



POLITÉCNICA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA,

ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

GRADO EN CIENCIAS AGRARIAS Y BIOECONOMÍA

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN AGRARIA

Efecto del país de origen y año de cosecha de habas de soja sobre la composición química, el perfil de aminoácidos y la calidad de la proteína de harinas de soja

TRABAJO FIN DE GRADO

Autor/a: Paula Vivanco Montero

Tutor/a: Rosa Pilar Lázaro García

Cotutor/a: Nereida Luna Corrales

Julio de 2025

ÍNDICE

RESUMEN	6
ABSTRACT	8
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. Importancia de la soja como fuente de proteína en la nutrición animal	10
1.2. Composición y calidad de las harinas de soja.....	12
1.3. Formulación actual basada en harinas de soja.....	13
2. OBJETIVOS	16
3. MATERIAL Y MÉTODOS	17
3.1. Recolección de harinas de soja	17
3.2. Análisis de composición química y calidad de la proteína	17
3.3. Análisis estadístico.....	19
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
4.1. Resultados	20
4.1.1. Composición química.....	20
4.1.2. Composición mineral	23
4.1.3. Composición en aminoácidos.....	25
4.1.4. Perfil de aminoácidos e indicadores de calidad de la proteína.....	27
4.2. Discusión	31
4.2.1. Influencia del país de origen de las habas de soja sobre la composición química de las harinas de soja	31
4.2.2. Influencia del país de origen de las habas de soja en el perfil de aminoácidos e indicadores de calidad de la proteína.....	34
4.2.3. Efecto del año de cosecha y coeficientes de variación sobre la composición de la harina de soja	36
5. CONCLUSIONES.....	39
6. BIBLIOGRAFÍA.....	40

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

AA: Aminoácidos.

AIT: Actividad de los inhibidores de la tripsina.

ARG: Argentina.

AU: Actividad ureásica.

BRA: Brasil.

CV: Coeficiente de variación.

DIA: Digestibilidad ileal aparente.

EE: Extracto etéreo.

EEh: Extracto etéreo tras hidrólisis previa con HCl.

EE. UU.: Estados Unidos.

FAD: Fibra ácido detergente.

FAN: Factores antinutricionales.

FB: Fibra bruta.

FND: Fibra neutro detergente.

HS: Harina de soja.

IDP: Índice de dispersabilidad de la proteína.

IT: Inhibidores de tripsina.

MS: Materia seca.

N: Nitrógeno.

NIRS: Espectroscopía de infrarrojo cercano.

PB: Proteína bruta.

UE: Unión Europea.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la producción mundial de habas de soja desde el año 1961 hasta el 2023 (FAO, 2025).....	11
Figura 2. Distribución porcentual de la producción mundial de habas de soja en 2023 (FAO, 2025).	11

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de muestras de harina de soja recolectadas por año según el país de origen de los granos.	17
Tabla 2. Efecto del país de origen de las habas de soja sobre la composición química (%) de las harinas de soja (880 g/kg MS) y estimación del coeficiente de variación (CV, %) y de la proporción de varianza (σ^2 , %) atribuible al año de cosecha, en muestras recolectadas entre 2016 y 2024.	22
Tabla 3. Efecto del país de origen de las habas de soja sobre la composición mineral de las harinas de soja (880 g/kg MS) y estimación del coeficiente de variación (CV, %) y de la proporción de varianza (σ^2 , %) atribuible al año de cosecha, en muestras recolectadas entre 2016 y 2024.	24
Tabla 4. Efecto del país de origen de las habas de soja sobre el contenido (%) de aminoácidos de las harinas de soja (880 g/kg MS) y estimación del coeficiente de variación (CV, %) y de la proporción de varianza (σ^2 , %) atribuible al año de cosecha, en muestras recolectadas entre 2016 y 2024.	26
Tabla 5. Efecto del país de origen de las habas de soja sobre el perfil de aminoácidos (% PB) de las harinas de soja (880 g/kg de MS) y estimación del coeficiente de variación (CV, %) y de la proporción de varianza (σ^2 , %) atribuible al año de cosecha, en muestras recolectadas entre 2016 y 2024.	29
Tabla 6. Efecto del país de origen de las habas de soja sobre los indicadores de calidad de la proteína de las harinas de soja y estimación del coeficiente de variación (CV, %) y de la proporción de varianza (σ^2 , %) atribuible al año de cosecha, en muestras recolectadas entre 2016 y 2024.	30

RESUMEN

Numerosos factores afectan a la composición química y a la calidad proteica de las habas de soja y, en consecuencia, al valor nutricional de las harinas de soja (HS). El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del país de origen de las habas de soja sobre la composición química y mineral, el perfil de aminoácidos (AA) y los indicadores de calidad proteica de muestras comerciales de HS recolectadas aleatoriamente entre los años 2016 y 2024. En total, se analizaron 399 muestras de HS procedentes de Argentina (ARG; n = 121), Brasil (BRA; n = 143) y Estados Unidos (EE. UU.; n = 135), recolectadas en plantas de procesado y fábricas de pienso en diferentes localizaciones de la Unión Europea (UE). Las muestras fueron analizadas mediante química analítica por vía húmeda para todas las variables, excepto los AA, que se determinaron mediante espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS). Los datos se analizaron como un diseño completamente al azar utilizando el procedimiento MIXED del software estadístico SAS. El efecto principal considerado en el modelo fue el país de origen de las habas, mientras que el año de cosecha se consideró como efecto aleatorio. Se determinaron el porcentaje de varianza atribuible al año de cosecha y el coeficiente de variación (CV) para todas las variables estudiadas. El país de origen de las habas de soja tuvo un efecto significativo sobre la mayoría de los parámetros analizados. En base a 880 g/kg de materia seca (MS), las muestras de BRA presentaron un mayor contenido de proteína bruta (PB; 47,2 vs. 46,1 y 46,0 %) y menores concentraciones de sacarosa (5,76 vs. 7,17 y 7,00 %) y estaquiosa (4,14 vs. 4,67 y 4,92 %) que las muestras de ARG y USA ($P < 0,001$). No se detectaron diferencias entre orígenes en los contenidos de extracto etéreo tras hidrólisis previa con HCl (EEh) y fibra neutro detergente (FND). Los valores de índice de dispersabilidad de la proteína (PDI), solubilidad en KOH y actividad de los inhibidores de tripsina (AIT) fueron superiores en las harinas de EE.UU. en comparación con las sudamericanas ($P < 0,05$), mientras que no se observaron diferencias en la actividad ureásica (AU) ni en el contenido de Lys reactiva. El contenido y el perfil de AA variaron en función del país de origen de las habas. El perfil (% PB) de Lys (6,13 vs. 6,09 y 6,07 %) y AA azufrados (2,76 y 2,76 vs. 2,72 %) fue más favorable en las harinas de USA y ARG que en las de BRA ($P < 0,002$ y $P < 0,007$, respectivamente). El año de cosecha explicó parte de la variabilidad observada en la mayoría de las variables evaluadas. Para la sacarosa y rafinosa, el año justificó más del 35 % de la variación observada (45,9 y 39,0 %, respectivamente). De forma similar, buena parte de la variabilidad en el perfil de AA y

en los indicadores de calidad proteica de las harinas se atribuyó al año de cosecha. Se concluye que tanto el país de origen como el año de cosecha son factores determinantes que deben considerarse al evaluar la composición química, el perfil de AA y la calidad proteica de las HS. En consecuencia, se recomienda el uso de matrices nutricionales diferenciadas por origen geográfico que incorporen, además, la variabilidad interanual inherente a cada campaña, con el fin de mejorar la precisión en la formulación de piensos compuestos.

ABSTRACT

Numerous factors affect the chemical composition and protein quality of soybeans and, consequently, the nutritional value of soybean meals (SBM). The objective of this study was to evaluate the effect of the country of origin of the soybeans on the chemical and mineral composition, amino acid (AA) profile, and protein quality indicators of commercial SBM samples collected at random between 2016 and 2024. A total of 399 SBM samples from Argentina (ARG; n = 121), Brazil (BRA; n = 143), and the United States (USA; n = 135) were collected at crushing plants and feed mills at different locations of the European Union (EU). Samples were analyzed by wet chemistry for all the variables, except the AA that were determined by near-infrared spectroscopy (NIRS). Data were analyzed as a completely randomized design using the MIXED procedure of SAS. The main effect of the model was the country of origin of the beans with harvest year considered as a random effect. The variance (%) due to harvest year and the coefficient of variation (CV) were determined for all the variables studied. The country of origin had a significant effect on most of the parameters analyzed. On a dry matter basis of 880 g/kg, BRA meals had higher crude protein content (CP; 47.2 vs. 46.1 and 46.0%) and lower concentrations of sucrose (5.76 vs. 7.17 and 7.00%) and stachyose (4.14 vs. 4.67 and 4.92%) than ARG and USA meals ($P < 0.001$). No differences among soybean origins were detected for ether extract after acid hydrolysis (EEh) or neutral detergent fiber (NDF) contents. Values of protein dispersibility index (PDI), KOH protein solubility, and trypsin inhibitor activity (TIA) were higher in USA meals compared to South American meals ($P < 0.05$), whereas no differences were detected for urease activity (UA) or reactive Lys. Both the content and profile of AA varied depending on the country of origin. The AA profile (% CP) of Lys (6.13 vs. 6.09 and 6.07%) and total sulfur amino acids (2.76 and 2.76 vs. 2.72%) were higher in USA and ARG meals than in those from BRA ($P < 0.01$). Harvest year explains part of the variability observed for most of the variables studied. For sucrose and raffinose crop year justifies over 35% of the variability detected (45.9 and 39.0%, respectively). Similarly, a substantial proportion of the variability in AA profiles and protein quality indicators was explained by harvest year. It is concluded that both harvest year and country of origin of the beans are relevant factors to be considered when studying the chemical composition, AA profile, and protein quality of SBM. Consequently, the use of nutritional matrices differentiated by

geographical origin that also incorporate the interannual variability of each crop year is recommended in order to improve the accuracy of feed formulation.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Importancia de la soja como fuente de proteína en la nutrición animal

En las últimas décadas, el crecimiento acelerado de la población mundial ha impulsado un aumento en la demanda y el consumo de alimentos, lo que ha llevado a la expansión y priorización de cultivos como la soja, de gran importancia para la alimentación animal. La harina de soja (HS) es una de las principales fuentes proteicas empleadas en la nutrición animal a nivel global, debido a su elevado contenido en proteína, perfil de aminoácidos (AA) esenciales y alta digestibilidad. En este sentido, la HS representa un ingrediente fundamental en la formulación de piensos para la gran mayoría de especies de interés zootécnico, especialmente en monogástricos como aves y cerdos. Dada su menor variabilidad en comparación con otras fuentes proteicas y su alta disponibilidad y calidad, la HS se incluye a niveles elevados, especialmente en dietas destinadas a aves. La carne de ave, particularmente la de pollo, es la más consumida a nivel mundial, lo que confiere a esta materia prima un impacto económico significativo en los costes globales de producción de carne. En este contexto, un conocimiento más preciso del valor nutricional de la HS permitiría optimizar las matrices de composición, cuya influencia sobre los costes de alimentación (65-70% en aves) es mayor en comparación con otras materias primas.

La producción y el comercio de soja a nivel mundial se han incrementado significativamente en las últimas décadas, impulsados por la creciente demanda de productos de origen animal y por su papel clave como fuente proteica en la alimentación animal (Figura 1) (FAO, 2025).

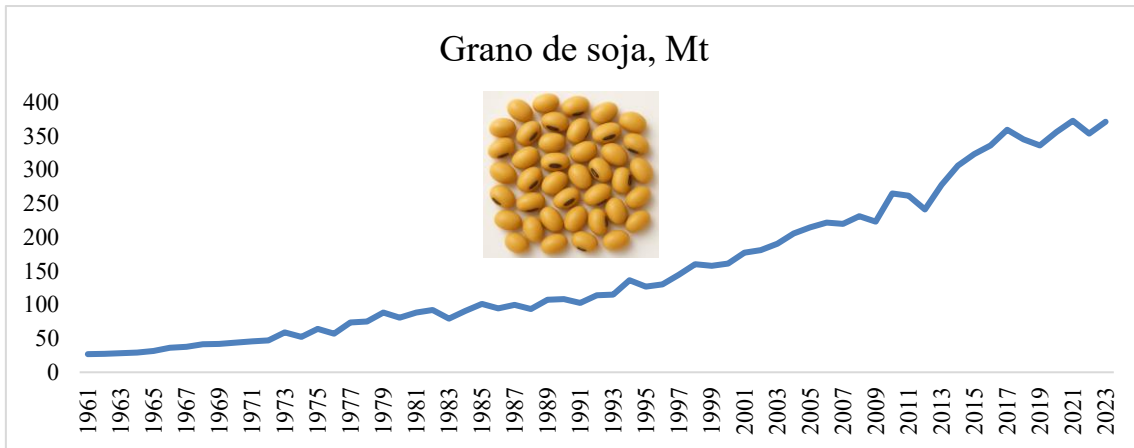


Figura 1. Evolución de la producción mundial de habas de soja desde el año 1961 hasta el 2023 (FAO, 2025).

Este incremento ha estado estrechamente vinculado a la expansión del área cultivada y al aumento de los rendimientos en países con elevada capacidad productiva y una fuerte orientación hacia el mercado internacional. Los principales países productores de soja son Estados Unidos (EE. UU.), Brasil (BRA) y Argentina (ARG), los cuales concentran el 80 % de la producción mundial, seguidos de China, India, Paraguay y Canadá (Figura 2) (FAO, 2025).

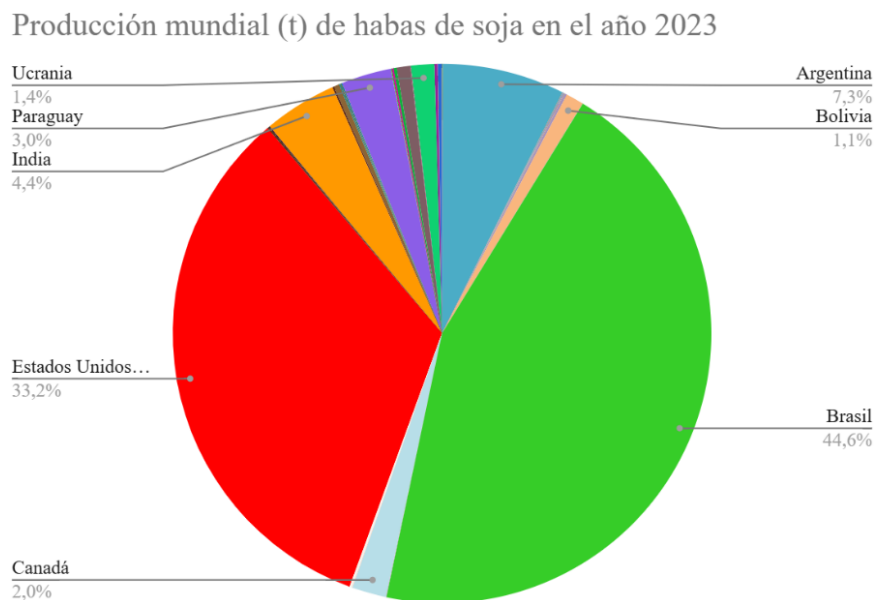


Figura 2. Distribución porcentual de la producción mundial de habas de soja en 2023 (FAO, 2025).

1.2. Composición y calidad de las harinas de soja

La HS es el subproducto principal del procesamiento de las habas de soja tras la extracción del aceite. La composición química, la calidad proteica y el valor nutricional de las HS dependen de numerosos factores, tales como el genotipo de la semilla, el tipo de suelo, las condiciones ambientales (Westgate et al., 2000; Karr-Lilienthal et al., 2005), las características del procesado (Grieshop et al., 2003), el tiempo de almacenamiento (Sueiro et al., 2009) y la presencia de factores antinutricionales (FAN) (Karr-Lilienthal et al., 2004; Frikha et al., 2012).

La calidad final de las HS puede verse afectada significativamente durante las fases de recolección, procesamiento y almacenamiento, especialmente bajo condiciones ambientales extremas, como altas temperaturas y niveles elevados de humedad. Estas condiciones son comunes en áreas tropicales y subtropicales, donde la exposición prolongada de las habas de soja puede dar lugar a procesos adversos que impactan sobre la composición química y la calidad proteica del producto final (Wolf et al., 1982; Kumar et al., 2010).

Durante la recolección y el almacenamiento, las habas de soja están expuestas a procesos como la germinación y la fermentación, que son favorecidos por niveles elevados de humedad ambiental. Estas condiciones pueden incrementar la contaminación por insectos, microorganismos y hongos, reduciendo la calidad de la materia prima (Karr-Lilienthal et al., 2005). Además, la actividad enzimática y microbiana bajo estas condiciones puede provocar la degradación de carbohidratos solubles como la sacarosa, la estaquiosa y la rafinosa, que se transforman en compuestos como glucosa y dióxido de carbono (Obendorf et al., 2009). Simultáneamente, puede producirse un incremento del nitrógeno (N) no proteico, lo que conduce a una sobreestimación del contenido de proteína bruta (PB, calculado como $N \times 6,25$) sin que ello implique un aumento real de la proteína verdadera (Grieshop et al., 2003; Almeida et al., 2014). Además, la fermentación puede alterar el perfil de AA, con pérdidas significativas de AA sensibles como la Lys, la Cys y la Met, esenciales en las dietas animales.

El método de secado empleado en las habas de soja también afecta significativamente la calidad del producto. Los métodos tradicionales como el secado al sol o el uso de madera quemada para generar calor pueden generar un secado desigual y facilitar la contaminación. Por el contrario, los procesos de secado con flujo de aire controlado

aseguran una reducción más eficiente y uniforme de la humedad, preservando mejor la calidad nutricional de la soja (Barrozo et al., 2014; Martínez et al., 2011).

Los tratamientos térmicos aplicados a la soja son fundamentales para reducir los FAN presentes en los granos crudos, los cuales interfieren en la absorción de nutrientes, disminuyendo la digestibilidad y afectando negativamente la mucosa intestinal (Liu et al., 2024). Un tratamiento térmico correcto de las HS reduce sustancialmente los FAN termolábiles, tales como los inhibidores de tripsina (IT) (Brenes y Brenes, 1993), García-Rebollar et al., 2016). Sin embargo, la aplicación de calor durante el procesamiento debe ser controlada, ya que un exceso puede afectar negativamente a la digestibilidad de los AA, así como al valor nutricional global, debido a una mayor incidencia de reacciones de Maillard (Fontaine et al., 2007; González-Vega et al., 2011).

Debido a la complejidad y al alto coste asociado con la medición directa del contenido de IT y las reacciones de Maillard, se han desarrollado métodos indirectos más accesibles para su evaluación. Estos incluyen la determinación de la actividad ureásica (AU, $< 0,20$), la solubilidad en KOH (72–85 %) y en agua, mediante el índice de dispersabilidad de la proteína (IDP, entre 12–30 %), así como la cuantificación de la actividad de los inhibidores de tripsina (AIT, $< 3,5$ mg/g) y la presencia de lisina reactiva (> 85 %) (FEDNA, 2019). El indicador de KOH mide la solubilidad de la proteína en una solución de KOH al 0,2%, lo que permite evaluar el grado de desnaturalización de la fracción proteica como resultado de la aplicación de calor. Valores bajos de KOH ($< 74\%$) sugieren un sobreprocesado de la harina, lo que disminuye la digestibilidad de la Lys, mientras que valores elevados (85-90%) no indican necesariamente una harina subprocesada, sino que son adecuados para animales adultos, pero no para animales jóvenes (Araba y Dale, 1990). En términos nutricionales, los valores óptimos de KOH se sitúan entre el 78% y el 84% (Balloun, 1980; van Eys, 2012). Por otro lado, la determinación de la AIT mide la capacidad de estos compuestos para reducir la actividad enzimática, basándose en un cambio en la absorbancia. Valores inferiores a 1-2 mg/g son indicativos de harinas sobreprocesadas, mientras que valores superiores a 4-5 mg/g sugieren un procesamiento insuficiente.

1.3. Formulación actual basada en harinas de soja

En la formulación de piensos, los nutricionistas utilizan la HS como una de las principales fuentes de proteína, debido a su perfil nutricional y su alto contenido en AA esenciales,

como Lys y Met, lo que permite cubrir en ocasiones las necesidades proteicas sin necesidad de incorporar proteínas de origen animal (García-Rebollar et al., 2016; Ibáñez et al., 2020). En este sentido, las matrices de composición, como las proporcionadas por la Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (FEDNA, 2019), se basan principalmente en el porcentaje de PB y en la digestibilidad. Sin embargo, la composición química y el valor nutritivo de la HS están influenciados por numerosos factores, incluidos aquellos relacionados con las características del suelo, las semillas y la zona geográfica de producción (Westgate et al., 2000; Rotundo y Westgate, 2009; Ibáñez et al., 2020), por lo que es fundamental ir más allá de este enfoque.

En los últimos años, la tecnología de espectroscopía por infrarrojo cercano (NIRS) se ha implementado de manera creciente para el análisis en tiempo real (30 a 60 segundos) de muestras de materias primas que llegan a fábricas de piensos y plantas de procesamiento. Esta herramienta permite agilizar los procesos analíticos, facilitando la toma de decisiones inmediatas y eliminando la necesidad de utilizar productos químicos tradicionalmente empleados en los laboratorios, lo que reduce tanto los costes como el impacto ambiental (Oviedo-Rondón et al., 2024). No obstante, aunque el NIRS se ha consolidado como una técnica ampliamente utilizada para la determinación del análisis proximal en la HS, su aplicación sigue siendo limitada para evaluar la composición de AA y los parámetros relacionados con la calidad de la proteína.

Varios estudios han destacado diferencias consistentes en la composición y el valor nutricional de la HS entre los principales países productores (Ravindran et al., 2014; García-Rebollar et al., 2016; Lagos y Stein, 2017; Ibáñez et al., 2020; Aguirre et al., 2022). Sin embargo, la mayoría de estos estudios analizaron muestras de un único año de cosecha, lo que limita su capacidad para detectar la variabilidad a largo plazo introducida por cambios en las condiciones ambientales y agronómicas.

Por ejemplo, Oviedo-Rondón et al. (2024) analizaron 77,478 muestras de HS procedentes de ARG, BRA y EE. UU., recolectadas entre 2018 y 2021 mediante tecnología NIRS, confirmando diferencias en nutrientes clave entre los países de origen. No obstante, el estudio también señaló que muchas de estas diferencias estuvieron influenciadas significativamente por el año de cosecha. De manera similar, Ibáñez et al. (2020) llevaron a cabo un metaanálisis sobre 1,944 muestras de HS recolectadas entre 2002 y 2018, utilizando datos de 18 publicaciones. Aunque sus resultados detectaron diferencias

consistentes entre países, también estimaron que la variabilidad analítica entre laboratorios podía afectar significativamente los resultados (Cromwell et al., 1999; Oviedo-Rondón et al., 2024).

Esta variabilidad dificulta la estimación precisa de la composición de la HS que llega a los puertos europeos. Por lo tanto, las matrices actuales de HS utilizadas en la formulación de piensos deberían ajustarse no solo por el país de origen de las habas, sino también por el año de cosecha, basándose en datos extensos recopilados a lo largo de varios años, con el fin de minimizar las discrepancias entre cosechas.

El presente estudio evalúa el impacto del origen de la soja y el año de cosecha sobre la composición química, el perfil de AA y los indicadores de calidad proteica de HS recolectadas entre 2016 y 2024, mediante el análisis de 399 muestras procedentes de tres de los principales proveedores globales (EE. UU., BRA y ARG).

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo fue estudiar la influencia del país de origen de las habas de soja sobre la composición química, el perfil de AA, y la calidad de la proteína de HS de distintas procedencias (EE. UU., BRA y ARG), recogidas en diferentes fábricas de piensos y plantas de procesamiento de la Unión Europea (UE) entre el 2016 y el 2024.

A este particular, se determinó la composición química de las HS [humedad, cenizas, PB, extracto etéreo (EE), azúcares (sacarosa, estaquiosa y rafinosa), almidón, fibra bruta (FB), fibra neutro detergente (FND) y fibra ácido detergente (FAD)], el contenido y perfil de AA (esenciales y no esenciales), la composición mineral, distinguiendo entre macro-minerales (Ca, P, K, Mg y Na) y micro-minerales (Zn, Mn, Fe y Cu), y la calidad de la PB a través de parámetros como la AU, el IDP, la solubilidad de la proteína en KOH, los IT y la Lys reactiva.

Además, se determinó la variabilidad debida al año de cosecha para todas las variables estudiadas, con el objetivo de identificar las diferencias atribuidas al efecto aleatorio del año, no explicadas por el país de origen.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Recolección de harinas de soja

En total, se recogieron aleatoriamente 399 muestras de HS procedentes de ARG (n = 121), BRA (n = 143) y EE. UU. (n = 135) en distintas plantas de procesamiento y fábricas de pienso de la UE entre 2016 y 2024. Todas las muestras fueron identificadas y se registraron la fecha de recolección, la planta de procesamiento y el país de origen para su posterior análisis.

Las muestras se obtuvieron tanto a la llegada de los buques a los puertos europeos como en las plantas de trituración. Todas las muestras procedentes de ARG fueron procesadas en su país de origen, cargadas en los puertos de Rosario y Bahía Blanca, y posteriormente descargadas en Europa. Las muestras de BRA (granos o HS) se cargaron en los puertos de Paranaguá, Santos e Ilhéus antes de su llegada a Europa. En el caso de EE. UU., todos los granos fueron embarcados en el puerto de Nueva Orleans. Mientras que las muestras argentinas fueron procesadas antes de su exportación, los granos procedentes de BRA y EE. UU. se procesaron en plantas europeas.

Las muestras se recolectaron durante nueve años consecutivos, con una distribución variable del número de muestras por país según el año de recolección (Tabla 1).

Tabla 1. Número de muestras de harina de soja recolectadas por año según el país de origen de los granos.

Año de cosecha	País de origen ¹			Total
	ARG	BRA	EE. UU.	
2016	27	11	17	55
2017	28	17	17	62
2018	9	10	8	27
2019	15	19	17	51
2020	11	9	14	34
2021	5	25	16	46
2022	3	18	16	37
2023	13	23	20	56
2024	10	11	10	31
Total	121	143	135	399

¹ARG = Argentina, BRA = Brasil.

3.2. Análisis de composición química y calidad de la proteína

Las muestras se analizaron para determinar la humedad mediante secado en horno (método 930.15), las cenizas con horno mufla (método 942.05) y el contenido de N por

el método de Kjeldahl (método 988.05), conforme a lo establecido por la AOAC International (2005). La PB se calculó multiplicando el contenido de N por 6,25. El EE se analizó mediante el método de Soxhlet, previa hidrólisis con HCl 3 N (EEh; método 4.b), según lo especificado en el Boletín Oficial del Estado (1995). La FB se determinó mediante extracción secuencial con ácido y álcalis diluidos (método 962.09; AOAC International, 2005) y la FND se analizó de acuerdo con el procedimiento descrito por van Soest et al. (1991). La sacarosa y los oligosacáridos (estaquiosa y rafinosa) fueron analizados conforme al protocolo de Coca-Sinova et al. (2008), mientras que el almidón se determinó utilizando una amiloglucosidasa/ α -amilasa termoestable (método 996.11; AOAC International, 2005). Los macrominerales y oligoelementos se determinaron según el procedimiento descrito por Hermida et al. (2006). Para ello, las cenizas fueron disueltas en HCl, diluidas a 200 ml con agua Milli-Q y posteriormente filtradas. A continuación, el contenido en P se cuantificó por espectrofotometría a 430 nm (AOAC International, 1995), mientras que los niveles de Na y K se determinaron mediante espectroscopía de emisión a 589.0 y 766.5 nm, respectivamente, utilizando una llama de aire-acetileno. El Ca y el Mg se determinaron mediante espectroscopía de absorción atómica a 422.7 y 285.2 nm, respectivamente. Por último, los oligoelementos Zn, Fe, Cu y Mn fueron analizados mediante espectroscopía de absorción atómica, utilizando lámparas de cátodo hueco de un solo elemento y una llama de aire-acetileno, a 213.9, 248.3, 324.7 y 279.5 nm, respectivamente. El contenido en AA se determinó mediante NIRS, siguiendo el método descrito por Fontaine et al. (2001). Todas las muestras fueron procesadas y analizadas por duplicado en el mismo laboratorio. Todos los datos se expresan sobre una base de 880 g/kg de materia seca (MS), para poder ser comparados.

La AU (Δ pH) se determinó conforme a lo indicado por van Eys (2012), siendo analizadas únicamente las muestras correspondientes al periodo comprendido entre 2020 y 2024 mediante este método. La solubilidad en KOH se evaluó según el procedimiento descrito por Araba y Dale (1990). El IDP se midió de acuerdo con el método Ba 10–65 de la AOCS (2000), utilizando una batidora Hamilton (Modelo G936, VOS Instrument, Zaltbommel, Países Bajos). La AIT, expresada en mg/g MS, se determinó según el procedimiento de Hamerstrand et al. (1981).

3.3. Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante un diseño mixto completamente al azar, utilizando el procedimiento MIXED de SAS (SAS Institute, 2019). El efecto principal del modelo fue el origen de las habas de soja (ARG; BRA y EE. UU.), considerándose el año de cosecha como efecto aleatorio. Asimismo, se determinó la proporción de varianza explicada por el año de cosecha para cada variable estudiada [$(\sigma_{\text{año de cosecha}} + \sigma_{\text{año de cosecha} \times \text{país de origen}}) / \sigma_{\text{total}} \times 100$]. Cuando el efecto del origen resultó significativo se utilizó el test de Tukey para comparar las medias. Las diferencias observadas se consideraron significativas con un valor de $P \leq 0,05$. Además, con el fin de caracterizar la variabilidad dentro de cada país, se calcularon los coeficientes de variación [CV, (desviación estándar / media $\times 100$)] de cada parámetro.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Composición química

Los efectos del país de origen de las habas de soja sobre la composición química de las HS se muestran en la Tabla 2. Las HS de BRA presentaron el valor más alto de PB respecto a las de ARG y EE. UU. (47,2; 46,1 y 46,0%; $P < 0,001$). Respecto a las cenizas, se encontraron diferencias significativas ($P < 0,05$), con valores más bajos en las HS de EE. UU. (6,56%) frente a las de BRA (6,66%) y ARG (6,74%). No se observaron diferencias significativas en el EEh, cuyos valores oscilaron entre 2,00 y 2,04%.

El contenido en sacarosa fue significativamente superior en las HS de ARG y EE. UU. en comparación con las de BRA (7,17 y 7,00 vs. 5,76%; $P < 0,001$). Los niveles de estaquiosa fueron más elevados en las muestras de EE. UU. (4,92%), seguidas de las de ARG (4,67%) y BRA (4,14%; $P < 0,001$). El contenido en rafinosa fue significativamente menor en las harinas de EE. UU. que en las de ARG y BRA (1,18 vs. 1,30 y 1,34%; $P = 0,005$). En conjunto, la suma de oligosacáridos (estaquiosa + rafinosa) fue menor en las HS de BRA (5,48%) que en las de ARG (6,00%) y EE. UU. (6,10%; $P = 0,003$).

En cuanto al contenido en almidón, las HS de BRA presentaron el valor más bajo (0,42%) en comparación con las de ARG (0,54%) y EE. UU. (0,57%; $P = 0,003$). El contenido en FB fue superior en las muestras de BRA y EE. UU. (4,49 y 4,46%, respectivamente) frente a las de ARG (3,97%; $P = 0,004$), mientras que no se observaron diferencias significativas en el contenido de FND. Sin embargo, el contenido en FAD fue significativamente mayor en las de BRA (6,33%) y EE. UU. (6,18%) que en las de ARG (5,57%; $P < 0,001$).

En general, las diferencias entre orígenes en la composición química de las HS fueron significativas para la mayoría de los parámetros evaluados. Sin embargo, una proporción considerable de la variabilidad observada no fue explicada por este efecto, lo que pone de manifiesto la influencia del año de cosecha sobre la composición de las muestras. En este sentido, la varianza atribuida al año de cosecha osciló entre 15,8% para la PB y 45,9% para la sacarosa. También se observaron valores elevados de la varianza para el EEh (34,0%), las cenizas (32,7%), la FND (28,4%) y la FAD (27,3 %), mientras que los

oligosacáridos (18,1%) y la estaquirosa (20,1%) presentaron una dependencia más moderada del ciclo agrícola.

En cuanto a la homogeneidad dentro de cada país, los CV fueron reducidos para la humedad (7,66–8,35%), la PB (2,05–2,65%) y las cenizas (4,97–5,14%), y se incrementaron en componentes como el EEh (27,2–31,6 %), la sacarosa (12,0–17,6%), la rafinosa (17,0–21,2 %) y el almidón (21,6–38,1 %).

Tabla 2. Efecto del país de origen de las habas de soja sobre la composición química (%) de las harinas de soja (880 g/kg MS) y estimación del coeficiente de variación (CV, %) y de la proporción de varianza (σ^2 , %) atribuible al año de cosecha, en muestras recolectadas entre 2016 y 2024.

	País de origen ¹												P-valor	σ^2 año, %
	ARG				BRA				EE. UU.					
	N	Media	EEM ²	CV, %	N	Media	EEM ²	CV, %	N	Media	EEM ²	CV, %		
Humedad	121	11,1	0,187	8,35	142	11,6	0,177	8,33	131	11,7	0,178	7,66	0,050	23,0
Cenizas	121	6,74 ^a	0,078	4,97	141	6,66 ^{ab}	0,076	5,14	130	6,56 ^b	0,076	5,12	0,035	32,7
Proteína bruta	121	46,1 ^b	0,190	2,05	142	47,2 ^a	0,182	2,65	130	46,0 ^b	0,184	2,33	<,001	15,8
Extracto etéreo ³	120	2,02	0,128	31,6	141	2,04	0,124	27,4	130	2,00	0,124	27,2	0,943	34,0
Sacarosa	120	7,17 ^a	0,268	13,5	142	5,76 ^b	0,260	12,0	131	7,00 ^a	0,261	17,6	<,001	45,9
Estaquiosa	121	4,67 ^a	0,125	12,6	141	4,14 ^b	0,118	17,5	130	4,92 ^a	0,119	12,6	<,001	20,1
Rafinosa	119	1,30 ^a	0,060	17,0	141	1,34 ^a	0,058	18,0	131	1,18 ^b	0,058	21,2	0,005	39,0
Oligosacáridos ⁴	119	6,00 ^a	0,128	10,5	140	5,48 ^b	0,119	15,0	130	6,10 ^a	0,120	9,45	0,003	18,1
Almidón	114	0,54 ^a	0,038	21,6	124	0,42 ^b	0,036	38,1	126	0,57 ^a	0,036	28,2	0,003	39,4
Fibra bruta	121	3,97 ^b	0,148	15,8	142	4,49 ^a	0,141	17,3	129	4,46 ^a	0,142	16,8	0,004	23,0
Fibra neutro detergente	121	9,17	0,390	19,7	141	10,1	0,373	18,9	129	9,67	0,375	16,2	0,084	28,4
Fibra ácido detergente	115	5,57 ^b	0,158	8,55	132	6,33 ^a	0,151	13,6	128	6,18 ^a	0,151	12,3	<,001	27,3
Σ componentes ⁵	114	89,7	0,244	2,06	133	89,5	0,224	1,61	125	89,9	0,227	1,63	0,207	10,0

¹ARG = Argentina, BRA = Brasil.

²Error estándar de la media.

³Después de una hidrólisis previa con HCl.

⁴Estaquiosa + rafinosa.

⁵Humedad, cenizas, proteína bruta, extracto etéreo, almidón, sacarosa, estaquiosa, rafinosa y fibra neutro detergente.

4.1.2. Composición mineral

Los efectos del país de origen de las habas de soja sobre el contenido mineral de las HS se presentan en la Tabla 3. En lo que respecta a los macrominerales, no se observaron diferencias significativas entre orígenes en los contenidos de Ca, P, K y Na. En cambio, el contenido de Mg fue superior en las muestras procedentes de BRA (3,22 g/kg), en comparación con ARG (2,87 g/kg) y EE. UU. (2,91 g/kg; $P < 0,001$). En cuanto a los microminerales, se detectaron diferencias significativas entre orígenes para todos los elementos analizados. El contenido en Fe fue superior en las HS procedentes de BRA (143 mg/kg) frente a las de ARG (103 mg/kg) y EE. UU. (105 mg/kg; $P < 0,001$) y el de Zn fue mayor en las harinas de BRA y EE. UU. (52,6 y 52,2 mg/kg, respectivamente) que en las de ARG (46,4 mg/kg; $P < 0,001$). En el caso del Mn, ARG presentó los valores más elevados (40,9 mg/kg), seguida de EE. UU. (34,3 mg/kg) y BRA (31,2 mg/kg; $P < 0,001$) y el Cu mostró concentraciones más altas en ARG (14,4 mg/kg) y EE. UU. (14,0 mg/kg) en comparación con BRA (12,3 mg/kg; $P < 0,001$).

La varianza debida al año de cosecha fue considerable para la mayoría de los minerales evaluados. Entre los macrominerales, los valores más altos de variabilidad interanual se registraron para el Mg (46,6%), seguido por el K (40,0%), el Na (39,2%) y el Ca (35,3%), mientras que el P mostró una variabilidad más moderada (24,1%). Para los microminerales, la mayor variabilidad atribuida al año de cosecha correspondió al Zn 41,3%, seguido del Mn (26,9%) y el Cu (11,3%), siendo el Fe el elemento menos afectado por el efecto del año (8,63%).

La variabilidad dentro de cada país (expresada como CV) fue especialmente alta para el Na, con valores entre 25,4% en ARG y 32,3% en EE. UU., así como para el Fe, cuyo CV alcanzó el 35,1% en BRA frente a 27,2% y 28,0% en ARG y EE. UU., respectivamente.

Tabla 3. Efecto del país de origen de las habas de soja sobre la composición mineral de las harinas de soja (880 g/kg MS) y estimación del coeficiente de variación (CV, %) y de la proporción de varianza (σ^2 , %) atribuible al año de cosecha, en muestras recolectadas entre 2016 y 2024.

	País de origen ¹												P-valor	σ^2 año, %
	ARG				BRA				EE. UU.					
	N	Media	EEM ²	CV, %	N	Media	EEM ²	CV, %	N	Media	EEM ²	CV, %		
Macrominerales, g/kg														
Ca	121	3,25	0,138	16,0	131	3,29	0,133	13,4	130	3,43	0,134	21,3	0,473	35,3
P	120	6,67	0,072	5,47	130	6,48	0,068	4,98	130	6,66	0,069	5,31	0,117	24,1
K	120	21,8	0,347	7,00	130	21,80	0,337	5,74	130	21,9	0,338	5,76	0,891	40,0
Mg	121	2,87 ^b	0,079	7,70	131	3,22 ^a	0,077	9,57	131	2,91 ^b	0,077	11,2	<,001	46,6
Na	120	0,48	0,035	25,4	129	0,47	0,035	31,5	130	0,48	0,035	32,3	0,614	39,2
Microminerales, mg/kg														
Zn	121	46,4 ^b	1,38	10,6	131	52,6 ^a	1,34	9,69	130	52,2 ^a	1,35	11,7	<,001	41,3
Mn	121	40,9 ^a	1,32	14,1	130	31,2 ^b	1,26	21,8	126	34,3 ^b	1,27	15,5	<,001	26,9
Fe	120	103 ^b	5,68	27,2	130	143 ^a	5,17	35,1	129	105 ^b	5,22	28,0	<,001	8,63
Cu	121	14,4 ^a	0,26	9,21	131	12,3 ^b	0,25	18,1	129	14,0 ^a	0,25	9,77	<,001	11,3

¹ARG = Argentina, BRA = Brasil.

²Error estándar de la media.

4.1.3. Composición en aminoácidos

El contenido en AA de las HS también estuvo influenciado por el origen geográfico de las habas, en consonancia con las diferencias detectadas en el contenido de PB (Tabla 4). En particular, las muestras procedentes de BRA presentaron la mayor concentración de Lys (2,88%), superando de forma significativa a las obtenidas en EE. UU. (2,85%) y ARG (2,84%) ($P < 0,001$). No se observaron diferencias significativas entre los países en el contenido en Met ni en la suma de AA azufrados (Met y Cys). La concentración de Thr fue mayor en BRA (1,84%), seguida por ARG (1,81%) y EE. UU. (1,80%; $P < 0,001$). De forma similar, el contenido en Trp, fue superior en BRA (0,64%) frente a ARG y EE. UU. (0,63% ambos; $P < 0,001$). Como resultado, la suma de los cinco AA esenciales clave (Lys, Met + Cys, Thr y Trp) fue significativamente mayor en BRA (6,65%), seguida de ARG y EE. UU. (6,57 y 6,56%; $P = 0,002$). Asimismo, se observaron diferencias significativas en la mayoría de los AA esenciales restantes, con valores generalmente más elevados en BRA. En la misma línea, el contenido total de AA (esenciales y no esenciales) fue superior en BRA (44,5 %), en comparación con ARG (43,5 %) y EE. UU. (43,4 %; $P < 0,001$).

Tras ajustar por el efecto del país de origen, el año de cosecha siguió explicando una proporción apreciable de la variabilidad del contenido de AA (13-26%). Entre los esenciales, la Met mostró la mayor sensibilidad (26,0%), seguida de la Leu (22,1%) y de la Arg y Phe (20,1% ambos), mientras que la Lys presentó el impacto más bajo (13,0%). Además, el año representó el 14,8% de la varianza en la suma de los cinco AA claves y el 18,0% en el total de AA.

Prácticamente todos los AA mostraron CV comprendidos entre 1,5 y 3%. Las dispersiones más elevadas se registraron en la Cys (2,12-3,07%) y, en menor medida, en la fracción de azufrados totales ($\leq 2,8$ %).

Tabla 4. Efecto del país de origen de las habas de soja sobre el contenido (%) de aminoácidos de las harinas de soja (880 g/kg MS) y estimación del coeficiente de variación (CV, %) y de la proporción de varianza (σ^2 , %) atribuible al año de cosecha, en muestras recolectadas entre 2016 y 2024.

	País de origen ¹												P-valor	σ^2 año, %
	ARG				BRA				EE. UU.					
	N	Media	EEM ²	CV, %	N	Media	EEM ²	CV, %	N	Media	EEM ²	CV, %		
AA esenciales														
Arg	116	3,36 ^b	0,016	2,12	134	3,44 ^a	0,015	2,68	130	3,38 ^b	0,015	2,55	<,001	20,1
His	116	1,20 ^b	0,005	2,04	134	1,22 ^a	0,005	2,28	130	1,20 ^b	0,005	2,24	<,001	17,6
Ile	116	2,12 ^b	0,009	1,93	134	2,18 ^a	0,008	2,61	130	2,11 ^b	0,008	2,46	<,001	13,4
Leu	116	3,53 ^b	0,017	2,05	134	3,61 ^a	0,016	2,61	130	3,52 ^b	0,016	2,42	<,001	22,1
Lys	116	2,84 ^b	0,01	1,91	133	2,88 ^a	0,010	2,57	130	2,85 ^b	0,01	2,23	0,002	13,0
Met	116	0,62	0,003	1,83	134	0,62	0,003	2,46	130	0,62	0,003	2,44	0,268	26,0
Phe	116	2,36 ^b	0,012	1,83	134	2,43 ^a	0,011	2,46	130	2,36 ^b	0,011	2,44	<,001	20,1
Thr	116	1,81 ^b	0,006	2,11	134	1,84 ^a	0,006	2,77	130	1,80 ^c	0,006	2,55	<,001	16,7
Trp	116	0,63 ^b	0,002	1,44	132	0,64 ^a	0,002	2,19	130	0,63 ^b	0,002	2,12	<,001	14,2
Val	116	2,20 ^{ab}	0,010	2,60	134	2,24 ^a	0,009	2,69	130	2,20 ^b	0,009	2,30	0,025	14,4
AA no esenciales														
Ala	116	2,02 ^b	0,008	1,70	134	2,05 ^a	0,007	2,39	130	2,00 ^c	0,007	2,29	<,001	16,1
Asp	116	5,25 ^b	0,025	2,16	134	5,40 ^a	0,024	2,70	130	5,25 ^b	0,024	2,48	<,001	21,2
Cys	116	0,66	0,003	2,12	132	0,67	0,003	3,07	130	0,67	0,003	2,80	0,092	20,4
Glu	116	8,28 ^b	0,039	1,99	134	8,51 ^a	0,037	2,71	130	8,29 ^b	0,037	2,48	<,001	20,9
Gly	116	1,95 ^b	0,007	1,61	134	2,00 ^a	0,007	2,02	130	1,95 ^b	0,007	2,00	<,001	20,5
Pro	116	2,32 ^b	0,009	1,73	134	2,38 ^a	0,009	2,49	130	2,32 ^b	0,009	2,20	<,001	17,0
Ser	116	2,32 ^b	0,010	1,79	134	2,38 ^a	0,009	2,38	130	2,32 ^b	0,009	2,20	<,001	20,0
AA azufrados totales³	116	1,28	0,006	1,96	134	1,29	0,006	2,78	130	1,28	0,006	2,47	0,064	24,3
Σ Cinco AA clave⁴	113	6,57 ^b	0,023	1,58	131	6,65 ^a	0,022	2,42	128	6,56 ^b	0,022	2,14	<,001	14,8
Σ Diez AA clave⁵	113	21,3 ^b	0,083	1,75	131	21,8 ^a	0,078	2,43	128	21,3 ^b	0,079	2,16	<,001	16,8
Σ AA totales	113	43,5 ^b	0,178	1,81	131	44,5 ^a	0,169	2,48	128	43,4 ^b	0,170	2,24	<,001	18,0

¹ARG = Argentina, BRA = Brasil.

²Error estándar de la media.

³Met y Cys.

⁴Lys, Met, Cys, Thr y Trp.

⁵Lys, Met, Cys, Thr, Trp, Arg, His, Ile, Leu, Phe, y Val.

4.1.4. Perfil de aminoácidos e indicadores de calidad de la proteína

El perfil de AA de las HS varió significativamente en función del país de origen de las habas (Tabla 5). Expresado en porcentaje de PB, el contenido en Lys fue superior en las muestras procedentes de EE. UU. (6,13% PB) en comparación con las de ARG (6,09% PB) y BRA (6,07% PB; $P = 0,002$). De forma similar, la proporción de AA azufrados fue mayor en las HS de EE. UU. y ARG (2,76% PB) que en las de BRA (2,72% PB; $P = 0,007$). En el caso de la Thr, se observaron contenidos similares en las HS de BRA y EE. UU. (3,87% PB), mientras que las muestras de ARG presentaron el valor más alto (3,90% PB; $P = 0,001$). El contenido relativo de Trp fue mayor en las muestras de ARG y EE. UU. (1,37 y 1,36% PB) en comparación con las de BRA (1,35% PB; $P = 0,007$). Como consecuencia, la concentración de los cinco AA esenciales clave en la fracción proteica fue superior en las harinas procedentes de EE. UU. y ARG (14,1% PB) respecto a las de origen brasileño (14,0% PB; $P = 0,001$). Sin embargo, no se detectaron diferencias entre los orígenes para la suma de los diez AA clave (Lys, Met, Cys, Thr, Trp, Arg, His, Ile, Leu, Phe, y Val).

Una parte sustancial de la variabilidad observada en el perfil de AA de las HS se atribuyó al efecto del año de cosecha, con porcentajes superiores al 40 % en AA como la Arg (48,5 %) o la Leu (48,0 %). Valores también elevados se observaron para el Trp (31,5 %), la Met (29,2 %) y la Cys (22,9%), mientras que la Lys y la Thr obtuvieron porcentajes moderados (19,7 y 16,3%, respectivamente).

En cuanto al CV, los valores fueron en general bajos para la mayoría de los AA. El CV de la Met fue superior en las muestras procedentes de EE. UU. (1,63 %) en comparación con ARG (1,28 %) y BRA (1,24 %). De forma similar, la Cys presentó mayor variabilidad en EE. UU. (1,98 %) respecto a ARG (1,58 %) y BRA (1,72 %). En el caso de la Lys, los valores oscilaron entre 0,90 % (ARG) y 1,07 % (BRA), mientras que los de Trp se mantuvieron en torno al 1 % en los tres orígenes.

Los indicadores de calidad proteica también mostraron diferencias significativas entre los orígenes (Tabla 6). En cuanto al IDP, los valores fueron más elevados en las muestras de EE. UU. (17,6 %) que en las de BRA (12,8 %) y ARG (12,2 %; $P = 0,001$). Lo mismo se observó para la solubilidad en KOH, con mayores valores en las HS de EE. UU. (78,7 %) frente a BRA (74,9 %) y ARG (74,3 %; $P = 0,003$). Por último, la AIT fue menor en las harinas argentinas (2,16 mg/g MS), seguida por las brasileñas (2,40 mg/g MS) y las

estadounidenses (2,70 mg/g MS; $P = 0,028$). No se detectaron diferencias significativas entre los orígenes para la AU o la Lys reactiva.

La proporción de la varianza explicada por el año de cosecha fue especialmente elevada para la AU, con un valor del 76,3 %. También se observaron efectos relevantes del año para el IDP y la AIT, con valores de varianza del 55,3 y 43,9 %, respectivamente. El año de cosecha explicó asimismo una parte importante de la variabilidad en la solubilidad de la proteína en KOH (24,5 %) y, en menor medida, en la Lys reactiva expresada como porcentaje de la Lys total (9,13%).

Para el caso del CV se observó una alta variabilidad relativa en la AU, con valores superiores al 130 % en todos los orígenes. En el caso del IDP, los CV fueron elevados en las tres procedencias, destacando EE. UU. con un valor del 32,5 %, superior al de ARG y BRA (24,9 y 25,2 %, respectivamente). En sentido contrario, la solubilidad en KOH presentó valores de CV más bajos, con una menor variabilidad en EE. UU. (4,63 %) en comparación con ARG (6,88 %) y BRA (6,14 %). Para la AIT, los CV oscilaron entre el 27,7 y el 30,8 %, mientras que la Lys reactiva y su proporción sobre la Lys total mostraron una variabilidad muy reducida, con CV inferiores al 3 % en todos los casos.

Tabla 5. Efecto del país de origen de las habas de soja sobre el perfil de aminoácidos (% PB) de las harinas de soja (880 g/kg de MS) y estimación del coeficiente de variación (CV, %) y de la proporción de varianza (σ^2 , %) atribuible al año de cosecha, en muestras recolectadas entre 2016 y 2024.

	País de origen ¹												P-valor	σ^2 año, %
	ARG				BRA				EE. UU.					
	N	Media	EEM ²	CV, %	N	Media	EEM ²	CV, %	N	Media	EEM ²	CV, %		
AA esenciales														
Arg	116	7,22 ^b	0,021	0,92	134	7,24 ^b	0,020	0,97	130	7,28 ^a	0,020	1,07	0,002	48,5
His	116	2,58	0,006	0,98	134	2,58	0,006	1,01	130	2,59	0,006	0,97	0,206	30,4
Ile	116	4,56 ^b	0,008	0,58	134	4,60 ^b	0,007	0,70	130	4,55 ^b	0,007	0,80	<,001	35,1
Leu	116	7,59 ^{ab}	0,014	0,68	134	7,61 ^b	0,013	0,67	130	7,57 ^b	0,014	0,64	0,013	48,0
Lys	116	6,09 ^b	0,012	0,90	133	6,07 ^b	0,011	1,07	130	6,13 ^a	0,011	1,05	0,002	19,7
Met	116	1,33 ^a	0,004	1,28	134	1,31 ^b	0,004	1,24	130	1,33 ^a	0,004	1,63	<,001	29,2
Phe	116	5,07 ^b	0,009	0,59	134	5,13 ^a	0,008	0,81	130	5,07 ^b	0,008	0,76	<,001	33,7
Thr	116	3,90 ^a	0,005	0,78	134	3,87 ^b	0,005	0,65	130	3,87 ^b	0,005	0,65	0,001	16,3
Trp	113	1,37 ^a	0,003	0,92	132	1,35 ^b	0,003	0,89	128	1,36 ^a	0,003	1,01	0,007	31,5
Val	116	4,73	0,017	2,41	134	4,71	0,015	2,05	130	4,74	0,016	2,04	0,454	12,3
AA no esenciales														
Ala	116	4,34 ^a	0,005	0,56	134	4,32 ^a	0,005	0,56	130	4,30 ^b	0,005	0,56	<,001	22,0
Asp	116	11,3 ^b	0,019	0,67	134	11,4 ^a	0,018	0,68	130	11,3 ^b	0,018	0,62	<,001	42,8
Cys	116	1,43 ^{ab}	0,005	1,58	132	1,41 ^b	0,005	1,72	130	1,43 ^a	0,005	1,98	0,025	22,9
Glu	116	17,8 ^c	0,030	0,59	134	17,9 ^a	0,029	0,64	130	17,9 ^b	0,029	0,63	<,001	43,9
Gly	116	4,20	0,006	0,53	134	4,21	0,006	0,69	130	4,20	0,006	0,73	0,134	27,1
Pro	116	4,99	0,012	1,09	134	5,01	0,012	0,91	130	5,00	0,012	0,89	0,328	46,2
Ser	116	4,99 ^b	0,005	0,48	134	5,01 ^a	0,005	0,51	130	4,99 ^b	0,005	0,54	0,002	26,6
AA azufrados totales ³	116	2,76 ^a	0,009	1,16	134	2,72 ^b	0,008	1,61	130	2,76 ^a	0,008	1,64	0,007	26,0
Σ Cinco AA clave ⁴	113	14,1 ^a	0,022	0,68	131	14,0 ^b	0,021	0,79	128	14,1 ^a	0,021	0,81	0,001	23,3
Σ Diez AA clave ⁵	113	45,9	0,047	0,46	131	45,9	0,045	0,51	128	45,9	0,045	0,40	0,560	28,9
Σ AA totales	113	93,5	0,104	0,40	131	93,7	0,100	0,46	128	93,6	0,101	0,38	0,062	44,0

¹ARG = Argentina, BRA = Brasil.

²Error estándar de la media.

³Met y Cys.

⁴Lys, Met, Cys, Thr y Trp.

⁵Lys, Met, Cys, Thr, Trp, Arg, His, Ile, Leu, Phe, y Val.

Tabla 6. Efecto del país de origen de las habas de soja sobre los indicadores de calidad de la proteína de las harinas de soja y estimación del coeficiente de variación (CV, %) y de la proporción de varianza (σ^2 , %) atribuible al año de cosecha, en muestras recolectadas entre 2016 y 2024.

	País de origen ¹												P-valor	σ^2 año, %
	ARG				BRA				EE. UU.					
	N	Media	EEM ²	CV, %	N	Media	EEM ²	CV, %	N	Media	EEM ²	CV, %		
AU (Δ pH) ³	42	0,021	0,022	131,6	82	0,036	0,022	234	71	0,032	0,022	207	0,671	76,3
IDP (%) ⁴	121	12,2 ^b	1,165	24,9	140	12,8 ^b	1,143	25,2	128	17,6 ^a	1,145	32,5	0,001	55,3
KOH (%) ⁵	120	74,3 ^b	0,916	6,88	141	74,9 ^b	0,869	6,14	130	78,7 ^a	0,873	4,63	0,003	24,5
AIT (mg/g) ⁶	121	2,16 ^b	0,185	29,1	142	2,40 ^{ab}	0,180	27,7	129	2,70 ^a	0,180	30,8	0,028	43,9
Lys reactiva (%) ⁷	52	2,52	0,013	2,85	99	2,54	0,011	2,82	88	2,54	0,011	2,67	0,637	9,13
Lys reactiva (% Lys)	52	88,0	0,348	1,71	99	88,3	0,323	1,47	89	89,1	0,324	1,34	0,085	29,5

¹ARG = Argentina, BRA = Brasil.

²Error estándar de la media.

³Actividad ureásica de harinas de soja analizadas entre 2020 y 2024.

⁴Índice de dispersabilidad de la proteína.

⁵Solubilidad de la proteína en KOH.

⁶Actividad de los inhibidores de tripsina (880 g/kg de MS).

⁷Determinado mediante NIRS.

4.2. Discusión

Diversos estudios han comparado la composición química y el valor nutricional de HS procedentes de distintos países productores. No obstante, la mayoría de ellos se han basado en periodos de muestreo limitados, un número de muestras reducido o procedimientos analíticos no estandarizados (Grieshop y Fahey, 2001; Karr-Lilienthal et al., 2004; Thakur y Hurburgh, 2007; Goerke et al. 2012; Ravindran et al. 2014).

Estudios recientes a gran escala han evidenciado una alta variabilidad en la composición de las HS, influenciada tanto por el país de origen de las habas como por el año de cosecha. Oviedo-Rondón et al. (2024) analizaron más de 77,000 muestras mediante NIRS y confirmaron diferencias consistentes entre ARG, BRA y EE. UU. en parámetros como la PB, el EE, la FB y la Lys. Por otro lado, Ibáñez et al. (2020) destacaron, a través de un metaanálisis, la influencia del origen, pero también la importancia de la variabilidad analítica entre laboratorios, que en algunos casos puede ser superior a la atribuida al propio ingrediente (Cromwell et al., 1999; Oviedo-Rondón et al., 2024).

Uno de los estudios más completos y citados hasta la fecha es el de García-Rebollar et al. (2016), en el que se analizaron 515 muestras comerciales de HS procedentes de EE. UU., BRA y ARG recolectadas durante nueve campañas consecutivas (2007–2015). Los resultados confirmaron diferencias consistentes entre países en cuanto al contenido en PB, perfil de AA, fracciones de fibra e indicadores de calidad proteica (PDI, solubilidad en KOH). Dichos hallazgos respaldan el uso de matrices nutricionales específicas por origen para la formulación de piensos.

En el presente trabajo, se da continuidad a dicho estudio mediante el análisis de 399 muestras comerciales de HS recolectadas durante nueve campañas consecutivas (2016–2024). Este conjunto de datos permite actualizar el conocimiento disponible sobre las diferencias en la composición de la HS en función del origen, considerando además el efecto aleatorio del año de cosecha.

4.2.1. Influencia del país de origen de las habas de soja sobre la composición química de las harinas de soja

Los resultados del presente estudio confirman que el país de origen de las habas de soja ejerce una influencia significativa sobre la composición química de las HS. En

consonancia con estudios previos se detectaron diferencias significativas entre las muestras procedentes de EE.UU., BRA y ARG para la mayoría de las variables analizadas (Ravindran et al., 2014; García-Rebollar et al., 2016; Ibáñez et al., 2020; Oviedo-Rondón et al., 2024).

El contenido en PB difirió significativamente entre orígenes, con valores más elevados en las muestras procedentes de BRA, seguidas por las de ARG y EE. UU., en concordancia con lo reportado en estudios previos (Thakur y Hurburgh, 2007; Frikha et al., 2012; Ravindran et al., 2014; Cámara et al., 2017; Ibáñez et al., 2020). Sin embargo, otros autores han observado niveles similares de PB entre las HS de BRA y EE. UU. (García-Rebollar et al., 2016; Grieshop y Fahey, 2001; Karr-Lilienthal et al., 2004), e incluso superiores en las de EE. UU. (Park y Hurburgh, 2002). Estas diferencias reflejan una alta variabilidad del contenido en PB, influenciada por factores como el genotipo de la semilla (Zarkadas et al., 2007), la zona de cultivo (Wilcox y Shibles, 2001; Karr-Lilienthal et al., 2005), las condiciones ambientales (Rotundo et al., 2016; Pfarr et al., 2018), el año de cosecha (Ravindran et al., 2014; Cámara et al., 2017) y variables agroclimáticas como la latitud, la temperatura y el fotoperiodo, observándose mayores niveles de PB en habas cultivadas a latitudes más bajas (Cromwell et al., 1999; Grieshop et al., 2003; Medic et al., 2014; Miller-Garvin y Naeve, 2015). Además, factores industriales, como el grado de descascarillado y la reincorporación de cáscara tras la extracción del aceite, también afectan la composición final de la HS (Mateos et al., 2011; García-Rebollar et al., 2016). Por otro lado, el mayor contenido proteico observado en algunas muestras de BRA podría estar relacionado con la presencia de habas dañadas o germinadas por condiciones climáticas adversas, frecuentes en regiones tropicales (Wolf et al., 1982; Kumar et al., 2010). En estas situaciones, la actividad enzimática y microbiana reduce el contenido en carbohidratos solubles (Obendorf et al., 2009) y aumenta el de N no proteico (Grieshop et al., 2003; Almeida et al., 2014), lo que puede conducir a una sobreestimación de la PB, al calcularse como $N \times 6,25$.

En el presente estudio, se observaron diferencias significativas en el contenido en FB y FAD según el origen, con valores más elevados en las HS de BRA y EE. UU. frente a las de ARG, mientras que la FND no se vio afectada de forma significativa. Este resultado contrasta parcialmente con estudios previos, donde tanto la FB como la FND fueron superiores en las HS de BRA (Thakur y Hurburgh, 2007; Frikha et al., 2012; Ravindran et al., 2014; García-Rebollar et al., 2016; Lagos y Stein, 2017; Ibáñez et al., 2020). Las

diferencias en fibra pueden atribuirse a la proporción de tegumento reincorporado, la localización geográfica del cultivo y las condiciones ambientales (Mateos et al., 2011; Medic et al., 2014; Li et al., 2015). Destaca que las HS de BRA presentaron simultáneamente mayor PB, FB y FAD que las de ARG, lo que cuestiona la relación inversa comúnmente asumida entre PB y fibra. Resultados similares fueron reportados por García-Rebollar et al. (2016) e Ibáñez et al. (2020), quienes también encontraron que las HS de BRA presentaban simultáneamente mayores niveles de PB y FND.

En cuanto a los azúcares, las muestras de ARG y EE. UU. presentaron niveles mayores de sacarosa y estaquiosa, mientras que el contenido de rafinosa fue más elevado en las harinas de ARG y BRA. Como resultado, el contenido total de oligosacáridos fue mayor en ARG, seguido de EE. UU., y menor en BRA, en concordancia con estudios previos (García-Rebollar et al., 2016; Mateos et al., 2011; Frikha et al., 2012; Lagos y Stein, 2017). Estas diferencias se asocian principalmente a condiciones agroclimáticas, siendo la concentración de sacarosa más alta en regiones con temperaturas más bajas durante el llenado del grano (Wolf et al., 1982; Kumar et al., 2010), mientras que la estaquiosa se acumula al final de la maduración (Obendorf et al., 2009). Desde el punto de vista nutricional, la sacarosa es un carbohidrato digestible y palatable, útil especialmente en dietas de lechones (Berrocoso et al., 2014), mientras que los oligosacáridos como rafinosa y estaquiosa, tradicionalmente considerados FAN, pueden ejercer efectos prebióticos beneficiosos al fermentar en el intestino grueso, dependiendo de la especie, la edad y el nivel de inclusión (Coon et al., 1990; Grizard y Barthomeuf, 1999; Conway, 2001; Bouhnik et al., 2004).

El contenido mineral de las HS se situó dentro del rango descrito en la literatura (Harmon et al., 1969; Batal et al., 2010; NRC, 2012; Tahir et al., 2012), aunque los estudios comparativos entre países son escasos y a menudo contradictorios (Karr-Lilienthal et al., 2004; García-Rebollar et al., 2016; Ravindran et al., 2014; Cámara et al., 2017; Lagos y Stein, 2017; Ibáñez et al., 2020). En este estudio no se observaron diferencias significativas entre orígenes para el Ca, el P, el K y el Na, en contraste con lo reportado por algunos autores (Mateos et al., 2011; García-Rebollar et al., 2016; Ibáñez et al., 2020). Sin embargo, el contenido en Mg fue mayor en las muestras de BRA, al igual que el Fe, posiblemente debido a la elevada concentración de este elemento en suelos tropicales y a una mayor absorción a pH bajos (García-Rebollar et al., 2016). Las diferencias encontradas en el contenido mineral de las HS pueden atribuirse a variaciones en las

características del suelo, la fertilización y la capacidad de absorción de la planta (Westgate et al., 2000; Huerta y Martin, 2002). En BRA, los suelos de cultivo son ácidos y ricos en Al y Fe (Huerta y Martin, 2002; Jensen, 2010), lo que favorece la absorción de estos minerales, pero limita la del P debido a la formación de compuestos insolubles con Al a pH bajo (Brennan et al., 1994). Por tanto, es esperable que las HS de BRA presenten mayor contenido en Fe y menor en P que las de EE. UU. y ARG.

La mayoría de los AA presentaron concentraciones más elevadas en las muestras procedentes de BRA, en concordancia con el mayor contenido en PB observado en estas HS. Estos resultados son coherentes con lo reportado previamente en la bibliografía (Cromwell et al., 1999; Frikha et al., 2012), que indica una relación directa entre el contenido en PB y la concentración de AA esenciales y no esenciales en la HS.

4.2.2. Influencia del país de origen de las habas de soja en el perfil de aminoácidos e indicadores de calidad de la proteína

El perfil de AA de las HS varió en función del origen, en concordancia con numerosos estudios (Grieshop et al., 2003; Goldflus et al., 2006; Thakur y Hurburgh, 2007; Mateos et al., 2011; Medic et al., 2014; García-Rebollar et al., 2016; Lagos y Stein, 2017; Ibáñez et al., 2020; Oviedo-Rondón et al., 2024). Las HS de EE. UU. y ARG presentaron mayores concentraciones relativas de Lys, AA azufrados totales y Thr que las de BRA (Evonik, 2010, 2016; Frikha et al., 2012; Ravindran et al., 2014; García-Rebollar et al., 2016; Lagos y Stein, 2017; Cámara et al., 2017; Ibáñez et al., 2020), aunque aún no existe una explicación definitiva para estas diferencias. Algunos autores han señalado que, a mayor contenido en PB, disminuye proporcionalmente la concentración de AA limitantes (Medic et al., 2014; Mourtzinis et al., 2017; Pfarr et al., 2018). En conjunto, estos datos refuerzan la necesidad de considerar no solo el contenido en PB, sino también el perfil de AA al evaluar el valor nutritivo de las HS según su origen.

En cuanto a los indicadores de calidad de la proteína, no se detectaron diferencias significativas en la AU (Δ pH) entre las HS de distintos orígenes, con valores por debajo del umbral de 0,05 Δ pH establecido como indicador de alta calidad (Grieshop et al., 2003; Karr-Lilienthal et al., 2004). Estos resultados contrastan con los obtenidos por García-Rebollar et al. (2016), quienes reportaron una menor AU (expresada en mg N/g) en muestras de ARG. Es probable que el método del Δ pH, con menor sensibilidad en

niveles bajos de actividad, no haya permitido detectar variaciones entre orígenes que podrían ser identificadas mediante el método estequiométrico (Araba y Dale, 1990).

La calidad térmica de la HS se evalúa habitualmente mediante el IDP y la solubilidad en KOH, considerándose óptimos valores de 15–30 % para el IDP y 75–85 % para la solubilidad en KOH (Balloun, 1980; Batal et al., 2000; van Eys, 2012). Valores superiores indican subprocesado, con posible presencia de IT, mientras que valores inferiores reflejan sobreprocesado y mayor riesgo de reacciones de Maillard, con la consiguiente pérdida de Lys.

El IDP fue significativamente mayor en las HS de EE. UU. (17,6 %) frente a las de BRA (12,8 %) y ARG (12,2 %). Mientras que el valor de EE. UU. se encuentra dentro del rango recomendado, los de ARG y BRA podrían indicar cierto sobreprocesado, en línea con lo reportado por García-Rebollar et al. (2016). Sin embargo, la relación entre el IDP y la digestibilidad no es directa; Coca-Sinova et al. (2008) y Frikha et al. (2012) no hallaron una correlación significativa entre IDP y la digestibilidad ileal aparente (DIA) de la PB y los AA, lo que pone en duda la validez del umbral del 15 % como límite inferior absoluto y plantea la necesidad de revisar este criterio.

La solubilidad en KOH fue mayor en las HS de EE. UU. (78,7 %) en comparación con las de BRA (74,9 %) y ARG (74,3 %), en concordancia con García-Rebollar et al. (2016) e Ibáñez et al. (2020). En dichos estudios, una proporción considerable de las muestras de EE. UU. superó el 85 %, mientras que más del 40 % de las sudamericanas quedaron por debajo del 75 %. Frikha et al. (2012) encontraron una correlación positiva entre la solubilidad en KOH y la DIA de AA esenciales, lo que sugiere que una mayor solubilidad puede asociarse con menor incidencia de reacciones de Maillard, siempre que la IT y la AU se mantengan dentro de los límites aceptables.

En conjunto, estos hallazgos respaldan la propuesta de García-Rebollar et al. (2016) e Ibáñez et al. (2020) de que las recomendaciones actuales para PDI y KOH deberían reevaluarse a la luz de la respuesta zootécnica, en lugar de basarse exclusivamente en valores analíticos fijos.

La AIT de las HS varió significativamente según el origen, con valores más altos en EE. UU. (2,70 mg/g), seguidos de BRA (2,40 mg/g) y ARG (2,16 mg/g). Estos niveles se encuentran dentro del rango típico para harinas comerciales (2–4 mg/g; USSEC, 2008;

van Eys, 2012; Ravindran et al., 2014) y coinciden con los resultados obtenidos por García-Rebollar et al. (2016) e Ibáñez et al. (2020).

La mayor AIT observada en las HS de EE. UU. coincide con sus valores más altos de PDI (17,6 %) y solubilidad en KOH (78,7 %), frente a las menores cifras registradas en las muestras de BRA y ARG. Este patrón indica un procesado térmico menos intenso en los granos estadounidenses. Según Ibáñez et al. (2020), esta diferencia podría deberse a la pre-deshidratación con aire caliente en zonas tropicales de BRA y ARG, así como a sobrecalentamientos durante el almacenamiento y transporte, lo que reduciría los valores de AIT, PDI y KOH.

4.2.3. Efecto del año de cosecha y coeficientes de variación sobre la composición de la harina de soja

Los resultados indican que, además del país de origen, el año de cosecha es un factor clave en la variación de la composición química y la calidad proteica de las HS. El efecto del año explicó entre el 16–39 % de la varianza en los componentes químicos, 15–35 % en AA esenciales y macrominerales, y 30–60 % en los indicadores de calidad de la proteína. Estos hallazgos confirman que la calidad nutricional de las HS está influenciada no solo por el origen geográfico, sino también por las condiciones edafoclimáticas y de procesado específicas de cada campaña.

Entre los componentes químicos, la sacarosa fue el más afectado por el año de cosecha, con un 45,9 % de la varianza explicada por este factor. Esta alta variabilidad interanual coincide con lo descrito por Oviedo-Rondón et al. (2024), quienes la relacionan con la interacción entre temperatura y humedad durante el llenado del grano, la cual también influye en la relación proteína:aceite y en la síntesis de oligosacáridos (Rotundo y Westgate, 2009).

Los CV de la PB dentro de cada país (2,05–2,65 %) confirman la alta uniformidad previamente reportada por García-Rebollar et al. (2016) e Ibáñez et al. (2020), y coinciden con los datos NIRS de Oviedo-Rondón et al. (2024), quienes identificaron a la PB como el nutriente más estable, especialmente en muestras de EE. UU. En contraste, la sacarosa presentó CV mucho más altos (12,0–17,6 %), similares a los reportados por García-Rebollar et al. (2016) e Ibáñez et al. (2020), lo que indica una elevada sensibilidad a factores ambientales. Esta mayor variabilidad fue también reflejada por Oviedo-Rondón

et al. (2024), quienes observaron una interacción significativa entre origen y año de cosecha.

El modelo mixto mostró que el año de cosecha explica una proporción relevante de la variabilidad en la mayoría de los macro y microminerales, lo que respalda la influencia de factores edafoclimáticos y de manejo, como la disponibilidad hídrica, la temperatura durante el llenado del grano y la estrategia de fertilización (Gibson y Mullen, 2001; Wijewardana et al., 2019; Bobrecka-Jamro et al., 2018). En cuanto a la dispersión, García-Rebollar et al. (2016) identificaron al Na y al Fe como los minerales menos uniformes, y el metaanálisis de Ibáñez et al. (2020) reportó CV globales superiores al 100 % para ambos, duplicando los valores observados dentro de cada país.

El año de cosecha explicó más del 40 % de la varianza en el perfil de algunos AA esenciales, especialmente en Arg y Leu, y en menor medida en Trp, Met y Cys. La Lys y la Thr también mostraron una variabilidad moderada, aunque también relevantes desde el punto de vista nutricional. Estos resultados coinciden con Oviedo-Rondón et al. (2024), quienes observaron efectos significativos de la interacción entre origen y año sobre el perfil de AA. Por su parte, García-Rebollar et al. (2016) reportaron CV dentro de cada país de origen muy reducidos ($\leq 1,6$ % para los principales AA esenciales), en línea con los valores del presente estudio, lo que sugiere una alta estabilidad del perfil de AA cuando se controla el origen geográfico.

En cuanto a los indicadores de calidad proteica, el año de cosecha tuvo un efecto destacado sobre la variabilidad de las HS, explicando el 76,3 % de la varianza en la AU, el 55,3 % en el IDP y el 43,9 % en la AIT. Su influencia fue menor en la solubilidad en KOH (24,5 %) y en la Lys reactiva (9,1 %). Este patrón de variación es consistente con estudios multianuales que atribuyen la variabilidad en AU e IDP a los ajustes anuales en el procesado térmico, necesarios por las condiciones climáticas al momento de la cosecha, especialmente la temperatura y la humedad del grano (García-Rebollar et al., 2016). El metaanálisis de Ibáñez et al. (2020) también reportó amplios rangos para AU e IDP, asociados a diferencias en el procesado y a la heterogeneidad climática entre años.

En cuanto a los CV, la AU fue el parámetro más variable, con valores superiores al 130 % en los tres orígenes. El IDP también mostró una variabilidad relativa considerable, con un CV del 32,5 % en las muestras de EE. UU. y valores en torno al 25 % en ARG y BRA, en consonancia con los rangos amplios descritos en el metaanálisis de Ibáñez et al. (2020).

La AIT mostró una variabilidad intermedia (CV: 28–31 %), reflejando su sensibilidad al procesado térmico, aunque con menor dispersión que la AU o el IDP. En contraste, la solubilidad en KOH fue altamente estable entre orígenes, destacando EE. UU. por sus valores más altos, lo que sugiere un procesado más uniforme.

Estos resultados confirman que, si bien el origen geográfico condiciona en gran medida la composición de las harinas de soja, las particularidades agroclimáticas de cada campaña continúan ejerciendo una influencia determinante sobre sus principales componentes químicos.

5. CONCLUSIONES

- El país de origen de las habas de soja ejerce un efecto significativo sobre la composición química, el contenido mineral, el perfil de AA, y los indicadores de calidad proteica de las HS. En general, las muestras de BRA presentaron un mayor contenido en PB y AA totales, mientras que las de ARG y EE. UU. destacaron por una mayor proporción relativa de AA esenciales clave.
- Se observaron diferencias significativas entre orígenes para la mayoría de los componentes químicos analizados, incluyendo la PB, los azúcares y las fracciones de fibra. Las harinas brasileñas presentaron un mayor contenido en FB, FAD, Zn y Fe, mientras que las de EE. UU. y ARG mostraron valores más elevados de sacarosa y oligosacáridos totales.
- Aunque los contenidos absolutos de AA fueron generalmente más altos en las HS brasileñas, el perfil relativo respecto a la PB fue más elevado en las muestras de EE. UU. y ARG. Además, se registraron diferencias entre orígenes en los indicadores de calidad proteica, como el IDP, la solubilidad en KOH y la AIT, sugiriendo diferencias en el grado y uniformidad del tratamiento térmico.
- El año de cosecha explicó una proporción significativa de la variabilidad en numerosos parámetros, tras ajustar por origen geográfico (país de origen de las habas de soja). Este efecto fue especialmente relevante en componentes como la sacarosa, la AU, el IDP, y diversos AA esenciales, evidenciando la influencia determinante de las condiciones edafoclimáticas y del procesado interanual.
- Aunque en la práctica actual las HS se clasifican y valoran mayoritariamente en función de su contenido en PB, los resultados del presente estudio confirman que dicha estrategia es insuficiente para reflejar su valor nutricional real. Las diferencias sistemáticas observadas entre orígenes en múltiples parámetros justifican la necesidad de utilizar matrices nutricionales específicas por país de origen de las habas de soja. Además, la marcada variabilidad interanual registrada en numerosos componentes clave refuerza la recomendación de considerar el efecto del año de cosecha en los sistemas de caracterización y valoración de materias primas, con el fin de mejorar la precisión en la formulación de piensos y reducir el margen de error nutricional.

6. BIBLIOGRAFÍA

Almeida, F. N., Htoo, J. K., Thomson, J., & Stein, H. H. (2014). Amino acid digestibility of heat-damaged soybean meal and the effect of non-protein nitrogen on protein quality. *J. Anim. Sci.*, 92(6), 2630–2640.

AOAC International (Association of Official Analytical Chemists International). (1995). *Official methods of analysis of the AOAC International* (16.^a ed.). AOAC International.

AOAC International (Association of Official Analytical Chemists International). (2005). *Official methods of analysis of the AOAC International* (18.^a ed.). AOAC International.

AOCS (American Oil Chemists' Society). (2000). *Official methods and recommended practices of the AOCS* (5.^a ed.). AOCS.

Aguirre, L., Cámara, L., Smith, A., Arroyo, J. J., de Juan, A. F., Fondevila, G., & Mateos, G. G. (2022). Chemical composition, protein quality indicators and in vitro protein digestibility of commercial soybean meals from different origins for use in poultry feeding. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 293, 115473.

Araba, M., & Dale, N. M. (1990). Evaluation of KOH solubility as an indicator of overprocessing soybean meal. *Poult. Sci.*, 69(1), 76–83.

Balloun, S. L. (1980). *Soybean meal in poultry nutrition*. Ovid Bell Press.

Batal, A. B., Douglas, M. W., Engram, A. E., & Parsons, C. M. (2000). Protein dispersibility index as an indicator of adequately processed soybean meal. *Poult. Sci.*, 79(10), 1592-1596.

Batal, A. B., & Parsons, C. M. (2010). Utilization of different soy products as affected by age in chicks. *Poult. Sci.*, 89(1), 34–43.

Barrozo, M., Mujumdar, A. S., & Freire, J. T. (2014). Air-drying of seeds: A review. *Drying Technology*, 32(10), 1127–1141.

Brenes, A., & Brenes, J. (1993). Tratamiento tecnológico de los granos de leguminosas: influencia sobre su valor nutritivo. *IX Curso de Especialización FEDNA*, Barcelona, España.

- Berrocoso, J. D., Cámara, L., Rebollar, P. G., Guzmán, P., & Mateos, G. G. (2014). Influence of source and micronization of soya bean meal on growth performance, nutrient digestibility and ileal mucosa morphology of Iberian piglets. *Anim.*, 8, 555–564.
- Bobrecka-Jamro, D., Jarecki, W., & Buczek, J. (2018). Response of soya bean to different nitrogen fertilization levels. *J. Elem.*, 23(2), 559–568.
- Boletín Oficial del Estado. (1995). *Real Decreto 2257/1994 por el que se aprueban los métodos oficiales de análisis de piensos o alimentos para animales y sus primeras materias*. *Boletín Oficial del Estado*, 52, 7161–7237.
- Bouhnik, Y., Raskine, L., Simoneau, G., Viaut, E., Neu, C., Flourié, B., Brouns, F., & Bornet, F. R. (2004). The capacity of nondigestible carbohydrate to estimate fecal bifidobacteria in healthy humans: A double-blind, randomized, placebo-controlled parallel-group, dose-response relation study. *Am. J. Clin. Nutr.*, 80, 1658–1664.
- Brennan, R. F., Bolland, M. D. A., Jeffery, R. C., & Allen, D. G. (1994). Phosphorus adsorption by a range of Western Australian soils related to soil properties. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 25(17-18), 2785–2795.
- Cámara, L., García-Rebollar, P., Dapoza, C., & Mateos, G. G. (2017). Chemical composition of commercial soybean meals according to the origin of the beans. *AECA - Avicultura*, 54, 178–182. Asociación Española de Ciencia Avícola (WPSA Branch).
- Conway, P. L. (2001). Prebiotics and human health: The state of the art and future perspectives. *Scand. J. Nutr.*, 45(4), 161–164.
- Coon, C. N., Leske, K. L., Akavanichan, O., & Cheng, T. K. (1990). Effect of oligosaccharide-free soybean meal on true metabolizable energy and fiber digestion in adult roosters. *Poult. Sci.*, 69(5), 787–793.
- Cromwell, G. L., Calvert, C. C., Cline, T. R., Crenshaw, J. D., Crenshaw, T. D., Easter, R. A., Ewan, R. C., Hamilton, C. R., Hill, G. M., Lewis, A. J., Mahan, D. C., Miller, E. R., Nelssen, J. L., Pettigrew, J. E., Tribble, L. F., Veum, T. L., & Yen, J. T. (1999). Variability among sources and laboratories in nutrient analyses of corn and soybean meal. *J. Anim. Sci.*, 77(12), 3262–3273.

de Coca-Sinova, A., Valencia, D. G., Jiménez-Moreno, E., Lázaro, R., & Mateos, G. G. (2008). Apparent ileal digestibility of energy, nitrogen, and amino acids of soybean meals of different origin in broilers. *Poult. Sci.*, 87(12), 2613–2623.

Evonik Industries. (2010). *AMINODat 4.0* [Base de datos]. Evonik-Degussa GmbH.

Evonik Industries. (2016). *AMINODat 5.0: Animal Nutritionist's Information Edge (Book II)*. Evonik-Degussa GmbH.

FAO. (2025). *FAOSTAT – Producción de cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>

FEDNA (Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal). (2019). *Tablas FEDNA de composición y valor nutritivo de alimentos para la fabricación de piensos compuestos* (4.^a ed.). FEDNA.

Fontaine, J., Hörr, J., & Schirmer, B. (2001). Near-infrared reflectance spectroscopy enables the fast and accurate prediction of the essential amino acid contents in soy, rapeseed meal, sunflower meal, peas, fishmeal, meat meal products, and poultry meal. *J. Agric. Food Chem.*, 49(1), 57–66.

Fontaine, J., Zimmer, U., Moughan, P. J., & Rutherford, S. M. (2007). Effect of heat damage in an autoclave on the reactive lysine contents of soy products and corn distillers dried grains with solubles: Use of the results to check on lysine damage in common qualities of these ingredients. *J. Agric. Food Chem.*, 55(26), 10737–10743.

Frikha, M., Serrano, M. P., Valencia, D. G., Rebollar, P. G., Fickler, J., & Mateos, G. G. (2012). Correlation between ileal digestibility of amino acids and chemical composition of soybean meals in broilers at 21 days of age. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 178(1–2), 103–114.

García-Rebollar, P., Cámara, L., Lázaro, R. P., Dapoza, C., Pérez-Maldonado, R., & Mateos, G. G. (2016). Influence of the origin of the beans on the chemical composition and nutritive value of commercial soybean meals. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 221, 245–261.

Gibson, L. R., & Mullen, R. E. (2001). Mineral concentrations in soybean seed produced under high day and night temperature. *Can. J. Plant Sci.*, 81(4), 595–600.

- Goerke, M., Eklund, M., Mosenthin, R., & Rademacher, M. (2012). Amino acid digestibility in different soybean products and rapeseed meal for piglets. *Anim. Feed Sci. Technol.*, *171*(2–4), 218–226.
- Goldflus, F., Ceccantini, M., & Santos, W. (2006). Amino acid content of soybean samples collected in different Brazilian states—Harvest 2003/2004. *Braz. J. Poult. Sci.*, *8*(2), 105–111.
- González-Vega, J. C., Kim, B. G., Htoo, J. K., Lemme, A., & Stein, H. H. (2011). Amino acid digestibility in heated soybean meal fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.*, *89*(11), 3617–3625.
- Grieshop, C. M., & Fahey, G. C. (2001). Comparison of quality characteristics of soybeans from Brazil, China, and the United States. *J. Agric. Food Chem.*, *49*(6), 2669–2673.
- Grieshop, C. M., Kadzere, C. T., Clapper, G. M., Flickinger, E. A., Bauer, L. L., Frazier, R. L., & Fahey, G. C. Jr. (2003). Chemical and nutritional characteristics of United States soybeans and soybean meals. *J. Agric. Food Chem.*, *51*(26), 7684–7691.
- Grizard, D., & Barthelemy, C. (1999). Non-digestible oligosaccharides used as prebiotic agents: mode of production and beneficial effects on animal and human health. *Reprod. Nutr. Dev.*, *39*, 563–588.
- Hamerstrand, G. E., Black, L. T., & Glover, J. D. (1981). Trypsin inhibitors in soy products: Modification of the standard analytical procedure. *Cereal Chem.*, *58*(1), 42–45.
- Harmon, B. G., Becker, D. E., Jensen, A. H., & Baker, D. H. (1969). Nutrient composition of corn and soybean meal. *J. Anim. Sci.*, *28*, 459–464.
- Hermida, M., González, M., Miranda, M., & Rodríguez-Otero, J. L. (2006). Mineral analysis in rabbit meat from Galicia (NW Spain). *Meat Sci.*, *73*(4), 635–639.
- Huerta, A. I., & Martin, M. A. (2002). *Soybean production costs: An analysis of the United States, Brazil, and Argentina*. Comunicación presentada en la Annual Meeting of the Agricultural and Applied Economics Association, Long Beach, CA, Estados Unidos.
- Ibáñez, M. A., De Blas, C., Cámara, L., & González Mateos, G. G. (2020). Chemical composition, protein quality and nutritive value of commercial soybean meals produced

from beans from different countries: A meta-analytical study. *Anim. Feed Sci. and Technol.*, 267, 114531.

Jensen, T. L. (2010). *Soil pH and the availability of plant nutrients* (Plant Nutrition Today No. 2010-3). International Plant Nutrition Institute.

Karr-Lilienthal, L.K., Grieshop, C.M., Merchen, N.R., Mahan, D.C., Fahey Jr., G.C. (2004). Chemical composition and protein quality comparisons of soybeans and soybean meals from five leading soybean-producing countries. *J. Agric. Food Chem.* 52(19), 6193–6199.

Karr-Lilienthal, L. K., Grieshop, C. M., Spears, G. C., & Fahey, G. C. Jr. (2005). Amino acid, carbohydrate, and fat composition of soybean meals prepared at 55 commercial U.S. soybean processing plants. *J. Agric. Food Chem.*, 53(6), 2146–2150.

Kumar, V., Rani, A., Goyal, L., Dixit, A. K., Manjaya, J. G., Dev, J., & Swamy, M. (2010). Sucrose and raffinose family oligosaccharides (RFOs) in soybean seeds as influenced by genotype and growing location. *J. Agric. Food Chem.*, 58(8), 5081–5085.

Lagos, L. V., & Stein, H. H. (2017). Chemical composition and amino acid digestibility of soybean meal produced in the United States, China, Argentina, Brazil, or India. *J. Anim. Sci.*, 95(4), 1626.

Li, Z., Wang, X., Guo, P., Liu, L., Piao, X., Stein, H. H., Li, D., & Lai, C. (2015). Prediction of digestible and metabolisable energy in soybean meals produced from soybeans of different origins fed to growing pigs. *Arch. Anim. Nutr.*, 69(6), 473–486.

Liu, W., Wang, W., Li, J., Li, H., Gao, T., & Zhu, B. (2024). Anaerobic fermentation of soybean meal by *Bacillus subtilis* ED-3-7 and its effect on the intestinal microbial community of chicken. *Poult. Sci.*, 104(1), 104564.

Martínez, M. L., Marín, M. A., & Ribotta, P. D. (2011). Optimization of soybean heat-treating using a fluidized bed dryer. *J. Food Sci. Technol.*, 50(6), 1144–1150

Mateos, G. G., Sueiro, S., González, M., Hermida, M., Fickler, J., García-Rebollar, P., Serrano, M. P., & Lázaro, R. (2011). Differences among origins on nutritional and quality parameters of soybean meal. *Poult. Sci.*, 90(Suppl. 1), 57 (Resumen).

- Medic, J., Atkinson, C., & Hurburgh, C. R. (2014). Current knowledge in soybean composition. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, *91*, 363–384.
- Miller-Garvin, J., & Naeve, S. L. (2015). *United States soybean quality*. University of Minnesota.
- Mourtzinis, S., Gaspar, A. P., Naeve, S. L., & Conley, S. P. (2017). Planting date, maturity, and temperature effects on soybean seed yield and composition. *Agron. J.*, *109*, 2040–2049.
- NRC (National Research Council). (2012). *Nutrient requirements of swine* (11th ed.). Natl. Acad. Press.
- Obendorf, R. L., Zimmerman, A. D., Zhang, Q., Castillo, A., Kosina, S. M., Bryant, E. G., Sensenig, E. M., Wu, J., & Schnebly, S. R. (2009). Accumulation of soluble carbohydrates during seed development and maturation of low-raffinose low-stachyose soybean. *Crop Sci.*, *49*(1), 329–341.
- Oviedo-Rondón, E. O., Toscan, A., Fagundes, N. S., Vidal, J. K., & Thiery, P. (2024). Soybean meal nutrient composition, amino acid digestibility, and energy content according to the country of origin and year of harvest evaluated via NIRS. *J. Appl. Poult. Res.*, *33*(1), 100123.
- Park, H. S., & Hurburgh, C. R. (2002). *Improving the U.S. position in world soybean meal trade* (MATRIC Working Paper 02-MWP 6). Iowa State University, Midwest Agribusiness Trade Research and Information Center. https://lib.dr.iastate.edu/matric_workingpapers/6
- Pfarr, M. D., Kazula, M. J., Miller-Garvin, J. E., & Naeve, S. L. (2018). Amino acid balance is affected by protein concentration in soybean. *Crop Sci.*, *58*(1), 1–13.
- Ravindran, V., Abdollahi, M. R., & Bootwalla, S. M. (2014). Nutrient analysis, metabolizable energy, and digestible amino acids of soybean meals of different origins for broilers. *Poult. Sci.*, *93*(10), 2567–2577.
- Rotundo, J. L., & Westgate, M. E. (2009). Meta-analysis of environmental effects on soybean seed composition. *Field Crops Res.*, *110*(2), 147–156.

Rotundo, J. L., Miller-Garvin, J. E., & Naeve, S. L. (2016). Regional and temporal variation in soybean seed protein and oil across the United States. *Crop Sci.*, *56*(2), 797–808. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.06.0394>

SAS Institute. (2019). *SAS/STAT® user's guide* (Versión 9.0). SAS Institute Inc.

Sueiro, S., Frikha, M., Serrano, M. P., Hermida, M., & Mateos, G. G. (2009). Influencia del tiempo de almacenaje sobre los parámetros de calidad de la harina de soja. En *XIII Jornadas sobre Producción Animal. Tomo I* (pp. 223–225). Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario (AIDA).

Tahir, M., Shim, M. Y., Ward, N. E., Foster, E., Guney, A. C., & Pesti, G. M. (2012). Phytate and other nutrient components of feed ingredients for poultry. *Poult. Sci.*, *91*(4), 928–935.

Thakur, M., & Hurburgh, C. (2007). Quality of US soybean meal compared to the quality of soybean meal from other origins. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, *84*(9), 835–843.

USSEC (United States Soybean Export Council). (2008). *Soy protein concentrate for aquaculture feeds* (Technical Bulletin). United States Soybean Export Council.

Van Eys, J. E. (2012). *Manual of quality analyses for soybean products in the feed industry* (2.^a ed.). U.S. Soybean Export Council (USSEC).

Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, A. (1991). Methods for dietary fibre, neutral detergent fibre, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.*, *74*(10), 3583–3597.

Westgate, M.E., Piper, E., Batchelort, W.D., Hurburgh, C. (2000). Effects of cultural environmental conditions during soybean growth on nutritive value of soy products. En J.K. Drackley (Ed.), *Soy in animal nutrition* (pp. 75-89). Federation of Animal Science Society.

Wijewardana, C., Reddy, K. R., & Bellaloui, N. (2019). Soybean seed physiology, quality, and chemical composition under soil moisture stress. *Food Chem.*, *278*, 92–100.

Wilcox, J. R., & Shibles, R. M. (2001). Interrelationships among seed quality attributes in soybean. *Crop Sci.*, *41*(1), 11–14.

Wolf, R., Cavins, J., Kleiman, R., & Black, L. (1982). Effect of temperature on soybean seed constituent oil, protein, moisture, fatty acids, amino acids and sugars. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 59(5), 230–232.

Zarkadas, C. G., Gagnon, C., Gleddie, S., Khanizadeh, S., Cober, E. R., & Guillemette, R. J. D. (2007). Assessment of the protein quality of fourteen soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] cultivars using amino acid analysis and two-dimensional electrophoresis. *Food Res. Int.*, 40(1), 129–146.