among the Storage, Soaking, and Cooking Behavior of Pulses: A Scientific Basis for Innovations in Sustainable Foods for the Future. En *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Blackwell Publishing Inc.

- CORNEJO, F., & ROSELL, C. M. (2015). Influence of germination time of brown rice in relation to flour and gluten free bread quality. *Journal of Food Science and Technology*, 52(10), 6591–6598.
- DEVISETTI, R., YADAHALLY, S. N., & BHATTACHARYA, S. (2014). Nutrients and antinutrients in foxtail and proso millet milled fractions: Evaluation of their flour functionality. *LWT*, 59(2P1), 889-895.
- DHULL, S. B., KIDWAI, M. K., NOOR, R., CHAWLA, P., & ROSE, P. K. (2022). A review of nutritional profile and processing of faba bean (*Vicia faba* L.). En *Legume Science* (Vol. 4, Issue 3). John Wiley and Sons Inc.
- DU, S. KUI, JIANG, H., YU, X., & JANE, J. LIN. (2014). Physicochemical and functional properties of whole legume flour. *LWT*, 55(1), 308-313.
- EL-ADAWY, T. A., RAHMA, E. H., EL-BEDAWY, A. A., & SOBIHAH, T. Y. (2000). Effect of soaking process on nutritional quality and protein solubility of some legume seeds. *Nahrung - Food*, 44(5), 339-343.
- ERBERSDOBLER, H. F., BARTH, C. A., & JAHREIS, G. (2017). Legumes in human nutrition Nutrient content and protein quality of pulses. *Science & Research | Overview 134 Ernaehrungs Umschau International*, 9.
- ETEMADI, F., BARKER, A. V., HASHEMI, M., ZANDVAKILI, O. R., & PARK, Y. (2018). Nutrient Accumulation in Faba Bean Varieties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(16), 2064-2073.
- FAO 2016. (2016). *Legumbres: semillas nutritivas para un futuro sostenible*.
- GWALA, S., KYOMUGASHO, C., WAINAINA, I., ROUSSEAU, S., HENDRICKX, M., & GRAUWET, T. (2020). Ageing, dehulling and cooking of Bambara groundnuts: Consequences for mineral retention and: In vitro bioaccessibility. *Food and Function*, 11(3), 2509-2521.
- HANDA, V., KUMAR, V., PANGHAL, A., SURI, S., & KAUR, J. (2017). Effect of soaking and germination on physicochemical and functional attributes of horsegram flour. *Journal of Food Science and Technology*, 54(13), 4229-4239.
- HIRSCHI, K. D. (2009). Nutrient biofortification of food crops. En *Annual Review of Nutrition* (Vol. 29, pp. 401-421).
- HURRELL, R. F. (2022). Ensuring the Efficacious Iron Fortification of Foods: A Tale of Two Barriers. En *Nutrients* (Vol. 14, Issue 8). MDPI.
- JIANG, Z. Q., PULKKINEN, M., WANG, Y. J., LAMPI, A. M., STODDARD, F. L., SALOVAARA, H., PIIRONEN, V., & SONTAG-STROHM, T. (2016). Faba bean flavour and technological property improvement by thermal pre-treatments. *LWT*, 68, 295-305.
- KAUR, M., KAUSHAL, P., & SANDHU, K. S. (2013). Studies on physicochemical and pasting properties of Taro (*Colocasia esculenta* L.) flour in comparison with a cereal, tuber and legume flour. *Journal of Food Science and Technology*, 50(1), 94-100.

- KESKIN, S. O., ALI, T. M., AHMED, J., SHAIKH, M., SIDDIQ, M., & UEBERSAX, M. A. (2022). Physico-chemical and functional properties of legume protein, starch, and dietary fiber—A review. *En Legume Science* (Vol. 4, Issue 1). John Wiley and Sons Inc.
- KHAZAEI, H., & VANDENBERG, A. (2020). Seed mineral composition and protein content of faba beans (*Vicia faba* L.) with contrasting tannin contents. *Agronomy*, 10(4).
- KOSSE, J. S., YEUNG, A. C., GIL, A. I., & MILLER, D. D. (2001). *Analytical, Nutritional and Clinical Methods Section A rapid method for iron determination in fortified foods*.
- KRISHNAN, R., DHARMARAJ, U., & MALLESHI, N. G. (2012). Influence of decortication, popping and malting on bioaccessibility of calcium, iron and zinc in finger millet. *LWT*, 48(2), 169-174.
- KUMAR, S. R., SADIQ, M. B., & ANAL, A. K. (2022). Comparative study of physicochemical and functional properties of soaked, germinated and pressure cooked Faba bean. *Journal of Food Science and Technology*, 59(1), 257-267.
- LATUNDE-DADA, G. O., ASLAM, M. F., ELLIS, P. R., BERRY, S. E., & SHARP, P. A. (2019). Wheat flour fortification to prevent iron-deficiency anemia. *En Flour and Breads and Their Fortification in Health and Disease Prevention* (pp. 485-491). Elsevier.
- L'HOCINE, L., MARTINEAU-CÔTÉ, D., ACHOURI, A., WANASUNDARA, J. P. D., & LOKU HETTI ARACHCHIGE, G. W. (2020). Broad bean (faba bean). *En Pulses: Processing and Product Development* (pp. 27-54). Springer International Publishing.
- LI, Q., LI, S., GUAN, X., HUANG, K., & ZHU, F. (2021). Effects of vacuum soaking on the hydration, steaming, and physiochemical properties of japonica rice. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 85(3), 634-642.
- LIN, T., & FERNÁNDEZ-FRAGUAS, C. (2020). Effect of thermal and high-pressure processing on the thermo-rheological and functional properties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours. *LWT*, 127.
- LUO, Y. W., XIE, W. H., & CUI, Q. X. (2010). Effects of phytase, cellulase, and dehulling treatments on iron and zinc in vitro solubility in faba bean (*vicia faba* L.) flour and legume fractions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(4), 2483-2490.
- LV, X., WU, L., WANG, J., LI, J., & QIN, Y. (2011). Characterization of water binding and dehydration in gelatinized starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(1), 256-262.
- MANG, D. Y., ABDOU, A. B., NJINTANG, N. Y., DJIOGUE, E. J. M., BERNARD, C., SCHER, J., & MBOFUNG, M. C. (2015). Effect of dehulling and boiling on the physico-chemical, functional and pasting properties of two varieties of *Mucuna* bean (*Mucuna pruriens* L.) flours. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 9(3), 435-447.
- MAPA (2020). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Informe del consumo de alimentación en España 2020.
- MAPA (2021). Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Informe del consumo de alimentación en España 2021.

- MARTA, H., CAHYANA, Y., BINTANG, S., SOEHERMAN, G. P., & DJALI, M. (2022). Physicochemical and pasting properties of corn starch as affected by hydrothermal modification by various methods. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 792-812.
- MARTÍNEZ-NAVARRETE, N., CAMACHO, M. M., MARTÍNEZ-LAHUERTA, J., MARTÍNEZ-MONZOÁ, J., & FITO, P. (s. f.). *Iron deficiency and iron fortified foods-a review*.
- MATTAR, G., HADDARAH, A., HADDAD, J., PUJOLA, M., & SEPULCRE, F. (2022). New approaches, bioavailability and the use of chelates as a promising method for food fortification. En *Food Chemistry* (Vol. 373). Elsevier Ltd.
- MIANO, A. C., & AUGUSTO, P. E. D. (2018a). The Hydration of Grains: A Critical Review from Description of Phenomena to Process Improvements. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(2), 352-370.
- MIANO, A. C., & AUGUSTO, P. E. D. (2018b). The ultrasound assisted hydration as an opportunity to incorporate nutrients into grains. *Food Research International*, 106, 928-935.
- MINEKUS, M., ALMINGER, M., ALVITO, P., BALLANCE, S., BOHN, T., BOURLIEU, C., CARRIÈRE, F., BOUTROU, R., CORREDIG, M., DUPONT, D., DUFOUR, C., EGGER, L., GOLDING, M., KARAKAYA, S., KIRKHUS, B., LE FEUNTEUN, S., LESMES, U., MACIERZANKA, A., MACKIE, A., BRODKORB, A. (2014). A standardised static in vitro digestion method suitable for food-an international consensus. *Food and Function*, 5(6), 1113–1124.
- MORENO, J., ECHEVERRIA, J., SILVA, A., ESCUDERO, A., PETZOLD, G., MELLA, K., & ESCUDERO, C. (2017). Apple snack enriched with L-arginine using vacuum impregnation/ohmic heating technology. *Food Science and Technology International*, 23(5), 448-456.
- MULTARI, S., STEWART, D., & RUSSELL, W. R. (2015). Potential of Fava Bean as Future Protein Supply to Partially Replace Meat Intake in the Human Diet. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(5), 511-522.
- NAIKER, T. S., BAIJNATH, H., AMONSOU, E. O., & MELLEM, J. J. (2020). The effect of soaking, steaming, and dehydration on the microstructure, physicochemical properties and in vitro starch digestibility of flour produced from *Lablab purpureus* (L.) Sweet (hyacinth bean). *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(5).
- OIKONOMOU, N. A., & KROKIDA, M. K. (2011). Literature data compilation of WAI and WSI of extrudate food products. *International Journal of Food Properties*, 14(1), 199-240.
- PASQUALONE, A., COSTANTINI, M., COLDEA, T. E., & SUMMO, C. (2020). Use of Legumes in Extrusion Cooking: A Review. En *Foods* (Vol. 9, Issue 7). MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- POR, E., ALLEN, L., DE BENOIST, B., DARY, O., & HURRELL, R. (s. f.). *Guías para la fortificación de alimentos con micronutrientes*.
- RADZIEJEWSKA-KUBZDELA, E., BIEGAŃSKA-MARECIK, R., & KIDOŃ, M. (2014). Applicability of vacuum impregnation to modify physico-chemical, sensory and nutritive characteristics of plant origin products—A review. En *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 15, Issue 9, pp. 16577-16610). MDPI AG.

- RAHATE, K. A., MADHUMITA, M., & PRABHAKAR, P. K. (2021). Nutritional composition, anti-nutritional factors, pretreatments-cum-processing impact and food formulation potential of faba bean (*Vicia faba* L.): A comprehensive review. En *LWT* (Vol. 138). Academic Press.
- RAO, S., JOSHI, S., BHIDE, P., PURANIK, B., & ASAWARI, K. (2014). Dietary diversification for prevention of anaemia among women of childbearing age from rural India. *Public Health Nutrition*, 17(4), 939-947.
- SENSOY, I. (2014). A Review on the Relationship Between Food Structure, Processing, and Bioavailability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(7), 902-909.
- SETIA, R., DAI, Z., NICKERSON, M. T., SOPIWNYK, E., MALCOLMSON, L., & AI, Y. (2019). Impacts of short-term germination on the chemical compositions, technological characteristics and nutritional quality of yellow pea and faba bean flours. *Food Research International*, 122, 263–272.
- SHARAN, S., ZANGHELINI, G., ZOTZEL, J., BONERZ, D., ASCHOFF, J., SAINT-EVE, A., & MAILLARD, M. N. (2021). Fava bean (*Vicia faba* L.) for food applications: From seed to ingredient processing and its effect on functional properties, antinutritional factors, flavor, and color. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), 401-428.
- SHI, L., ARNTFIELD, S. D., & NICKERSON, M. (2018). Changes in levels of phytic acid, lectins and oxalates during soaking and cooking of Canadian pulses. *Food Research International*, 107, 660-668.
- SHUBHAM, K., ANUKIRUTHIKA, T., DUTTA, S., KASHYAP, A. V., MOSES, J. A., & ANANDHARAMAKRISHNAN, C. (2020). Iron deficiency anemia: A comprehensive review on iron absorption, bioavailability and emerging food fortification approaches. En *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 99, pp. 58-75). Elsevier Ltd.
- SIDDIQ, M., RAVI, R., HARTE, J. B., & DOLAN, K. D. (2010). Physical and functional characteristics of selected dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours. *LWT*, 43(2), 232-237.
- SIMONS, C. W., & HALL, C. (2018). Consumer acceptability of gluten-free cookies containing raw cooked and germinated pinto bean flours. *Food Science and Nutrition*, 6(1), 77-84.
- SOSA, E. F., THOMPSON, C., CHAVES, M. G., ACEVEDO, B. A., & AVANZA, M. V. (2020). Legume Seeds Treated by High Hydrostatic Pressure: Effect on Functional Properties of Flours. *Food and Bioprocess Technology*, 13(2), 323–340
- STONE, A. K., PAROLIA, S., HOUSE, J. D., WANG, N., & NICKERSON, M. T. (2021). Effect of roasting pulse seeds at different tempering moisture on the flour functional properties and nutritional quality. *Food Research International*, 147.
- THAKUR, S., SCANLON, M. G., TYLER, R. T., MILANI, A., & PALIWAL, J. (2019). Pulse Flour Characteristics from a Wheat Flour Miller's Perspective: A Comprehensive Review. En *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* (Vol. 18, Issue 3, pp. 775-797). Blackwell Publishing Inc.
- TIAN, Y., ZHAO, J., XIE, Z., WANG, J., XU, X., & JIN, Z. (2014). Effect of different pressure-soaking treatments on color, texture, morphology and retrogradation properties of cooked rice. *LWT*, 55(1), 368-373.

- TONTISIRIN, K., NANTEL, G., & BHATTACHARJEE, L. (2002). Food-based strategies to meet the challenges of micronutrient malnutrition in the developing world. *Proceedings of the Nutrition Society*, 61(2), 243-250.
- VILLARINO, C. B. J., JAYASENA, V., COOREY, R., CHAKRABARTI-BELL, S., & JOHNSON, S. K. (2015). The effects of Australian sweet lupin (ASL) variety on physical properties of flours and breads. *LWT*, 60(1), 435–443.
- VIOQUE, J., ALAIZ, M., & GIRÓN-CALLE, J. (2012). Nutritional and functional properties of Vicia faba protein isolates and related fractions. *Food Chemistry*, 132(1), 67-72.
- WAKEEL, A., FAROOQ, M., BASHIR, K., & OZTURK, L. (2018). Micronutrient Malnutrition and Biofortification: Recent Advances and Future Perspectives. En *Plant Micronutrient Use Efficiency: Molecular and Genomic Perspectives in Crop Plants* (pp. 225-243). Elsevier.
- WANG, B., ZHANG, Q., ZHANG, N., BAK, K. H., SOLADOYE, O. P., ALUKO, R. E., FU, Y., & ZHANG, Y. (2021). Insights into formation, detection and removal of the beany flavor in soybean protein. En *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 112, pp. 336-347). Elsevier Ltd.
- WODAJO, D., & EMIRE, S. A. (2022). Haricot beans (*Phaseolus vulgaris* L.) flour: Effect of varieties and processing methods to favor the utilization of underconsumed common beans. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 1186-1202.
- XIAO, G., GONG, J., GE, Q., & YOU, Y. (2015). Effect of Vacuum Soaking on the Properties of Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *International Journal of Food Engineering*, 11(1), 151-155.
- ZANELLA-DÍAZ, E., MÚJICA-PAZ, H., SOTO-CABALLERO, M. C., WELTI-CHANES, J., & VALDEZ-FRAGOSO, A. (2014). Quick hydration of tepary (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) and pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L.) driven by pressure gradients. *LWT*, 59(2P1), 800-805.
- ZHANG, Y. Y., STOCKMANN, R., NG, K., & AJLOUNI, S. (2022a). Revisiting phytate-element interactions: implications for iron, zinc and calcium bioavailability, with emphasis on legumes. En *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (Vol. 62, Issue 6, pp. 1696-1712). Taylor and Francis Ltd.
- ZUNIN, P., TURRINI, F., LEARDI, R., & BOGGIA, R. (2017). Olive fruits and vacuum impregnation, an interesting combination for dietetic iron enrichment. *Journal of Food Science and Technology*, 54(2), 481–487.